

O USO DA TÉCNICA DOS GRAFOS DE LIGAÇÃO NA SIMULAÇÃO DE SISTEMAS HIDRÁULICOS EM REGIME TRANSITÓRIO

Geraldo Lúcio Tiago Filho^{*}, Adair Martins[†], e Roberto Laurent[‡]

^{*}Engenharia Hídrica, Universidade Federal de Itajubá
Av. BPS 1303, 37500903 Itajubá, M.G., Brasil
email: tiago@iem.efei.br

[†]Departamento Informática y Estadística, Universidad Nacional del Comahue
Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina
Mestrando Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá
Av. BPS 1303, 37500903 Itajubá, M.G., Brasil
email: amartins@uncoma.edu.ar, adair@efei.br

[‡]Departamento de Electrotecnia, Universidad Nacional del Comahue
Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina
email: rlaurent@uncoma.edu.ar

Palavras-chave: Grafos de Ligação, Simulação, Transitório Hidráulico, Golpe de Aríete, Software.

Resumo. *A metodologia dos Grafos de Ligação (BondGraphs) proporciona um enfoque estruturado de modelagem de sistemas dinâmicos. Está caracterizada pela representação e equacionamento da interação de sistemas de naturezas físicas distintas tais como: hidráulicos, elétricos, mecânicos, etc., ou combinação desses, através de uma estrutura gráfica lógica onde estão contidos os fluxos de energia e informação entre os componentes do sistema. Neste artigo apresenta-se uma síntese da técnica dos Grafos de Ligação e sua origem. Faz-se uma descrição técnica das funcionalidades e especificações de alguns softwares disponíveis no mercado utilizados para a implementação da metodologia e uma aplicação na simulação de transitórios de sistemas hidráulicos usando um software moderno. Com o objetivo de validar o método dos Grafos de Ligação resolve-se um caso clássico de simulação de golpe de aríete proposto por Streeter e comparam-se os resultados com os obtidos pelo método das características.*

1. INTRODUÇÃO

Entre os mais pesquisados e relevantes problemas de engenharia, em suas diversas áreas, encontra-se o entendimento da modelagem e simulação dinâmica de sistemas. Com o aumento da competitividade e a demanda por maior produtividade, ocorre a necessidade de um melhor desempenho dinâmico de sistemas que forneça maior clareza sobre fenômenos como picos de corrente, pressão, vazão, força, etc., que na maioria das vezes afetam a durabilidade e manutenção dos equipamentos.

Na modelagem e simulação dos fenômenos dinâmicos existe cada vez mais o uso de sistemas de simulação tais como Matlab/Simulink, Simnon, etc. Tais sistemas são baseados na abordagem de fluxo de sinal, amplamente difundida nos sistemas de controle. Através desta modelagem as conexões entre os elementos dos sistemas são definidas via portas, nas quais devem ser especificadas as variáveis de estado do sistema, sendo que cada conexão corresponde a apenas uma variável, o que naturalmente torna mais complexa a modelagem de sistemas onde há fluxo de potência, caracterizado pela transmissão de duas variáveis, ou seja, as variáveis de potência: pressão/vazão, tensão/corrente, força/velocidade. Com o intuito de simplificar a modelagem dinâmica de sistemas de potência, o uso da metodologia dos Grafos de Ligação está tendo cada vez mais aplicação em diferentes meios.

Esta técnica se baseia no fluxo de potência entre os componentes do sistema, consiste em sinais, linhas e símbolos próprios que, além de representar graficamente o modelo físico, proporciona uma visualização das interações entre os seus vários componentes e fornece implicitamente uma sistemática para a modelagem matemática do sistema, facilitando o uso de recursos computacionais para a sua simulação. Existem várias ferramentas analíticas ou computacionais que são utilizadas na análise e sínteses dos modelos dinâmicos.

2. ORIGEM DOS GRAFOS DE LIGAÇÃO

Foram criados em 1959 pelo professor Henry Paynter¹ do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), USA. Desde a sua criação, centenas de artigos, livros, foram publicados por Henry Paynter e outros nos Estados Unidos e no resto do mundo. Alguns deles se referem às técnicas e teorias matemáticas dos Grafos de Ligação, outros à aplicação do método em diferentes campos, e ainda alguns ao desenvolvimento de programas de computador usando este método.

O professor Henry Paynter após ter usado intensivamente a técnica dos diagramas de blocos em problemas de servocontroles e de simulação, sentiu a necessidade da existência de métodos de abordagens generalizados e sistemáticos, que além de operacionalizar as modelagens matemáticas de sistemas complexos, atendessem as necessidades específicas das várias áreas da engenharia e que permitisse equacionar a interação de sistemas de natureza física distinta, tais como elétrica, mecânica, hidráulica, pneumática e térmica ou combinações dessas ou outras.

O esforço de Paynter no desenvolvimento da teoria geral de engenharia de sistemas começou em 1950, com a esperança de que a energia e a potência fossem as variáveis dinâmicas fundamentais, que permitissem todas as interações físicas. Uma das razões da criação da técnica dos Grafos de Ligação, de acordo a Paynter foi para generalizar o conceito de diagrama de circuito elétrico, como também para eliminar algumas de suas limitações.

Seu treinamento e experiência em sistemas hidroelétricos de potência fizeram surgir certas idéias e mais particularmente uma conscientização das fortes analogias existentes entre: Transmissão: condutos de fluido e linhas elétricas, Transdução: turbinas e geradores, Controle: reguladores de velocidade e de tensão. Quando estes dispositivos análogos foram reduzidos a equações com a de simulação de computadores as diferenças se tornaram completamente indistintas. Enquanto Paynter trabalhava neste projeto foi influenciado por muitas pessoas e teorias até que surgiu no dia 24 de abril de 1959 a técnica dos Grafos de Ligação como uma disciplina formal. Esta técnica foi amplamente difundida na década de 1960 por Dean Karnopp e Ronald Rosenberg, professores nas universidades da Califórnia e de Michigan, respectivamente.

3. METODOLOGIA DOS GRAFOS DE LIGAÇÃO

A técnica dos Grafos de Ligação^{2,3,4,5,6,7} possui nove elementos básicos que são as fontes de esforço S_e , fontes de fluxo S_f , os resistores R , os capacitores C , as inércias I , os transformadores TF , os giradores GY e as junções "O" e "I", que representam respectivamente os geradores de potência, os dissipadores, os acumuladores de energia e os elementos de acoplamento. Esses elementos combinados convenientemente descrevem o modelo físico de um sistema através de uma representação gráfica usando simbologia própria, que além de permitir a visualização das conexões entre vários elementos componentes do sistema, traz implícito todo o equacionamento do modelo. Um modelo de Grafos de Ligação está formado por componentes ou subsistemas conectados por ligações (*bonds*) que representam o fluxo de potência entre eles, ou seja, é nestas ligações que ocorre a transmissão de potência.

São utilizadas nesta metodologia quatro variáveis generalizadas:

- Variável de potência (Estado) : esforço (e) e fluxo (f).
- Variável de energia (Integral): quantidade de movimento (P_p) e de deslocamento (q).

As variáveis de esforço $e(t)$ e de fluxo (f) são chamadas de variáveis de potência porque o produto dessas duas variáveis consideradas como funções do tempo, é igual a potência instantânea que flui entre os dois componentes conectados pela ligação conforme indicado na equação 1.

$$Pot(t) = e(t).f(t) \quad (1)$$

O elemento fundamental desta técnica é o de ligação, representado por uma barra onde são indicadas as variáveis de energia ou de estado devidamente indexadas. Através da meia seta conforme mostra-se na Figura 1, a ligação permite indicar o sentido da potência que flui de um elemento para outro. A potência será positiva se, "e" e "f" forem positivos. Será negativa se uma das ditas variáveis for negativa. Através de uma barra causal é mostrada a relação necessária entre a causa e efeito, ou seja a entrada e saída da troca de energia entre dois elementos. Essa causalidade é indicada através de uma barra vertical inserida em uma das extremidades da ligação, de forma a indicar o sentido do esforço "e". Em sentido contrário fica subentendido o fluxo "f" como é mostrado na Figura 1.

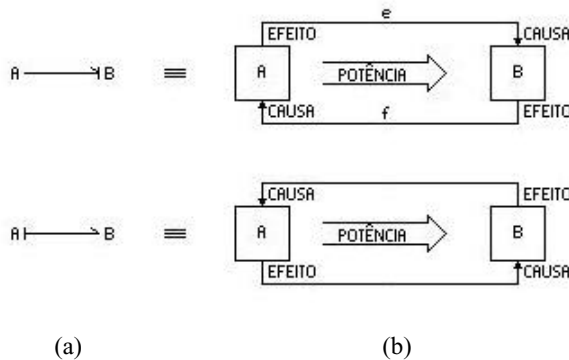


Figura1: Símbolo de causalidade (a) Grafos de Ligação. (b) Diagrama de blocos.

3.1 Elementos Básicos dos Grafos de Ligação

A tabela 1 mostra as variáveis de potência e energia e os nove elementos básicos dos Grafos de Ligação com as atribuições de fluxo de potência e de causalidade no domínio físico Elétrico e Hidráulico. O modelo matemático é determinado a partir das equações constitutivas lineares ou não destes elementos.

A partir do modelo físico estabelecido para o sistema e uma vez identificados os seus elementos componentes de acordo com a Tabela 1, pode-se obter a sua representação usando a metodologia dos Grafos de Ligação. Este grafo leva ao desenvolvimento imediato do modelo matemático para o sistema dinâmico na forma de equações de estado, através de um procedimento lógico e consistente. Conhecido o modelo matemático as ferramentas computacionais de análise e simulação de sistemas dinâmicos podem ser empregadas para avaliar o comportamento do sistema.






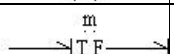
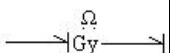
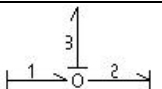
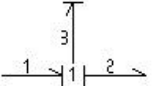
Elementos		Relação Constitutiva	Símbolo Convencional	Sistema Elétrico	Sistema Hidráulico
Variáveis de Potência	Esforço	e	e	Tensão, U [V]	Pressão, p [Pa]
	Fluxo	f	f	Corrente elétrica, i [A]	Vazão, Q [m ³ /s]
Variáveis Integrais	Momentum	$P_p = \int edt$	Pp	Fluxo elétrico, λ [V.s]	Quantidade Movimento de pressão, Pp, [Pa.s]
	Deslocamento	$q = \int fdt$	q	Carga elétrica, q [C]	Volume, ∇ [m ³]
Inertância	Indutância de energia ao sistema	$f(t) = \frac{1}{L} \int_0^i e(t).dt$		Indutância Elétrica [H]	Indutância Fluida [Pa.s ² /m ³]
Capacitância	Capacidade de acumular energia	$e(t) = \frac{1}{C} \int_0^i f(t).dt$		Capacitância Elétrica [F]	Capacitância fluida [m ³ /Pa]
Resistência	Elemento dissipador de energia	$e(t) = f(t).R$		Resistência elétrica [Ω]	Resistência fluida [Pa.s/m ³]
Fonte de Esforço	Supre o sistema			Fonte de tensão	Fonte de pressão
Fonte de Fluxo	Supre o sistema			Fonte de corrente	Fonte de vazão
Transformador	Ampliam ou reduzem a amplitude de uma entrada	$e_1 = m e_2$ $m f_1 = f_2$		Transformador de potência	Pistão hidráulico
Girador	Relaciona esforço de entrada e fluxo de saída e vice versa	$e_1 = \Omega f_2$ $\Omega f_1 = e_2$		Gerador Motor	Turbina Bomba
Elementos de Junções	Junção " 0 "	$e_1 = e_2 = e_3$ $f_1 - f_2 - f_3 = 0$		Impedância em paralelo	Derivações em sistemas hidráulicos
	Junção " 1 "	$f_1 = f_2 = f_3$ $e_1 - e_2 - e_3 = 0$		Impedância em série	Perda de carga serie

Tabela 1: Elementos básicos, equações constitutivas e causalidades

4. SOFTWARES DISPONÍVEIS

Apresenta-se uma revisão de alguns *softwares* usados na simulação de sistemas dinâmicos utilizando a técnica dos Grafos de Ligação. Para obter esta informação consultou-se a várias empresas e alguns endereços de páginas Web. Em alguns casos obteve-se informação das características do programa, preços, manuais e demos.

20-SIM (Twente Sim) é um programa avançado de simulação que executa no ambiente *Microsoft Windows*. Pode simular o comportamento de sistemas dinâmicos tais como sistemas elétricos, mecânicos e hidráulicos ou outra combinação destes. O 20-SIM foi desenvolvido no *Control Laboratory University of Twente* como sucessor do famoso programa TUTSIM. Sustenta completamente o modelo gráfico, permitindo que se projetem e analisem sistemas dinâmicos de uma maneira intuitiva e amigável. Possibilita uma modelagem através de diagramas de ícones, Grafos de Ligação, diagrama de blocos e equações plenamente observáveis com uma estrutura de modelo hierárquica ilimitada. Tem apoio ativo de desenho *Top-Down* e permite utilizar as bibliotecas dos modelos de componentes. É possível trabalhar com vetores, matrizes, ligações multidimensionais e sinais, parâmetros de otimização, linearização, animação gráfica e *toolboxes* de animação 3D. Exporta os dados e modelos para o programa MATLAB/SIMULINK. Uma das vantagens deste *software* é não necessitar de um programa externo para executá-lo. O preço da versão 3.2 com fins acadêmicos é de US\$400 para a *standard* e de US\$800 para a profissional, em ambos casos para um usuário. O preço para cinco usuários é de US\$1000 para a versão *standard* e de US\$2000 para a profissional. Uma versão demo encontra-se disponível em: <http://www.rt.el.utwente.nl>, esta versão tem a restrição de não poder salvar o modelo.

SYMBOLS2000: *System Modeling by Bondgraph Language and Simulation*. É um *software* para modelagem e simulação de sistemas de multienergia, desenvolvido no *Indian Institute of Technology, Kharagpur*. Utiliza uma modelagem híbrida hierárquica orientada a objeto. Consiste de três módulos: *Bondpad*, *Simulator* e *Controls*. Permite ao usuário criar modelos usando Grafos de Ligação, diagrama de blocos e modelo de equação. Estão disponíveis um grande número de submodelos avançados chamados cápsulas para aplicação em diferentes domínios da engenharia. Automaticamente deriva as equações de sistemas reduzidos. A causalidade diferencial e laços algébricos são resolvidos usando a sua potência de solução simbólica. Ele gera um código de linguagem C de alto nível e permite embutir qualquer código externo. O programa tem um módulo de controle bem desenvolvido, que automaticamente transforma os módulos espaço-estado a partir dos Grafos de Ligação ou modelo de diagrama de blocos e converte-os para funções de transferência analógicas ou digitais. Este software tem uma notável interface com o usuário. Suas capacidades de soluções numéricas e simbólicas são muito avançadas, possui também muitas facilidades de pós-processamento além do resultado simulado. Requer uma versão 5 ou superior da *Microsoft Developer Studio* pré-instalado. A compilação direta em C++ permite uma fácil integração de código externo se o usuário tem uma certa experiência. O preço para a

versão completa com fins acadêmicos é de US\$2530, também está disponível uma versão reduzida de 50 ou 100 estados por US\$ 1350. Uma versão demo para 9 estados encontra-se no endereço: <http://www.symbols2000>.

CAMP-G: *Computer Aided Modeling Program*, é um *Software* que permite aos engenheiros e pesquisadores projetar sistemas dinâmicos e mecatrônicos usando como entrada modelos físicos descritos pelo método dos grafos de ligação. Pode trabalhar com sistemas de controle, térmicos, hidráulicos, elétricos, mecânicos, etc. O CAMP-G é uma ferramenta de geração de modelo que possui interface com linguagens tais como: MATLAB/SIMULINK, ACSL e outros para realizar as simulações. Tem uma boa interface com o usuário, não suporta modelos orientados a objeto. O pré-processador depende de um *software* externo para realizar o pós-processamento. O preço da versão acadêmica 4.9 com interface MATLAB/SIMULINK é de US\$1500 para um usuário e de US\$3500 para dez usuários. Não encontra-se disponível uma versão demo na página Web. Informação sobre o programa pode ser encontrada no endereço: <http://www.bondgraph.com>.

POWERDYNAMO: É um software que permite a modelagem de sistemas físicos dinâmicos com grafos de ligação, admite também combinações com diagrama de blocos denominadas diagramas mistos. O *software PowerDynaMo*⁶, é uma aplicação que executa no ambiente Windows e fornece ao usuário uma interface totalmente gráfica para a edição dos diagramas e seu armazenamento em arquivos. Possui ferramentas de análise causal e a possibilidade de conversão totalmente automatizada dos grafos de ligação à diagramas de bloco do SIMULINK. O programa contém bibliotecas com os elementos mais comuns dos Grafos de Ligação, diagrama de blocos e mistos. É um programa de fácil utilização e com um ambiente amigável. Foi desenvolvido pelo Prof. Ernesto Kofman do *Departamento de Electrónica, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Argentina*. É um *software* que encontra-se disponível no endereço: <http://www.eie.fcëia.unr.edu.ar/~lsd/powerdynamo.html>

AMESim: *Advanced Modeling Environment for Simulations*, utiliza Grafos de Ligação na modelagem dinâmica de sistemas de vários domínios energéticos. É utilizado na modelagem e simulação em potência fluida (gases ou líquidos), mecânica, termofluidos e sistemas de controle. Possui bibliotecas abertas que possibilitam personalização, ampliando a extensa biblioteca disponível para a modelagem e simulação dinâmica unidimensional de sistemas mecânicos e de fluidos. Possui interface com os programas MATLAB e MATRIXx. Não encontra-se uma versão demo na página Web. Informação sobre o software encontra-se em: <http://www.amesim.com>

Existem também outros *softwares* usados para a modelagem de sistemas dinâmicos que utilizam a técnica dos Grafos de Ligação: BONDLAB, CMBAS, DYMOLA, ENPORT, HYBRISIM, MS1, PASION, etc. Em alguns endereços da página Web destes programas foi possível obter uma informação parcial e em outros foi impossível.

5. SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA HIDRÁULICO

O golpe de aríete é um fenômeno transitório de variação de pressão e de vazão que ocorre ao longo de um conduto forçado, ocasionado pela ação de algum órgão de controle do sistema hidráulico. O conhecimento deste fenômeno transitório é fundamental para o dimensionamento técnico e economicamente adequado dos sistemas hidráulicos.

Esta aplicação foi proposta por Streeter⁸ no seu conhecido livro "*Fluids Transients*" como exemplo 3.2, onde considera-se um sistema simples composto de um reservatório de nível constante, conduto uniforme e uma válvula na extremidade de jusante conforme mostrado na Figura 2. Apresenta-se a simulação do transitório do sistema hidráulico modelado com a técnica dos Grafos de Ligação combinada com o diagrama de blocos. Utilizou-se o programa 20-SIM versão demo disponível na página Web anteriormente mencionada. Foi escolhido pela sua facilidade de uso, interface amigável com o usuário e a disponibilidade de utilização de elementos modulados. Também implementou-se o método das características usando o programa MATLAB como o objetivo de comparação.

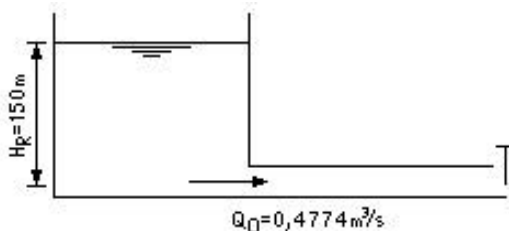


Figura 2: Exemplo proposto por Streeter

A válvula considerada segue a lei geral da queda de pressão proporcional ao quadrado da vazão⁹ dada pela equação 2:

$$P = \frac{\rho}{2C_d^2(x)A^2(x)} |Q|Q \quad (2)$$

Onde: ρ é a densidade da água, $C(x)$ e $A(x)$ o coeficiente de descarga e a área da válvula respectivamente, e x a coordenada de posição da mesma. A lei de manobra da válvula do exemplo é dada pela equação 3:

$$\tau = \frac{C_d(x)A(x)}{C_d(0)A(0)} \left(1 - \frac{t}{t_c} \right)^{E_m} \quad (3)$$

Onde: t é o tempo, t_c é o tempo de fechamento e E_m um coeficiente característico da válvula.

Os dados fornecidos para a modelagem do conduto forçado (inertância, capacitância, e resistência fluida), da válvula e determinação de condições iniciais são os seguintes: $L = 600$ m, $D = 0,5$ m, $f_a = 0,018$, $a = 1200$ m/s, $H_R = 150$ m, $g = 9,806$ m/s², $t_c = 2,1$ s, $E_m = 1,5$, $C_d(0)A(0) = 0,009$.

Com os programas atuais a modelagem da tubulação só é possível com parâmetros concentrados, ou seja representando vários circuitos em serie "T" ou "π", não sendo isto uma restrição importante porque estes transitórios são lentos em geral. A representação do sistema hidráulico com o programa 20-SIM se mostra na Figura 3. No lado esquerdo da Figura se observa a fonte de pressão Se. A seguir o conduto forçado está representado por três inertâncias I, três resistências moduladas MR e duas capacitâncias C concentradas que correspondem a uma discretização em dois trechos através de dois circuitos series equivalentes em "T"; também poderia ter-se optado por uma representação em "π". A resistência e a inertância nos extremos correspondem a 1/4 e as centrais a 1/2 dos valores totais, e a cada capacitância 1/2 do valor total. As resistências estão moduladas com a vazão para levar em conta uma queda de pressão proporcional ao quadrado da vazão em forma similar à representada pela equação 2 para a válvula. No extremo direito do conduto forçado observa-se a válvula que também esta representada por uma resistência modulada MR, neste caso pela vazão e a equação 3 modelada com diagrama de blocos.

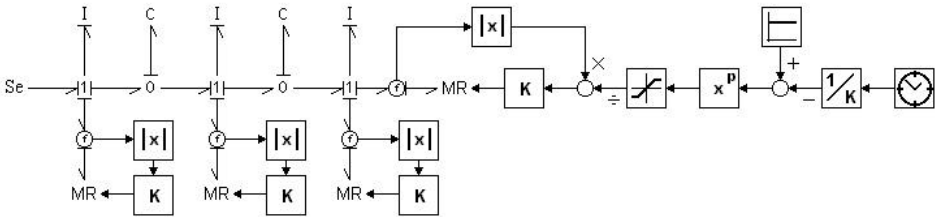


Figura 3: Representação do sistema hidráulico usando Grafos de Ligação com o 20 - SIM

5.1 Resultado da Simulação

Na Figura 4 mostram-se os resultados da simulação para a sobrepessão ou carga na válvula e a vazão no início do conduto obtidos com Grafos de Ligação e na Figura 5 as mesmas variáveis calculadas com o método das características. A Figura 5 coincide exatamente com os resultados dados por Streeter, onde usou-se um tempo de simulação de 4.3 segundos. Embora a simulação realizou-se com as pressões em [Pa], sendo mais apropriada nos Grafos de Ligação para que o produto do esforço pelo fluxo dê diretamente a potência, os resultados mostraram-se em [m] por ser mais intuitivos e respeitar as unidades da referência original. Observa-se uma grande semelhança, tanto entre a oscilação de pressão na válvula como na vazão no conduto. O máximo da carga com o método das características é

de 285 m e ocorre aos 1,1 segundos e com os Grafos de Ligação também é 285 m e ocorre aos 1,2 segundos. As diferenças são mínimas desde o ponto de vista prático.

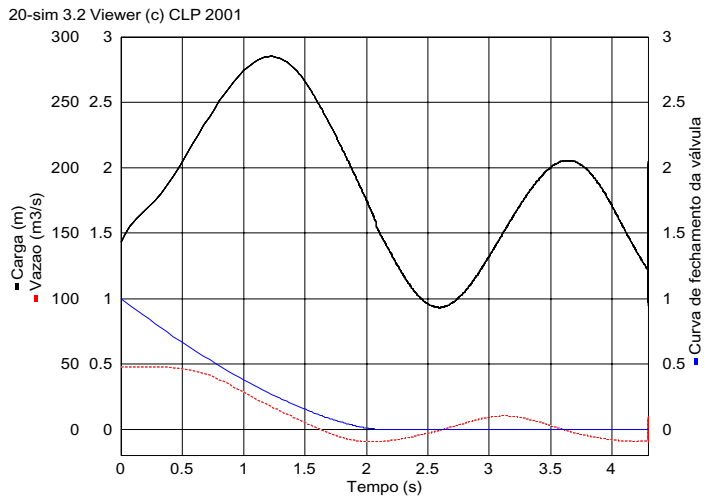


Figura 4: Resultado da simulação com Grafos de Ligação

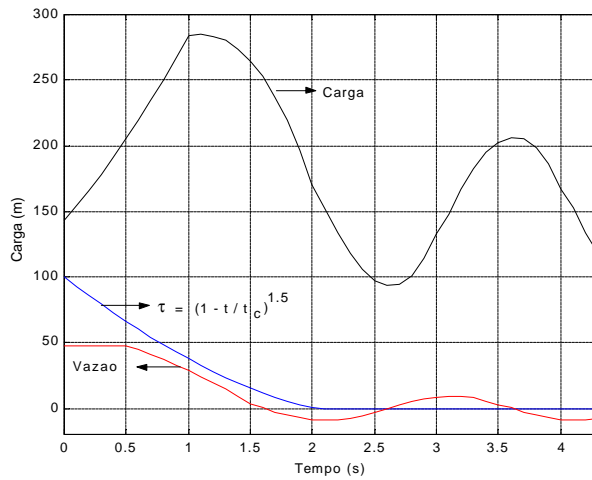


Figura 5: Resultado da simulação com o método das características

Se a simulação continua até 20 segundos, conforme mostra a Figura 6 e Figura 7, observa-se também uma grande semelhança entre os resultados obtidos pelos dois métodos, tanto o amortecimento como a frequência de oscilação são muito parecidos.

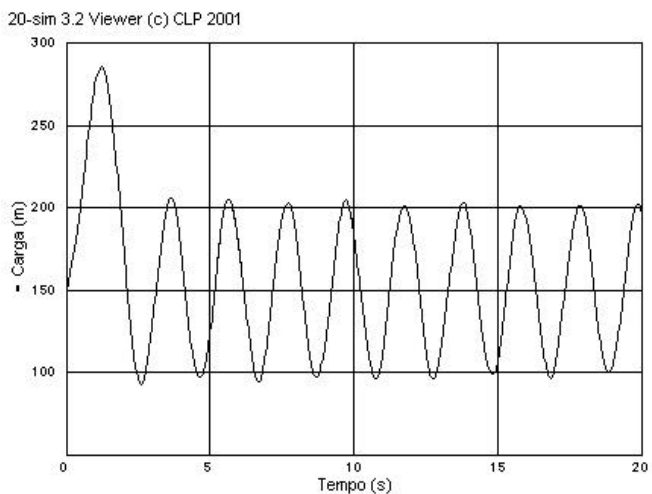


Figura 6: Sobrepressão na válvula com Grafos de Ligação

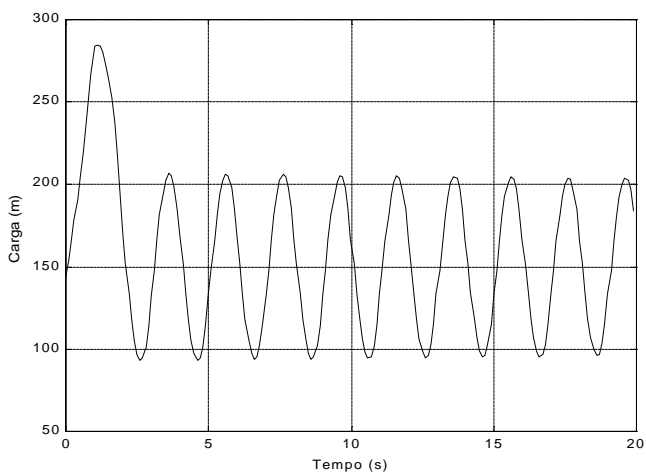


Figura 7: Sobrepressão na válvula com o método das características

6. CONCLUSÃO

A técnica dos Grafos de Ligação constitui um enfoque unificado e estruturado da modelagem de sistemas dinâmicos de diferentes domínios da física. É especialmente apta para modelar os elementos de um sistema onde há fluxo de potência (esforço e fluxo), e permite combinar diretamente com diagrama de blocos e outras técnicas no caso onde há somente inter-relação de sinais .

A evolução dos programas computacionais baseados nesta técnica permite atualmente em forma interativa editar, parametrizar, assinalar a causalidade automaticamente e simular um sistema diretamente da representação gráfica. Uma análise preliminar dos programas existentes permitem sugerir que para uso acadêmico, levando em conta a sua facilidade de uso, preços relativamente baixos ou nulos e a disponibilidade de versões demo na Web, os três programas provavelmente mais recomendáveis são: 20-SIM, Symbols2000 e PowerDynaMo.

A metodologia se mostra como uma alternativa muito atrativa para simular o fenômeno de golpe de aríete em tubulações forçadas. A simulação de um caso clássico da bibliografia usando um demo do programa 20-sim e representado a tubulação com somente dois circuitos "T" mostrou uma grande semelhança com os resultados obtidos pelo método das características, havendo muita coincidência entre os valores máximos da sobrepressão na válvula, o instante de tempo em que ocorre e na forma geral das oscilações no transitório. O programa permitiu modelar facilmente a não linearidade da resistência da tubulação e a não linearidade e variação no tempo da resistência da válvula.

7. REFERÊNCIAS

- [1] J. Montbrum-Di Filipo, M. Delgado, C. Brie e H. Paynter, "A Survey of Bond Graphs: Theory, Applications and Programs", Journal of the Franklin Institute, 565-606, (1991).
- [2] D. Karnopp e R. Rosenberg, *System Dynamics: A Unified Approach*, John Willey, USA, (1975).
- [3] G. L. Tiago, "Aplicação do Método dos Gráficos de ligações na Simulação de uma Válvula de Alívio, Anti-Golpe de Aríete, Auto Operada", Tese de Doutorado, EPUSP, (1994).
- [4] I. L. De Carvalho, "Avaliação da Aplicabilidade do Método dos Gráficos de Ligações no estudo de escoamentos transitórios em condutos forçados", Dissertação de Mestrado, EFEI, (1995).
- [5] M. Speranza Neto, F. Scofano Neto e F.R. Da Silva, "O Tratamento da Dinâmica de Sistemas Térmicos e Fluidos através da Técnica Generalizada dos Grafos de Ligação", ENCIT, (1992).
- [6] E. Kofman e S. Junco, "Un Ambiente Computacional para la Modelización de Sistemas Dinámicos no Lineales con Bond Graphs", RPIC, (1999).
- [7] J. L. Baliño, A.E. Larreguey e E. F. Gandolfo, "A General Bond Graph Approach for Computational Fluid Dynamics", submetido a Mathematics and Computers, (2001).

- [8] V.L. Streeter e E.B. Wylie, *Fluids Transients*, McGraw-Hill, São Paulo, (1978).
- [9] R. Rosenberg e D. Karnopp, *Introduction to Physical System Dynamics*, McGraw-Hill, New York, (1983).