



ESTUDO DE TRANSIENTES HIDRÁULICOS EM CONDUTOS FORÇADOS ATRAVÉS DO MÉTODO DO GRÁFICO DE LIGAÇÕES

Msc Geraldo Lúcio Tiago Filho - EFEI, Doutorando EPUSP
Dr. José Roberto Bonilha, EPUSP
Dr. Afonso Henriques Moreira Santos, EFEI

RESUMO

O trabalho mostra a possibilidade de se utilizar o método dos "Gráficos de Junções" para simulação de escoamentos transitórios em condutos forçados. Os resultados obtidos por esse método são comparados com os fornecidos pelo método das características, aplicado em exemplos de autores consagrados, procurando assim validar o método proposto.

OBJETIVO:

Com o objetivo de estudar comportamento de uma válvula de alívio, anti-golpe de aríete, auto-operado, através de métodos de simulação, optou-se pelo o dos "Gráficos de ligações", já que o mesmo mostrou-se bastante adequado para os fins desejados. Desse modo, no andamento dos trabalhos fez-se necessário a utilização da mesma técnica para simular o escoamento transiente em condutos forçados. O presente trabalho tem como objetivo mostrar a validade do método para o fenômeno em questão.

EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS DE ESCOAMENTO TRANSITÓRIO EM CONDUTOS

Aplicando as equações da quantidade do movimento e da continuidade em um volume de controle no escoamento de um fluido no interior de um trecho de tubo e considerando: as perdas por atrito, os efeitos da rigidez volumétrica do fluido, a deformabilidade das paredes, do tubo, bem como as características geométricas diâmetro, espessura da parede, as propriedades do material, a celeridade das ondas de pressão e, por fim, desconsiderando as derivadas parciais convectivas, obtém-se as equações diferenciais que descrevem o escoamento transitório em um conduto, da seguinte forma:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gS} \frac{\partial Q}{\partial X} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + qS \frac{\partial H}{\partial X} + \frac{f}{2DS} Q|Q| = 0 \quad (2)$$

onde as variáveis independentes "t" e "X", representam respectivamente: o tempo e a distância ao longo do conduto. E as variáveis dependentes, "Q" e "H", a vazão e a carga piezométrica. As outras grandezas envolvidas são: "f" o fator de atrito, "a" a celeridade de propagação da onda de pressão, "S" a área da seção do tubo e "q" a aceleração da gravidade.

As equações (1) e (2) formam um sistema de equações diferenciais hiperbólicas cuja solução analítica não é possível. Sua solução é obtida através de método algébricos simplificados; métodos gráficos, métodos numéricos explícitos e implícitos de diferenças finitas; por elementos finitos ou pelo método das características conforme o mostrado por STREETER (1978) e CHAUDRY (1979).

Por diversos motivos, esse último método tem-se mostrado como o mais adequado ao estudo de escoamentos transitório.

Paralelamente ao desenvolvimento dos métodos numéricos, WYLIE (1964) BROW (1969) aplicaram a técnica de circuitos elétricos análogos, dando base para o uso dos conceitos de impedância e das matrizes de transferência para solução das equações diferenciais lineares. Esse conceito é aplicado para estudo de escoamento oscilatórios onde a linearização é feita em torno do ponto de operação. Na aplicação desse método as equações diferenciais do escoamento transitório, (1) e (2) assumem a forma:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = -\bar{I} \frac{\partial q}{\partial t} - \bar{R} q |q| \quad (5)$$

$$\frac{\partial q}{\partial x} = -\bar{C} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (6)$$

Onde

$h = H/H_0$ é a carga expressa por unidade (p.u.)

$q = Q/Q_0$ é a vazão expressa por unidade (p.u.)

e

$$\bar{I} = \frac{Q_0 L_0}{gH_0 S}, \quad \bar{C} = \frac{q S L_0 H_0}{a^2 Q_0}, \quad \bar{R} = \frac{f Q_0 L_0}{2g S D H_0} \quad (7)$$

são respectivamente: a inércia fluida, a capacitância fluida, e a resistência fluida expressa em p.u. H_0 e Q_0 são queda e vazão do regime permanente, tomadas como referência. L_0 , S são o comprimento e a área da seção do tubo, "a" celeridade das ondas de pressão.

Entretanto, apesar da facilidade de aplicação desse método através do uso de transformadas de Laplace, existem alguns problemas como os inerentes à linearização processada nas leis constitutivas dos parâmetros R, I e C concentrado e a não sistematização na obtenção das equações de estado, que dependem da intuição e experiência da pessoa que modela. Geralmente os modelos análogos modelados se limitam à alguns casos particulares.

Com o objetivo de superar a dificuldades. Acima, surgiu a técnica dos "gráficos de ligações" ou "bond graphs". Criada na década de 1950 por H. M. Paynter e desenvolvida em conjunto com KARNOPP e ROSEMBERG (1974) na década de 1960. Esse método baseia-se no fluxo de potência entre os componentes do sistema, proporcionando uma abordagem generalizada das equações de estado, possibilitando a interação de diferentes domínios de energia e a sistematização na obtenção das equações de estado do sistema.

ELEMENTOS BÁSICOS DOS GRÁFICOS DE LIGAÇÕES

Na técnica dos gráficos de ligações são utilizados quatro tipos de variáveis generalizadas, de forma a representar o sistema na escala do tempo. São elas:

- Variáveis de energia

esforço: genericamente representada pela letra "e", que pode ter dimensão de força ou de torque em sistemas mecânicos de translação e mecânicos rotacionais, de tensão nos elétricos e de pressão nos sistemas hidráulicos.

fluxo: genericamente representada pela letra "f", que pode ter a dimensão de velocidade no sistema mecânico, corrente no elétrico e vazão no hidráulico.

- variáveis integrais:

São as duas outras variáveis generalizadas utilizadas na obtenção das equações de estado e são definidas pelas integrais no tempo das variáveis de estado ou de potência. São elas:

momentum ou quantidade de movimento: genericamente representada pela letra "p" e definida pela integral:

$$p_p = \int e(t) dt \quad (8)$$

correspondendo à quantidade de movimento nos sistemas mecânicos, ao fluxo elétrico no sistema elétrico.

deslocamento, genericamente representada pela letra "q", definida pela integral:

$$q = \int f(t) dt \quad (9)$$

correspondendo ao deslocamento nos sistemas mecânicos, à carga elétrica nos sistemas elétricos, ao volume nos sistemas mecânicos.

A técnica dos gráficos de ligações através de uma simbologia própria, procura representar graficamente o modelo físico do sistema, de modo a proporcionar uma visualização das interações entre os vários elementos do sistema e, implicitamente, fornecer uma sistematização na modelagem matemática do sistema.

O elemento fundamental do gráfico é a ligação, representado por uma meia seta, utilizada para representar o sentido da potência que flui de elemento a elemento. Nessa meia seta são também indicadas as variáveis de energia, ou de potência, "e" e "f", devidamente indexada (Karnopp 1974)

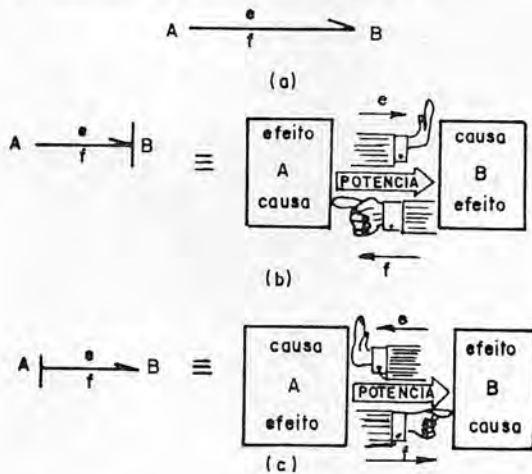


Figura 1 - (a) Ligação - Representação Gráfica, (b) e (c) Conversão da causalidade. ROSENBERG (1983)

Além do sentido da potência, o elemento de ligação também permite mostrar a relação necessária entre a causa e o efeito, isto é: a entrada e a saída, da troca de energia entre os dois elementos. Essa causalidade é indicada através da barra vertical inserida em uma das extremidades da ligação, de forma a indicar o sentido do esforço, e. Em sentido contrário, fica subtendido que está a outra variável de estado, o fluxo, f. Desta forma, fica explícito em um determinado elemento qual é a variável de entrada e qual é a de saída.

O método dos gráficos de ligações lança mão de nove elementos básicos, podendo ser eles: ATIVOS, quando suprem ou drenam energia do sistema; PASSIVOS, quando dissipam, armazenam ou induzem energia; de JUNÇÕES, que interligam os diversos elementos que constituem o sistema. A tabela 1 apresenta os símbolos desses elementos e as respectivas leis constitutivas.

APLICAÇÃO DO MÉTODO EM UMA INSTALAÇÃO HIDRÁULICA

Aplicando as regras de construção dos gráficos de ligações em um trecho de tubo ligado a um reservatório de nível constante em um extremo e uma válvula no outro, conforme mostra a figura 9(a), obtém-se o gráfico da figura 9(b). Procedendo-se a simplificação do gráfico, a indexação das junções, figura 9(c), e indicação das causalidades, de forma a atender as causalidades de caráter necessário: $E_1(t)$ e $F_1(t)$; de caráter integral: I_2 e C_3 ; de caráter restrito: junções "1" e "0". Finalmente, a de caráter arbitrário que é R_5 e R_v . Assim feito, torna-se possível identificar as duas variáveis de energia a ser obtidas a partir das equações de estado. Elas vão coincidir com as variáveis de energia obtidas a partir dos elementos passivos

Tab 1 - Elementos básicos da técnica dos Gráficos de Junções

Tipo	Elementos	Símbolo	Lei Constitutiva
ATI-VOS	Fonte de esforço Fonte de fluxo	Se $\frac{E(t)}{F(t)}$	$e = F(t)$ $f = F(t)$
PAS-SI-VOS	Resistência Capacitância Inertância	$\rightarrow R$ $\rightarrow C$ $\rightarrow I$	$e(t) = R.f(t)$ $e(t) = 1/c \int f(t) dt$ $f(t) = 1/I \int \hat{e}(t) dt$
TRANS-FORMA-DORES	Diretor Indireto (giradores)	$\xrightarrow{1} \frac{m}{TFI} \xrightarrow{2}$ $\xrightarrow{1} Gy \xrightarrow{2}$	$e_1 = m e_2$ $m f_1 = f_2$ $e_1 = \Omega f_2$ $\Omega f_1 = e_2$
JUN-ÇÕES	esforço comum	$\xrightarrow{1} \begin{matrix} 3 \\ \\ O \\ \\ 2 \end{matrix} \xrightarrow{2}$	$e_1 = e_2 = e_3$ $f_3 = f_1 - f_2$
	fluxo comum	$\xrightarrow{1} \begin{matrix} 3 \\ \\ 1 \\ \\ 2 \end{matrix} \xrightarrow{2}$	$e_3 = e_1 - e_2$ $f_1 = f_2 = f_3$

de caráter integrativo do sistema, no caso em questão: \dot{p}_2 e \dot{q}_3 .

Desta forma, de acordo com as técnicas dos gráficos de ligações, levando-se em conta as leis constitutivas dos elementos e os vínculos existentes obtém-se o seguinte sistema de

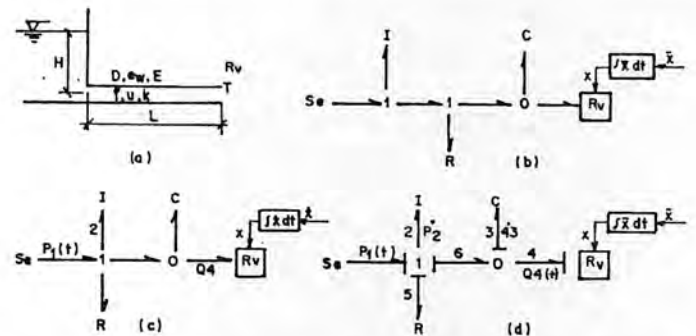


Figura 2 - Gráfico de ligações de uma instalação hidráulica.

equações de estado:

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_{p2} \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_5 & -1 \\ I_2 & C_3 \\ +1 & 0 \\ I_2 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_{p2} \\ q_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} +1 \\ -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1(t) & 0 \\ 0 & q_4(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

onde:

- I, C e R são definidos de acordo com as equações (7)
- $\dot{p}_{p2} = dp_{p2}/dt$, é a variável de energia correspondente à pressão a entrada do tubo.
- $\dot{q}_2 = dq_2/dt$, é a variável de energia correspondente à vazão no tubo.
- p_{p2} , é a variável de estado correspondente ao momentum do fluido.
- q_2 , é a variável de estado correspondente ao volume do fluido.
- $E_1(t)$, é uma das variáveis de entrada, ou de excitação, do sistema correspondente à pressão na entrada do tubo.
- $Q_4(t)$ - a outra variável de entrada, ou de excitação, do sistema correspondente à vazão na válvula R_4 .

No caso da lei constitutiva da válvula for não linear, faz-se necessário proceder a linearização da lei de manobra da mesma, de modo que, dado um determinado impulso, simula-se a variação de vazão na mesma e assim excita o sistema.

A variável de saída, ou seja, a de interesse para esse estudo, será a variação de pressão \dot{p}_{p2} . Entretanto, o método permite também obter a variação da vazão no sistema. Para isso, é necessário mandar plotar a variável q_2 .

SIMULAÇÃO DE ALGUNS CASOS

Com o objetivo de verificar a validade da aplicação do método dos gráficos de ligações na simulação de transitórios hidráulicos, são apresentados a seguir os resultados obtidos por simulação de alguns exemplos fornecidos na bibliografia STREETER (1978) e CHAUDRY (1979).

Todos os dois exemplos constituem no sistema: reservatório - tubo - válvula. Os dois primeiros elementos são modelados via a técnica dos gráficos de ligações. Para a válvula, uma simulação linear da sua lei de manobra satisfaria o princípio da superposição. Entretanto, esse método é ideal para pequenas variações em torno do ponto de operação, o que não é o caso do fechamento de uma válvula. Assim, optou-se pelo uso de uma representação não-linear para a simulação da manobra da válvula, o que resultou para o elemento da figura 3(a), o diagrama de blocos da figura 3(b).

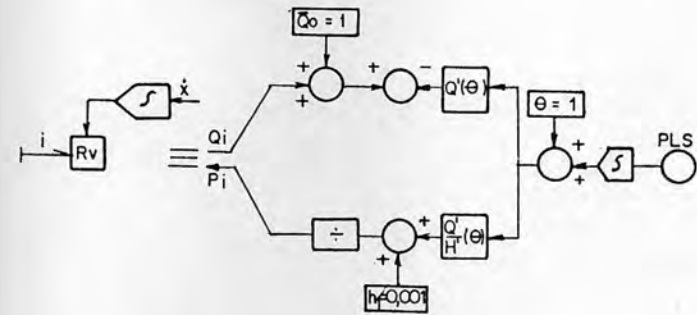


Figura 3 - Lei de manobra não linear de uma válvula (a) gráfico de ligações, (b) diagrama de bloco

onde:
 i - referem ao índice da ligação
 θ - a posição relativa de abertura do obturador
 Q - vazão do conduto (excitação da válvula)
 P_i - pressão na válvula (resposta da válvula)

O diagrama (PLS) e integrador, correspondem à velocidade e fechamento da válvula, pois

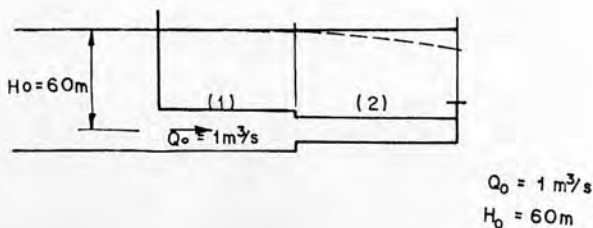
$$PLS \rightarrow \int_{t_1}^{t_f} f(\tau) dt,$$

para $f(\tau) = 0$ $p/t_1 > \tau > t_f$ e $f(\tau) = cte. p/t_i < \tau < t_f$

é uma função rampa que simula a posição do obturador da válvula durante a sua manobra.

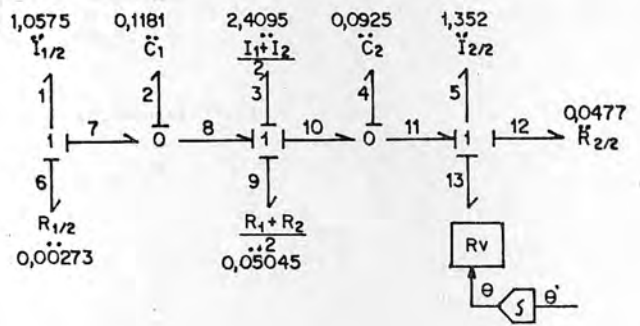
A seguir são fornecidos em forma de tabela os dados dos problemas, os respectivos valores de I, C e R calculados, bem como os resultados obtidos em forma gráfica. A curva com linhas cheias são os resultados simulados por "gráficos de ligações" e as tracejada os fornecidos pelos respectivos autores.

Exemplo Proposto por CHAUDRY (1979)

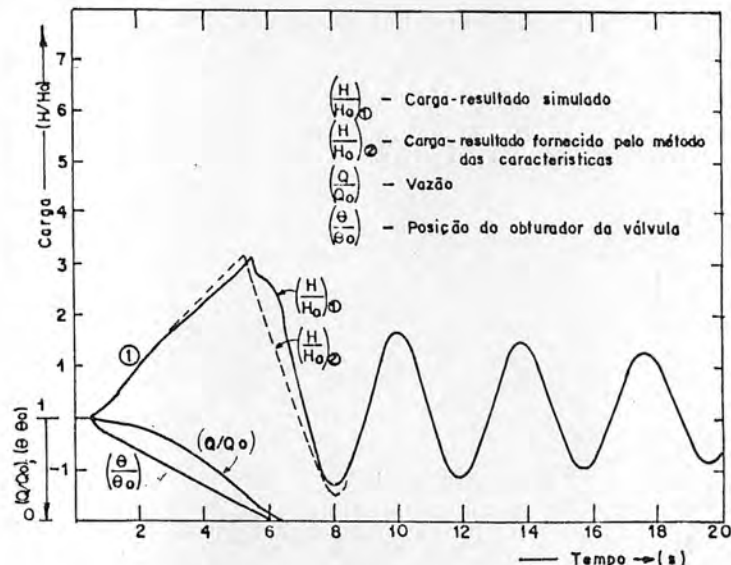


Valores Dados				
Trecho	D'	L	f	a
	m	m	-	m/s
1	0,75	550	0,010	1100
2	0,60	450	0,012	900
Valores Calculados				
$T = \frac{gSH_0}{Q_0}$	$F = \frac{2fQ_0}{\pi D^5}$	$I = \frac{L}{T}$	$C = T \frac{1}{a^2}$	$R = \frac{F}{T} L$
1/s	-	s	s	-
260,03	0,0026	2,115	0,1181	0,0055
166,42	0,0353	2,704	0,0925	0,0954

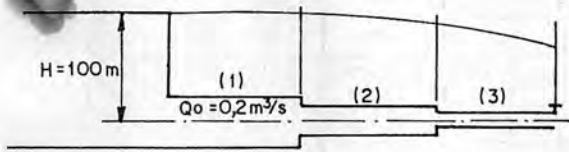
Gráfico de Ligações referente ao exemplo de CHAUDRY (1979)₁



Resultados obtidos: por simulação: curva (H/H_0) pelo método das características, CHAUDRY (1979): Curva $(H/H_0)_2$



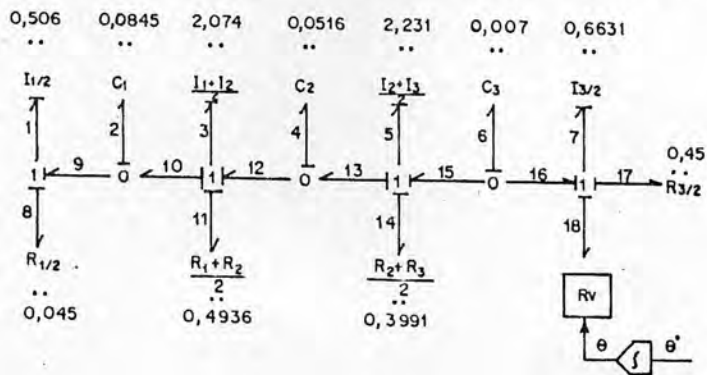
Exemplo proposto por STREETER (1978)



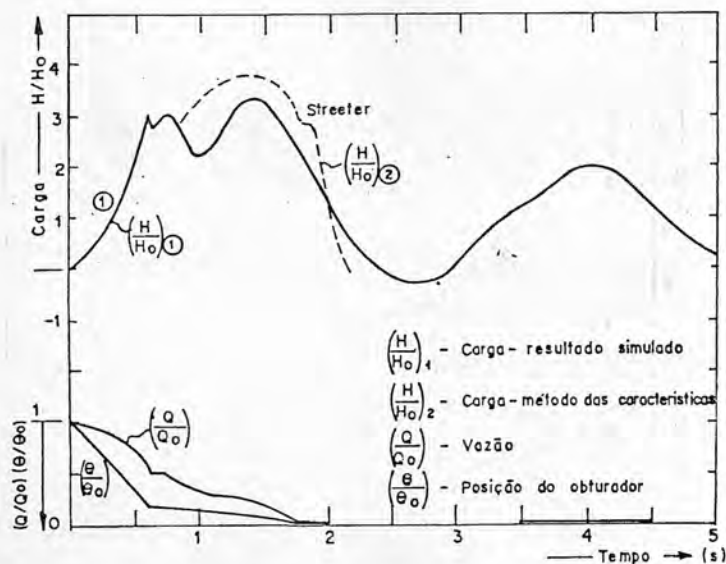
Valores Dados				
Trecho	D'	L	f	a
	m	m	-	m/s
1	0,3	351	0,019	1200
2	0,2	483	0,018	1200
3	0,15	115	0,018	1200

Valores Calculados				
$T = \frac{gSH_0}{Q_0}$	$F = \frac{2fQ_0}{\pi D^3}$	$I = \frac{L}{T}$	$C = T \frac{L}{a^2}$	$R = \frac{F}{T} L$
1/s	-	s	s	-
346,71	0,0896	1,024	0,0845	0,0907
154,09	0,2864	3,134	0,0517	0,8977
86,68	0,679	1,327	0,0069	0,900

Gráfico de Ligações referentes ao exemplo do STREETER (1978)



Resultados obtidos: por simulação: curva $(H/H_0)_1$ pelo método das características, STREETER (1978), curva $(H/H_0)_2$



CONCLUSÕES

Comparando os resultados obtidos por simulação dos "gráficos de junções" com os fornecidos por CHAUDRY (1979) STREETER [1978] e WATT [1979] que usaram o método das características, verifica-se que há uma proximidade razoável entre os dois métodos.

Embora o método das características seja mais trabalhoso ele é mais adequado para o estudo de escoamentos transitórios para apresentar um enfoque hidráulico do sistema ele fornece facilidade de simular a interação do escoamento transitório com os sistemas de comando dos dispositivos de proteção e controle por ventura existentes na instalação, permite o uso de aplicativos já existentes mercado como por exemplo o Tutsim (TM). Embora a de aplicação incipiente em sistemas, de condução, esse método constitui em uma ferramenta poderosa que carece de maiores estudos e desenvolvimento metodológico. E é nesse sentido que orienta-se os próximos trabalhos dos autores.

REFERÊNCIA

Brown, F. T. et alli, "Small amplitude frequency behaviour of third lines with turbulente flow". Journal of Basic Engineering, ASME (4): 678693 - dec. 1969.

Chaudry, M.H. "Applied Hydraulic Transients" New York Van Nostrand, 1979.

Karnopp, D.C., Rosenberg, D.C. "System Dynamics: "Unifical Approach" New York, Wiley Interciencias, 1974.

Rosenberg, R.C., Karnopp D.C. "Introduction to Physical System Dynamics" New York, Mc Graw Hill - 1983.

Streeter, V.L., Wylie, E.B. "Fluid Transienti "New York, McGraw Hill, 1978.

Tutsim, Block Diagram Simulation Language.

Thoma, J.U. "Introduction to bond graphs and their applications"; Pergamon Press, Oxford, Great Britain, 1975.

Watt, C.S., Hobbs; J.M; Boldy, A.P. "Combination of Finite Difference and Finite Element Fechinique in Hydraulic Transiente Problema" Proceeding, of the International Conference on Pressure Suges, paper B2; Canterbury, England, 1980.

Wylie, E. "Resonance in pressurized piping Systems". Ann Arbor - Michigan - University of Michigan, 1964, (PhD Thesi).

ABSTRACT

In this paper one shows a procedure for transient flows in pipes simulation, by using the Bond Graphs Method. The obtained results are compared with the Characteristics Method ones, in typical examples of literature, allowing good adherence.