



SIMULAÇÃO DE TRANSIENTES DE PRESSÃO EM DUTOS DE USINAS HIDROELÉTRICAS E NUCLEARES PELO MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS

Wilber H. V. Gómez

Lineu J. Pedroso

Neander B. Mendes

willbervelez@hotmail.com

lineu@unb.br

neanderberto@hotmail.com

Universidade de Brasília - UnB

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Programa de Pós Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) – Grupo de Dinâmica e Fluido - Estrutura (GDPE). Caixa Postal 04492, Campus Darcy Ribeiro, CEP 70.919-970, Brasília - DF, Brasil.

Resumo. Usinas hidroelétricas e centrais nucleares são projetos importantes que requerem a utilização de condutos forçados em seus sistemas hidráulicos, estes têm tubulações com diferentes configurações, tamanhos e materiais que variam de acordo com as especificações e requisitos de cada obra. Na literatura tem-se uma série de trabalhos experimentais, mas estes além de terem um custo elevado são focados em situações particulares. Com o avanço da tecnologia tem-se desenvolvido novas ferramentas computacionais que permitem fazer a análises mediante simulações numéricas para qualquer tipo de configuração. Na Universidade de Brasília (UnB) o Grupo de Dinâmica e Fluido Estrutura (GDPE) tem se dedicado há mais de duas décadas aos estudos de transientes de pressão em circuitos tubulares e desenvolvido uma série de programas e rotinas que permitem efetuar análises neste campo do conhecimento. O GDPE dispõe de um programa bastante elaborado (TRANSPETRO-1D) melhorado e acrescido de novas potencialidades, que permite fazer análises do fenômeno transiente pelo método das características para determinadas condições dos sistemas, que são constituídos por uma linha principal, onde podem aparecer vários elementos localizados como perdas singulares, chaminés de equilíbrio, conexões em galho, etc.

Palavras-chave: Usinas hidroelétricas, Centrais nucleais, Simulação, Transientes de pressão, Método das características.

1 INTRODUÇÃO

O estudo do fenômeno transiente de pressão apresenta grande interesse devido a seu relevante impacto nos sistemas utilizados para o transporte de fluidos. Na literatura técnica, investigadores de todo o mundo têm estudado os conceitos mais importantes e as principais equações para sua análise. As pesquisas pioneiras foram desenvolvidas e confirmadas experimentalmente por Joukowski (1898), Allievi (1903) e Streeter e Wylie (1967), sendo estes últimos os autores da obra mais importante e completa deste fenômeno, servindo como base para vários estudos que abordam desde os conceitos do fenômeno até as aplicações em problemas mais complexos, destacando-se os métodos de análise, e vários algoritmos computacionais baseados especialmente no Método das Características.

Dentre os estudos recentes, Brunone *et al.* (2000) publicaram seus resultados experimentais para variações de velocidade no tempo em várias zonas ao longo de uma mesma seção do tubo para o fechamento de uma válvula. Izquierdo e Iglesias (2002) apresentaram um modelo matemático para a análise de transientes hidráulicos em sistemas simples de distribuição com base no método de características, o que resultou no desenvolvimento do programa. Izquierdo e Iglesias (2004) compararam os resultados obtidos por um software comercial. Pires *et al.* (2004) estudaram os transientes em dutos curtos gerados pelo fechamento rápido de válvulas. Magzoub e Kwane (2007) empregaram o método gráfico e o Método das Características na construção de modelos para calcular e simular transientes em alguns condutos. Silvore (2007) desenvolveu um programa de análise transiente em Java que permitia trabalhar com válvulas de fechamento brusco, fechamento gradual, falhas de energia na bomba e mudanças bruscas nos cruzamentos.

Outros estudos foram feitos por Andrzejewski (2009) que realizou uma comparação entre os resultados de métodos de resolução de chaminés de equilíbrio, baseados em métodos numéricos de diferentes complexidades, com os resultados obtidos de um protótipo instalado em laboratório hidráulico. Bratland (2009) escreve o livro “Pipe Flow 1: Single-phase Flow Assurance” onde se abordam problemas mais complexos como a variação de calor calculado pelo Método das Características, além de novas condições de contorno. Selegheim (2011) desenvolveu o estudo da propagação de ondas em dutos de transporte de fluidos através da análise de atenuação acústica e propagação de velocidade. Fontes *et al.* (2011) fizeram um trabalho prático para determinar a fadiga em tubulações submetidas ao fenômeno transiente. Bratland (2013) escreve o segundo livro “Pipe Flow 2: Multi-phase Flow Assurance” no qual aborda a determinação do regime do fluxo, análise de fluxos que tem presença de líquido e gás, e as soluções pelos métodos numéricos, entre outros.

Dentre os trabalhos desenvolvidos pelo GDPE, Pedroso & Barbosa (1993) desenvolveram um programa computacional baseado no Método das Características denominado TRANS, o qual calculava as pressões induzidas pela propagação de ondas em condutos forçados. Pedroso *et al.* (1994) produzam uma nova versão do programa TRANS-II fazendo uma análise de transientes em circuitos de reatores nucleares. Neri e Pedroso (1999) desenvolveram o programa RETRANS com novas condições de contorno. Nascimento (2002) desenvolveu o programa chamado TRANSPETRO - 1D, que permite identificar e caracterizar os efeitos transientes causadas pela pressão das ondas com várias condições de contorno. Neves (2004) apresentou um estudo de vibrações em fluido-estrutura que examinava as frequências de ressonância em problemas de vazão com alta e baixa velocidade e propôs uma solução para encontrar o campo de pressão bidimensional na válvula comparando os resultados com as soluções apresentadas na literatura utilizando o método de características.

2 FORMULAÇÃO TEÓRICA DE TRANSIENTES DE PRESSÃO E VELOCIDADE EM DUTOS ELÁSTICOS

O fenômeno transiente num conduto forçado é tratado como um problema unidimensional de parâmetros distribuídos que cumprem determinadas hipóteses e simplificações (Santos, 2010). O modelo matemático inercial elástico considera a elasticidade do fluido e do duto. Esse tipo de fenômeno é regido por equações diferenciais parciais hiperbólicas não-lineares, as quais apresentam soluções numéricas no domínio do tempo ou da frequência.

2.1 Hipóteses e simplificações

As equações da lei da quantidade de movimento e da conservação da massa admitem as seguintes simplificações e hipóteses (Streeter e Wylie, 1967):

- Escoamento monofásico, homogêneo e ligeiramente compressível;
- Escoamento unidimensional (1-D) com um perfil pseudo-uniforme de cada seção transversal do duto;
- São excluídos os efeitos termodinâmicos, uma vez que a variação da temperatura é desprezível comparada com as variações de pressão e vazão;
- O material do duto tem um comportamento linear;
- A interação fluido-estrutura é negligenciada;
- Não considera o fenômeno de degasagem (ar dissolvido no fluido);
- O duto tem área de seção transversal constante e sem escoamento transversal.

2.2 Equações fundamentais

Equação de continuidade, onde se estabelece que a conservação da massa deve se manter em qualquer campo do fluxo sem importar que tipos de simplificações sejam efetuadas. Eq. (1).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

Equação de quantidade de movimento, onde se considera o somatório de todas as forças que agem na massa de um fluido em uma direção e é igual ao produto desta massa pela aceleração. Eq. (2).

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho \vec{V} \nabla(\vec{V}) + \nabla(P) - \mu \left[\Delta \vec{V} + \frac{1}{3} \nabla(DIV(\vec{V})) \right] = 0 \quad (2)$$

Equação de estado, a qual é aplicável para um fluido denso como a água (considerado incompressível), mas por hipótese é suposto levemente compressível, em particular quando

são fenômenos como o ar dissolvido na água (degasagem) e elasticidade da parede do tubo (Neri e Pedroso, 1999). Eq. (3).

$$f(P, \rho) = \text{cte} \leftrightarrow \tilde{P} = \tilde{\rho} \cdot a^2 (\text{linearizada}) \therefore a^2 = \frac{k}{\rho} \quad (3)$$

Onde, ρ : Densidade do fluido; $\vec{V}$: Vetor de velocidade de escoamento $\tilde{P}$: Pressão variável; $\tilde{\rho}$: Densidade variável do fluido; k : Módulo de expansão volumétrica do fluido; a : Celeridade da onda transiente de pressão; P : Pressão do fluido; V : Velocidade do fluido.

As três equações determinam a pressão (P), a velocidade (V) e a densidade do fluido (ρ), para um determinado ponto no duto. Assim se tem um sistema matematicamente determinado com solução real. Devido se tratar de um fluxo unidimensional.

Após algumas simplificações e operações algébricas das Eqs. (1), (2) e (3), obtém-se as equações diferenciais quase-lineares para escoamentos em regime transiente em circuitos tubulares unidimensionais (com $L \gg D$, ondas planas).

A Equação (4) é a Equação de continuidade para dutos circulares.

$$V \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

A Equação (5) é a Equação de quantidade de movimento para dutos circulares.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \cdot \sin(\alpha) + \frac{f \cdot V \cdot |V|}{2D} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

Onde, a : representa a celeridade da onda transiente de pressão e velocidade e f o fator de atrito para dutos circulares.

$$a = \frac{\sqrt{k/\rho}}{\sqrt{1 + (k/E)(D/e)C}} \quad (6)$$

$$f(V, D, \nu, \varepsilon) = \frac{0.25}{\left(\log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{\text{Re}(V, D, \rho, \mu_f)^{0.9}} \right) \right)^2} \quad (7)$$

onde, μ_f : Viscosidade cinemática do fluido; E : Módulo de elasticidade do material; D : Diâmetro interno do duto; e : Espessura da parede do duto; C : Constante adimensional função das propriedades elásticas do tubo (dimensões de seção transversal, condições de ancoragem da tubulação, coeficiente de Poisson), ε : Rugosidade relativa do material, Re : Número de Reynolds; α : Ângulo de inclinação do duto.

3 MÉTODO DE SOLUÇÃO

A solução para as equações que regem o fenômeno transiente vai ser obtida mediante a utilização do Método das Características. As equações diferenciais parciais são transformadas em equações diferenciais totais e solucionadas pela técnica das diferenças finitas de primeira

ordem utilizando o método de intervalos de tempos especificados (Streeter e Wylie, 1967). Uma importante vantagem deste método é sua ampla flexibilidade para a introdução das condições de contorno, as quais também vão ser tratadas neste trabalho.

3.1 Método das características

As Equações (4) e (5) são as equações diferenciais parciais, com duas variáveis dependentes, pressão e velocidade. Para se fazer o desenvolvimento do Método das Características escreve-se as equações da continuidade e da quantidade do movimento, respectivamente, como:

$$L_1 = V \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

$$L_2 = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \sin(\alpha) + \frac{fV|V|}{2D} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

A combinação linear entre a Eq. (8) e a Eq. (9), através do multiplicador λ , resulta:

$$L_1 + \lambda L_2 = \lambda \left[\frac{\partial P}{\partial x} \left(V + \frac{1}{\lambda \rho} \right) + \frac{\partial P}{\partial t} \right] + \frac{\partial V}{\partial t} (V + \lambda \rho a^2) + g \sin(\alpha) + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (10)$$

Logo se conclui que:

$$\lambda = \pm \frac{1}{\rho a} \quad (11)$$

$$\frac{dx}{dt} = V \pm a \quad (12)$$

Ao substituir-se a Eq. (11) e (12) na Eq. (10) e após um rearranjo, as equações características tomam a seguinte forma:

$$a^+ = \begin{cases} \frac{1}{\rho a} \frac{dP}{dt} + \frac{dV}{dt} + g \sin(\alpha) + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = V + a \end{cases} \quad (13)$$

$$\frac{dx}{dt} = V + a \quad (14)$$

$$a^- = \begin{cases} -\frac{1}{\rho a} \frac{dP}{dt} + \frac{dV}{dt} + g \sin(\alpha) + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$\frac{dx}{dt} = V - a \quad (16)$$

3.2 Método das diferenças finitas

Para solução das equações que regem o problema, se utilizam diferentes técnicas. Este trabalho usa o método das diferenças finitas. Inicialmente se apresenta o desenvolvimento do método no plano (x-t). Na Fig. 1, as curvas características a^+ e a^- são conhecidas. Supõem-se também conhecidas as condições (P, V, x, t) nos pontos PR e PS. Assim, o problema se resume em conhecer as condições desconhecidas (P,V) em PP, ou seja, numa posição media entre esses pontos após um determinado passo de tempo Δt .

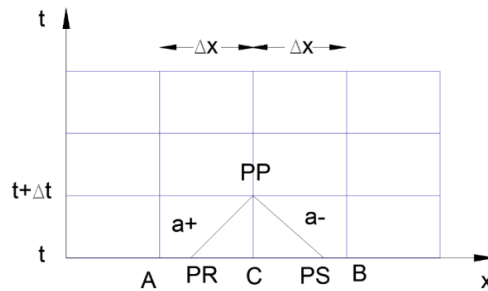


Figura 1. Método das diferenças finitas (Nascimento, 2002)

Linha característica a^+

$$V_{PP} - V_{PR} - \frac{1}{\rho a} (P_{PP} - P_{PR}) + g(t_{PP} - t_{PR}) \sin(\alpha) + \frac{f}{2D} V_{PR} |V_{PR}| (t_{PP} - t_{PR}) = 0 \quad (17)$$

Linha característica a^-

$$V_{PP} - V_{PS} - \frac{1}{\rho a} (P_{PP} - P_{PS}) + g(t_{PP} - t_{PS}) \sin(\alpha) + \frac{f}{2D} V_{PS} |V_{PS}| (t_{PP} - t_{PS}) = 0 \quad (18)$$

Das Equações (17) e (18) resultam as seguintes expressões de pressão e de velocidade no ponto PP:

$$V_{PP} = \frac{1}{2} \left[V_{PR} + V_{PS} + \frac{1}{\rho a} (P_{PR} - P_{PS}) - 2g\Delta t \sin(\alpha) - \frac{f\Delta t}{2D} (V_{PR} |V_{PR}| + V_{PS} |V_{PS}|) \right] \quad (19)$$

$$P_{PP} = \frac{1}{2} \left[P_{PR} + P_{PS} + (\rho a (V_{PR} - V_{PS})) - \frac{f\Delta t}{2D} (V_{PR} |V_{PR}| - V_{PS} |V_{PS}|) \right] \quad (20)$$

3.3 Método das Características de Intervalos de tempo especificados

A solução temporal utiliza o Método dos Intervalos de Tempo especificados (Streeter e Wylie, 1967). Antes de iniciar o regime de escoamento transiente no sistema, este apresenta um regime de escoamento permanente, razão pela qual é possível conhecer as condições de pressão e velocidade no ponto C mediante interpolação linear entre os pontos A e B. Depois de se fazer um desenvolvimento matemático, se obtém as expressões para determinar o valor da magnitude e da pressão nos pontos PR e PS.

$$V_{PR} = V_C - (\theta a (V_C - V_A)) \quad (21)$$

$$V_{PS} = V_C - (\theta a (V_C - V_B)) \quad (22)$$

$$P_{PR} = P_C - (\theta a (P_C - P_A)) \quad (23)$$

$$P_{PS} = P_C - (\theta a (P_C - P_B)) \quad (24)$$

onde, θ : Taxa de variação da malha de pontos.

$$\theta = \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (25)$$

A estabilidade e convergência do método são asseguradas impondo-se uma condição no tempo, Eq. (26). Para modelar sistemas complexos (com dois ou mais dutos) o incremento do tempo (Δt) deve ser o mesmo para todos onde o objetivo é ter distancias mínimas entre as secções a fim de poder capturar no tempo a evolução do fenômeno transiente.

$$\Delta t = \frac{L_j}{(V_j + a_j) E_j} \quad (26)$$

onde, L_j : Comprimento do duto j ; E_j : Módulo de elasticidade do material; V_j : Velocidade do escoamento no duto j ; a_j : Celeridade da onda de propagação no meio no duto j .

3.4 Condições de contorno

A partir da Eq. (17) e (18) podem ser obtidas as equações de contorno correspondentes a uma dada condição de contorno. Utiliza-se então a técnica de diferenças finitas nas duas linhas características para os contornos apresentadas na Fig. 2. As expressões das condições de contorno permitem a solução numérica do problema transiente (Nascimento, 2002).

A pressão e velocidade nos pontos C, PR e PS são conhecidas inicialmente no instante t_0 (regime permanente). Adota-se uma notação de índices duplos ii , número do tubo e seção do tubo, respectivamente.

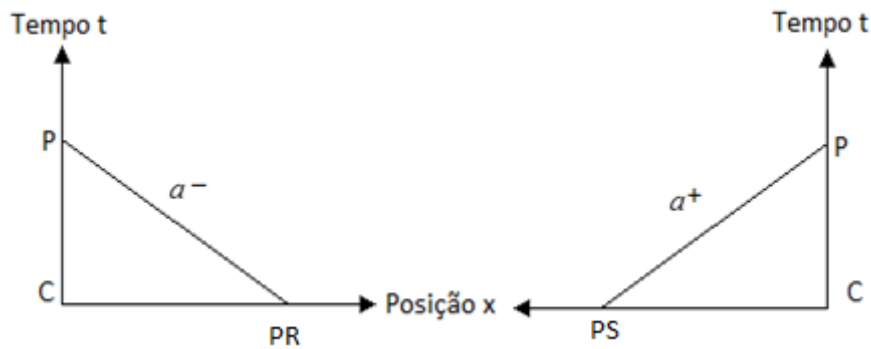


Figura 2. Linhas Características nos contornos

Para uma condição de contorno a montante (à esquerda), na seção 0 do tubo j , a Eq. (19) pode ser apresentada como:

$$V_{PPj,0} = V_{PSj} + \frac{1}{\rho a_j} (P_{PSj,0} - P_{PSj}) - g \Delta t \sin(\alpha_j) - \frac{f_j}{2D_j} V_{PSj} |V_{PSj}| \Delta t \quad (27)$$

Reescrevendo a Eq. (27), separasse a mesma em dois termos, obtendo-se as seguintes expressões.

$$C_1 = V_{PSj} - \frac{1}{\rho a_j} P_{PSj} - g \Delta t \sin(\alpha_j) - \frac{f_j}{2D_j} V_{PSj} |V_{PSj}| \Delta t \quad (28)$$

$$C_2 = \frac{1}{\rho a_j} \quad (29)$$

Assim da Eq. (27) se tem a seguinte expressão:

$$V_{PPj,0} = C_1 + C_2 P_{PPj,0} \quad (30)$$

C_1 e C_2 são funções ou quantidades conhecidas e constantes durante cada passo de tempo.

Para uma condição de contorno a jusante (à direita), na seção N do tubo j, a Eq. (19) se torna:

$$V_{PPj,N} = V_{PRj} + \frac{1}{\rho a_j} (P_{PRj,N} - P_{PRj}) - g \Delta t \sin(\alpha_j) - \frac{f_j}{2D_j} V_{PRj} |V_{PRj}| \Delta t \quad (31)$$

Reescrevendo a Eq. (31), separando a mesma em dois termos, obtendo-se as seguintes expressões.

$$C_3 = V_{PRj} + \frac{1}{\rho a_j} P_{PSj} - g \Delta t \sin(\alpha_j) - \frac{f_j}{2D_j} V_{PRj} |V_{PRj}| \Delta t \quad (32)$$

$$C_4 = \frac{1}{\rho a_j} \quad (33)$$

Assim, da Equação (31) se chega à seguinte expressão:

$$V_{PPj,N} = C_3 + C_4 P_{PPj,N} \quad (34)$$

C_3 e C_4 são funções ou quantidades conhecidas e constantes durante cada passo de tempo.

Para qualquer extremidade do duto só uma das Eq. (30) ou (34) estará disponível para as duas variáveis V_{PP} ou P_{PP} . No caso do contorno à esquerda (montante) a Eq. (30) é válida, mas no caso do contorno à direita (jusante) a Eq. (34) que será válida. Para se solucionar as Eqs. (30) e (34) torna-se necessário se conhecer uma das variáveis (V e P) no ponto PP ou uma relação entre elas. Para as condições de contorno entre dutos se tem as seguintes expressões:

$$V_{PPj,N} = C_3 - C_4 P_{PPj,N} \quad (35)$$

$$V_{PP(j+1),0} = C_1 + C_2 P_{PP(j+1),0} \quad (36)$$

Os termos C_1 e C_2 estão associados ao duto j+1, enquanto os termos C_3 e C_4 estão associados ao duto j.

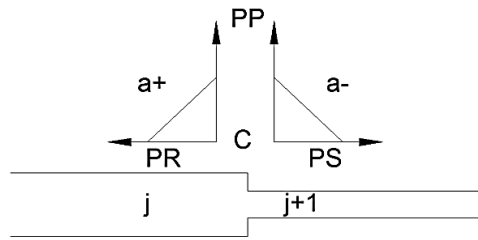


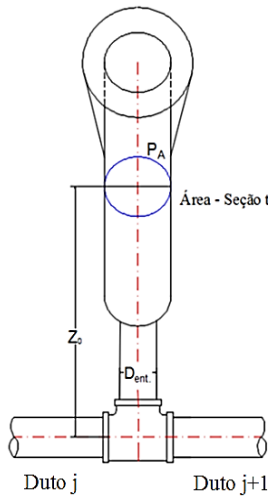
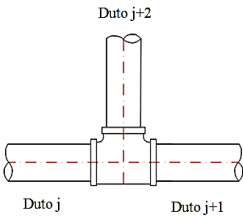
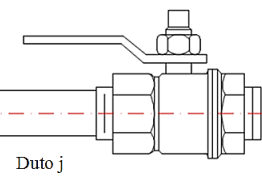
Figura 3. Condição de contorno entre tubos (Nascimento, 2002)

A Figura 3 apresenta as condições entre dutos, no qual as Eq. (35) e (36) são utilizadas para solucionar o problema nas quatro variáveis desconhecidas ($P_{PPj,N}$, $V_{PPj,N}$, $P_{PP(j+1),0}$ e $V_{PP(j+1),0}$).

Em continuação apresenta-se a Tabela 1 com as condições de contorno utilizadas neste trabalho.

Tabela 1. Condições de contorno utilizadas

Condição de contorno	Ilustração gráfica	Equações de pressão	Equações de velocidade
Reservatório o nível fixo - Início do sistema		$P_{PPj,0} = P_0$	$V_{PPj,0} = C_1 + C_2 P_0$
Mudança de diâmetro – Condição entre tubos		$P_{PP(j+1),0} = \frac{A_j V_{PPj,N} - C_1 A_{j+1}}{C_2 A_{j+1}}$ $P_{PPj,N} = \frac{C_3 A_j - C_1 A_{j+1}}{C_2 A_{j+1} + C_4 A_j}$	$V_{PP(j+1),0} = C_1 + C_2 \frac{A_j V_{PPj,N} - C_1 A_{j+1}}{C_2 A_{j+1}}$ $V_{PPj,N} = C_3 - C_4 \frac{C_3 A_j - C_1 A_{j+1}}{C_2 A_{j+1} + C_4 A_j}$
Perda singular – Condição entre tubos		$P_{PP(j+1),0} = \frac{V_{PP(j+1),0} - C_1}{C_2}$	$V_{PP(j+1),0} = \frac{V_{PPj,N} \cdot A_j}{A_{j+1}}$
Válvula na linha do sistema – Condição entre tubos		$P_{PP(j+1),0} = \frac{V_{PP(j+1),0} - C_1}{C_2}$ $P_{PPj,N} = \frac{C_3 - V_{PPj,N}}{C_4}$	$V_{PP(j+1),0} = \frac{A_j}{A_{j+1}} V_{PPj,N}$

Chaminé de equilíbrio – Condição entre tubos		$P_P = \frac{\sqrt{\psi} - (1 + (C_7 C_6) - (2 C_8 C_5 C_6))}{2 C_8 C_6^2}$ $P_P = \frac{\sqrt{\psi} + (1 + (C_7 C_6) + (2 C_8 C_5 C_6))}{2 C_8 C_6^2}$ $P_P = \frac{P_C + (\bar{z}_0 \rho g) + C_7 (C_5 + V_{ent})}{1 + C_7 C_6}$	$V_{PPj,N} = C_3 - C_4 P_P$ $V_{PP(j+1),0} = C_1 + C_2 P_P$
Conexão em Galho (Ramificação) – Condição entre tubos		$P_{PPj,N} = \frac{C_3 A_j - C_1 A_{j+1} - C_5 A_{j+2}}{C_4 A_j + C_2 A_{j+1} + C_6 A_{j+2}}$ $P_{PPj,N} = P_{PPj+1,0} = P_{PPj+2,0}$	$V_{PPj,N} = C_3 - C_4 P_{PPj,N}$ $V_{PPj+1,0} = C_1 + C_2 P_{PPj+1,0}$ $V_{PPj+2,0} = C_5 + C_6 P_{PPj+2,0}$
Válvula a Jusante - Final do sistema		$P_N = \frac{V_N^2 P_0}{V_0^2 \tau^2}$	$V_{PPj,N} = C_3 + C_4 P_{PPj,N}$

4 ASPECTOS COMPUTACIONAIS

O programa TRANSPETRO 1-D foi desenvolvido com a base da teoria descrita no presente estudo além das contribuições apresentada por Nascimento (2002). Destaca-se que, o código foi escrito em linguagem C++, com a utilização do programa Visual C++ 6.0, o qual permite a criação de recursos gráficos que facilitam a interação programa-usuário.

4.1 Principais conceitos do visual C++6.0

O Visual C++ é um compilador que permite a criação de projetos de programas que incluem diversos arquivos simplesmente estruturados como o MFC (Microsoft Foundation Classes), equivalentes ao OWL (Object Window Library) Borland. Essas classes fornecem a programação do Windows sem usar a API do Windows diretamente porque as bibliotecas do Windows são agrupadas em classes C++.

A linguagem de programação Visual C++ está subdividida em duas partes principais, classes e funções membro, esta última é uma sub-rotina orientada a objetos, a qual é responsável por uma única função que pode, por sua vez, chamar funções membro da mesma classe. Na Fig. 4 se apresenta a tela de programação do programa Visual C++6.0.

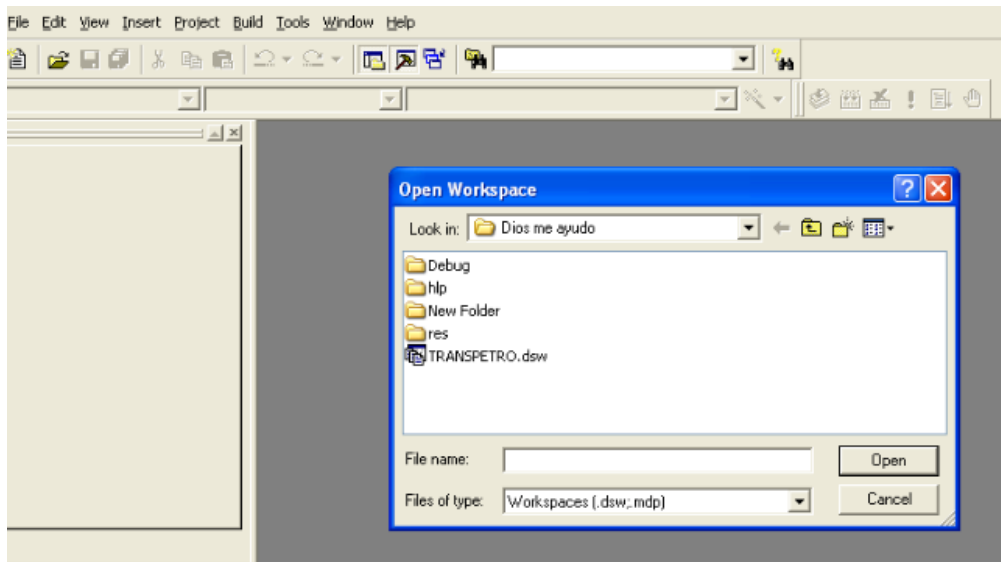


Figura 4. Tela de programação do programa Visual C++ 6.0

4.2 Desenvolvimento do programa TRANSPETRO-1D

As primeiras rotinas computacionais foram apresentadas pelo Streeter e Wylie (1967). O Grupo de Dinâmica e Fluido Estrutura, baseado nestas rotinas, desenvolveu novos programas na linguagem computacional FORTRAN90: primeiro o TRANS (Pedroso et al., 1993), TRANS-II e TRANS-III (Pedroso et al., 1994), RETRANS (Neri e Pedroso, 1999) e TRANSPETRO-1D (Nascimento, 2002) em linguagem de programação Visual C++.

A Figura 5 ilustra uma tela típica de saída de resultados do programa TRANSPETRO-1D

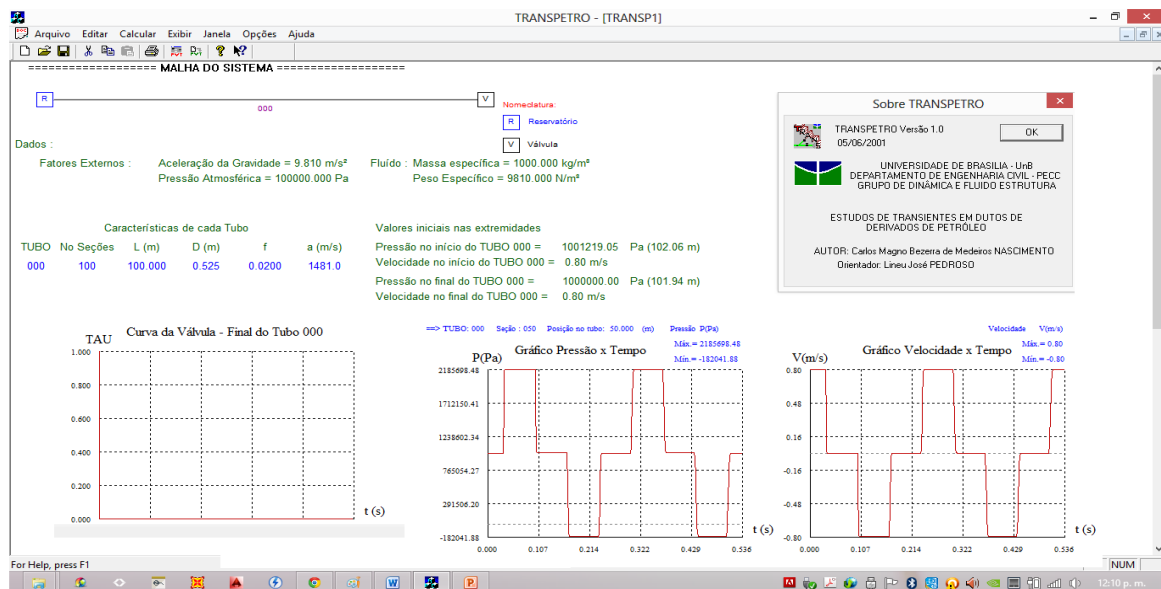


Figura 5. Tela de exibição de TRANSPETRO-1D e curvas de pressão e velocidade em função do tempo (modificado – Nascimento, 2002)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CASO I – Bancada Claudia

Esta bancada reproduz um circuito simplificado de um Reator PWR, que é descrito na literatura técnica (Pedroso, 1994b), onde os resultados são também aqui explorados para qualificar o programa TRANSPETRO-1D. Esta bancada é representada por um circuito tubular com cerca de 22 m de tubo de aço fundido com diâmetro interno de 0.146 m. Ao longo da tubulação foram distribuídos captors de pressão, extensômetros, medidores de vazão entre outros. No ensaio experimental mantiveram-se todas as válvulas abertas com a exceção da A-R que se fecha durante o ensaio, foram computadas também as perdas de pressão localizadas.

Nas Figuras (6) e (7) se mostra a representação, em duas diferentes vistas, o sistema a ser analisado.

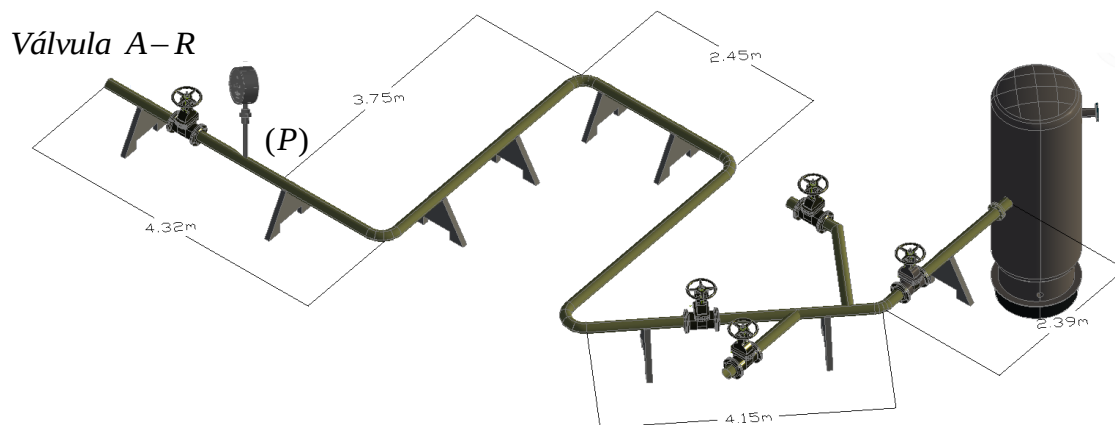


Figura 6. Representação isométrica do sistema hidráulico da bancada Claudia

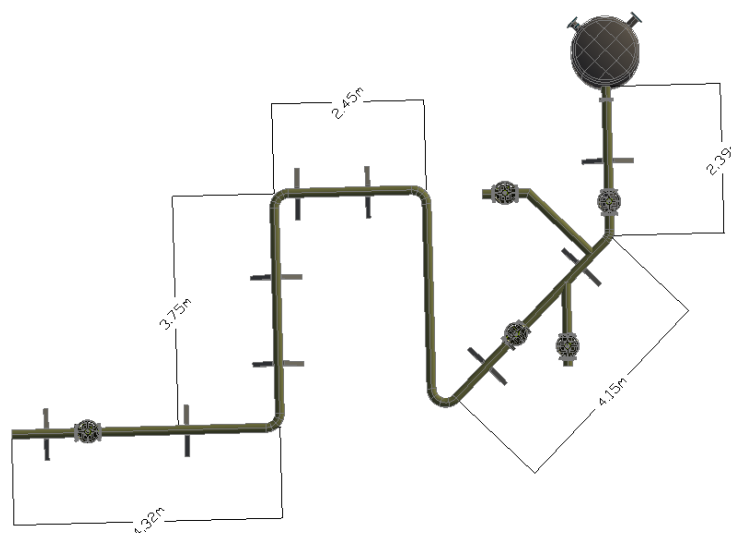


Figura 7. Representação em planta do sistema hidráulico da bancada Claudia

A curva aproximada de fechamento da válvula é mostrada na Fig. (8), e foi inserida no programa TRANSPETRO-1D utilizando-se a opção função pré-definida.

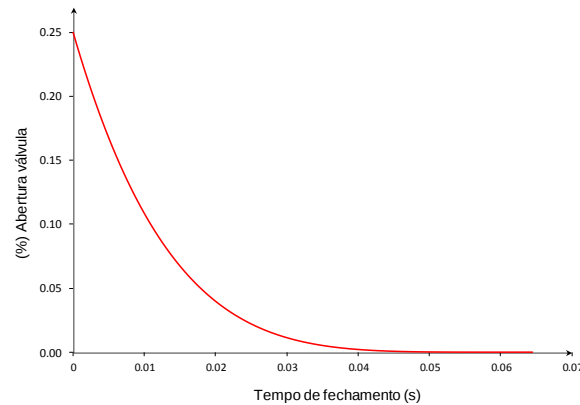


Figura 8. Curva de fechamento da válvula (modificado – Nascimento, 2002)

Para a simulação no programa TRANSPETRO-1D, dividiu-se o sistema em 9 tubos, cada um deles inicia e termina onde se apresenta um dispositivo ou singularidade no circuito. No programa foram atribuídos os seguintes dados: $V_0 = 12,5$ m/s, $P_0 = 2,8$ Mpa, $\rho = 1000$ kg/m³, $a = 835$ m/s, $P_{atm} = 100$ kPa, $g = 9,81$ m/s².

Nas Figuras (9) e (10) se exibem as ondas transientes de pressão experimental e numérica, respectivamente, ou seja, os resultados que foram obtidos na Bancada Claudia e o programa TRANSPETRO-1D para o ponto P.

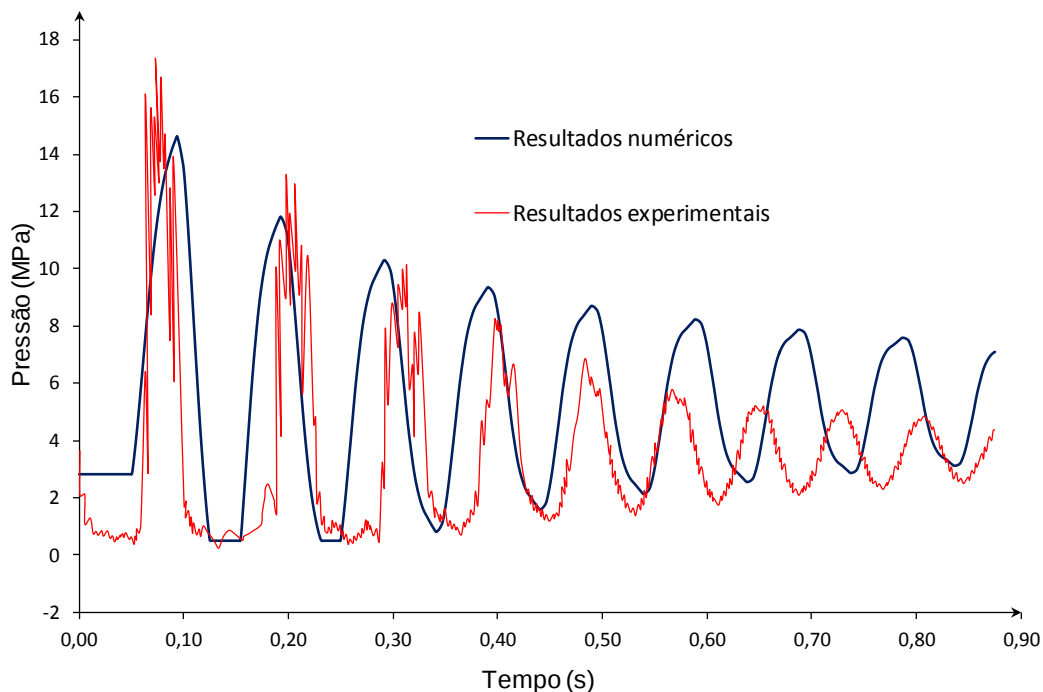


Figura 9. Evolução de pressão experimental na bancada Claudia e numérica (TRANSPETRO-1D) no captor de pressão (P)

Comparando as ondas de pressão apresentadas nas Fig. (9) podem se fazer as seguintes constatações:

- As curvas apresentam certa similaridade nas amplitudes, larguras e quantidade dos picos nos primeiros ciclos.
- A maior similaridade entre as formas das ondas se observa a partir do quarto pico.
- As diferenças observadas nos resultados tal como nas amplitudes, período e forma dos ciclos, são consequências da falta de implementação no programa dos fenômenos mais complexos presentes no sistema, tais como a cavitação, degasagem, dupla-fase, etc., fatores que atenuam as ondas e alteram a celeridade.
- As altas frequências e a saturação da resposta no gráfico das pressões observadas nos primeiros ciclos do transiente experimental, não são reproduzidos pelo programa.

5.2 CASO II– Usina hidroelétrica

Este é um exemplo de uma usina hidroelétrica, onde se apresenta um importante sistema tubular com múltiplos componentes, o sistema tem as seguintes componentes: uma estrutura de captação, um conduto forçado com várias inclinações, uma chaminé de equilíbrio, uma mudança de diâmetro, uma bifurcação, e no final do sistema uma válvula. Nas Figs. (10) e (11) se ilustram graficamente o sistema, a cor vermelha representa a linha principal simulada no programa TRANSPETRO-1D. Para esta simulação, dividiu-se o sistema em 9 tubos, cada um deles inicia e termina onde se apresenta um dispositivo ou uma singularidade. No programa foram atribuídos os seguintes dados: $V_0 = 1.95$ m/s, $P_0 = 3.8$ Mpa, $\rho = 1000$ kg/m³, $a = 1400$ m/s, $P_{atm} = 100$ kPa, $g = 9.81$ m/s², $f = 0.02$, $D_1 = 5.5$ m, $D_2 = 3.3$ m.

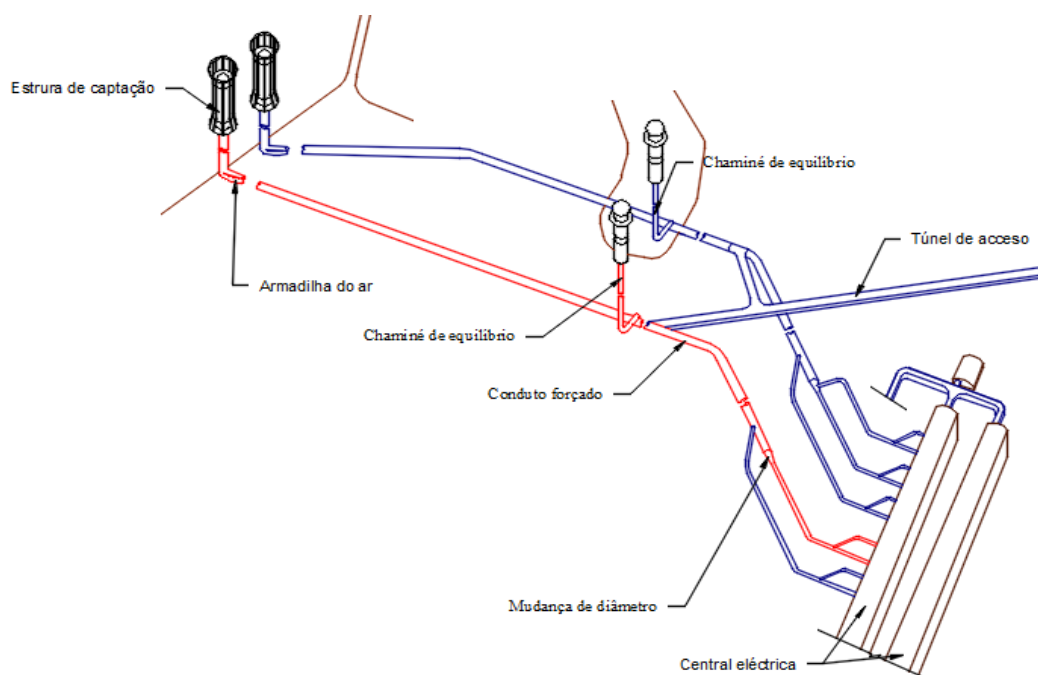


Figura 10. Representação do circuito de uma usina hidrelétrica

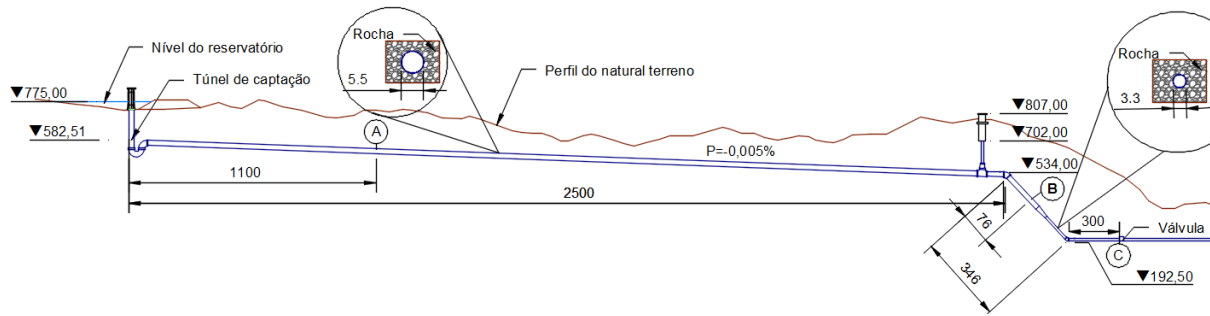


Figura 11. Perfil da linha hidráulica simulada

As Figuras (12) e (13) exibem respectivamente as ondas de pressão e velocidade. Esses resultados que foram obtidos com o programa TRANSPETRO-1D para os pontos A, B e C com um fechamento súbito na válvula da adutora apresentada anteriormente, no ponto C.

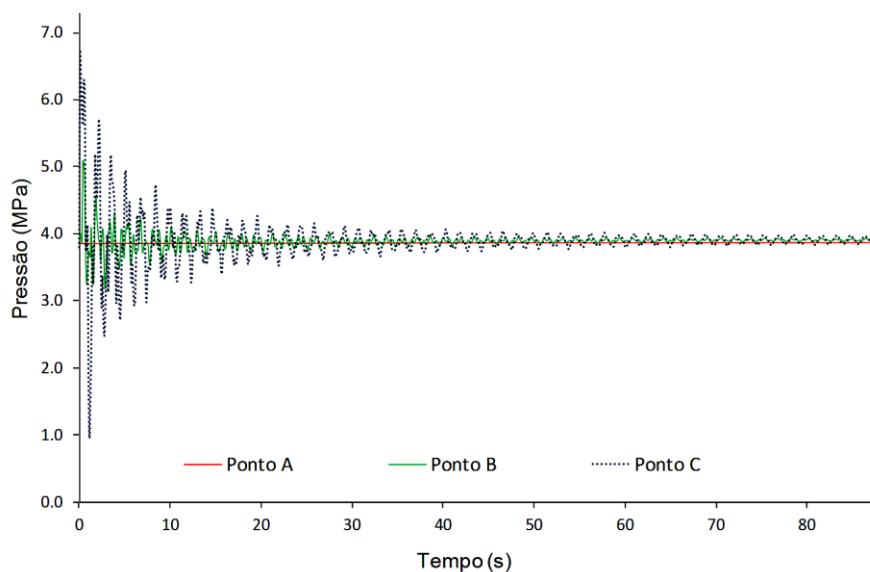


Figura 12. Evolução da pressão para os pontos A, B e C

A partir da Figura (12) podem-se fazer as seguintes observações para as ondas de pressão:

- No ponto A não se apresenta a sobrepressão gerada pelo fechamento súbito da válvula em (C) comprovando a eficiência da chaminé de equilíbrio,
- Observa-se que nos pontos B e C há uma sobrepressão de maior amplitude de oscilação. Fato esperado já que estes pontos se localizam antes da chaminé de equilíbrio.
- A diferença entre as amplitudes das ondas apresentadas para os pontos B e C é produzida basicamente pela inclinação, e perdas singulares introduzidas pelas mudanças de direção e de diâmetro neste trecho.

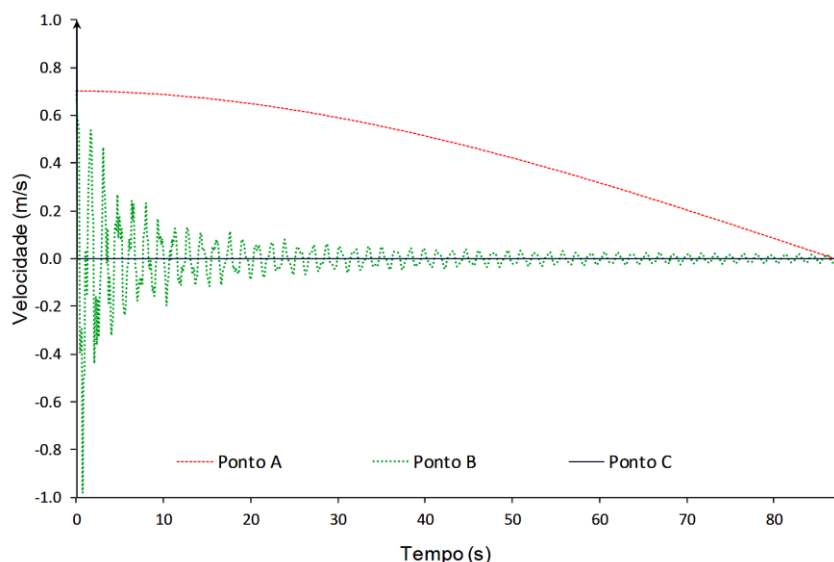


Figura 13. Evolução da velocidade para os pontos A, B e C

Da Figura (13) podem-se fazer as seguintes observações para a onda transiente de velocidade:

- O ponto C não apresenta variação na onda de velocidade. Este mostra um valor nulo, resultado já esperado no ponto onde se gera o fechamento súbito.
- No ponto B a onda oscila em torno da velocidade nula. Estas oscilações são de pequena amplitude e curto período.
- No ponto A, após a chaminé de equilíbrio, a onda de velocidade tem um comportamento oscilatório de longo período, decrescendo continuamente na janela de tempo observada, sugerindo um movimento de massa entre o reservatório e a chaminé.

Os resultados das simulações mostradas para a adutora deste caso, por conter elementos adicionais (chaminé de equilíbrio, inclinação, ramificação e mudança de diâmetro) apresentam respostas mais complexas, que ainda não foram suficientemente analisadas e precisam ser avaliadas com resultados numéricos e/ou experimentais, e interpretados de forma mais conclusivas.

6 CONCLUSÕES

Os resultados numéricos obtidos pelo programa TRANSPETRO-1D permitem representar de forma adequada a evolução da pressão de um fenômeno transiente, conforme os resultados obtidos na comparação com os resultados experimentais. Para ciclos longos, fatores como a degasagem provocam alterações que o programa não consegue representar.

Os resultados obtidos na simulação da bancada Claudia, reproduzem os resultados experimentais com uma boa aproximação, mas o programa tem as limitações que não permite

representar os efeitos de degasagem e cavitação, os quais se encontram presentes no experimento dessa bancada de ensaios.

Os resultados obtidos na simulação da usina hidroelétrica estão dentre os resultados esperados, no entanto estes precisam ser avaliados com resultados experimentais ou resultados numéricos obtidos através de modelações em softwares comerciais.

Finalmente, este trabalho apresenta alguns resultados interessantes para o setor de tecnologia de dutos e adutoras, qualificando o programa TRANSPETRO-1D, como uma ferramenta adequada para análise do fenômeno transiente neste domínio de problemas.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ, CAPES e à Universidade de Brasília através do Grupo de Dinâmica e Fluido-Estrutura pelo apoio e incentivo à estas pesquisas.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

Allievi, L., 1903. Teoría del colpo d'ariete. *Anais do collegio degli ingegneri ed architetti. milan.*

Andrzejewski, et. al., 2009. *Avaliações numéricas de chaminés de equilíbrio: subsídios para projetos de circuitos de geração.* Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná.

Bratland, O., 2009. Pipe flow 1: single-phase flow assurance. Fonte: <http://www.drbratland.com/download-two-free-books-on-flow-assurance/>.

Bratland, O., 2013. Pipe flow 2: multi-phase flow assurance. Fonte: <http://www.drbratland.com/download-two-free-books-on-flow-assurance/>.

Brunone, B., 2000. Velocity profiles and un-steady pipe friction in transient flow. *Journal Resources Planning and Management (asce)*. pages: 236-244.

Fontes, A. M., Lima, R. F., Bezerra, L. M., 2011. Determinação prática de fadiga em tubulação sob transiente fluído. in: *xxxii Iberian-Latin Congresso Computational Methods in Engineering (cilamce – xxxii)*.

Izquierdo, J., Iglesias, P. L., 2002. Mathematical modeling of hydraulic transients in simple systems. *Mathematical and Computer Modeling* 35, pages 801-812.

Izquierdo, J., Iglesias, P. L., 2004. Mathematical modeling of hydraulic transients in complex systems. *Mathematical and Computer Modeling* 39 (4-5), pages 529-540.

Joukowsky, N., 1898. *On the hydraulic hammer in water supply pipes.* Memoires de l'académie imperiale des sciences de st.-petersbourg.

Magzoub, E., Kwame, A., 2007. *Hydraulic transient in a pipeline. using computer model to calculate and simulate transient.* Master Thesis. Lund university.

Nascimento, C. M. B., 2002. *Estudo de transientes em dutos derivados de petróleo.* Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília.

Neves, C.E.V. (2004). “estudos analíticos e numéricos de transientes e vibrações livres em adutoras de barragens”. Relatório Técnico de IC - Universidade de Brasília, GDFE.

- Neri, L., Pedroso, L. J., 1999. *Aspectos numéricos na avaliação de escoamentos transientes em tubulações*. Relatório Técnico de Pesquisa - Universidade de Brasília, GDFE, 1999.
- Pedroso, L. J., Barbosa, A. N., 1993. Ondas transientes em circuitos tubulares pressurizados: reflexões e amortecimentos. *xiv Cilamce; IPT-SP*, pages: 812-821.
- Pedroso, L. J., Macedo, P., Barbosa, A., 1993. Calculations of the loads induced by pressure wave flow in nuclear reactor due to transients. *12th smirt*. Seccion E11/ pages 1-6.
- Pedroso, L. J., 1994b. *Análise e discussões sobre os resultados experimentais da bancada de claudia*. [Note Technique DRE/STRE/LMA 85/685 (BUCLE CLAUDIA – essais d’un clapet a battant bouvier dn150) – CEA – CEN/CADARUCHE – FRANCE 07/85] – Nota técnica de pesquisa, UNB/FT, ENC - GDFE.
- Pedroso, L. J., Brito, V. J. L., Barbosa, A. N., 1994. Trans – a computer code for the analysis of transients in nuclear reactors piping networks”. in: *V General Conference on Nuclear Energy*, Rio de Janeiro.
- Pires, L. F. G., Barreto, C. V., Ladeia, R. C. C., 2004. Análise de transientes devido ao fechamento rápido de válvulas em dutos curtos. in: *III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, 2004, Belém. Anais do III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.
- Santos, F. O., 2010. *Simulação de escoamentos transientes em dutos de transporte de líquido*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Seleglim P. J., 2011. *Metodologia de caracterização da propagação acústica em tubulações de transporte de fluidos bifásicos gás-líquido*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.
- Silvov, K., 2007. *Transient analysis in pipe networks*. Master Thesis. Virginia Polytechnic Institute & State University.
- Streeter, V., Wylie, E., 1967. *Fluid transients*. McGraw-Hill Company.