



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI

**O USO DA TÉCNICA DOS GRAFOS DE LIGAÇÃO
PARA A SIMULAÇÃO DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS
EM REGIME TRANSITÓRIO**

Adair Vilas Boas Martins

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Itajubá para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia da Energia.

**Itajubá
2004**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI

**O USO DA TÉCNICA DOS GRAFOS DE LIGAÇÃO
PARA A SIMULAÇÃO DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS
EM REGIME TRANSITÓRIO**

Adair Vilas Boas Martins

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Itajubá
para obtenção do título de Mestre em Ciências em
Engenharia da Energia.

Área de Concentração: Geração Hidrelétrica

Orientador: Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho (UNIFEI)
Co-orientador: MSc. Angel Roberto Laurent (UNCo)

**Itajubá
2004**

À minha família, Roberto, Viviana, Mauricio e Jessica
que sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho, pela amizade, sugestão do tema, orientação e apoio à concretização deste trabalho de dissertação.

Ao Prof. Roberto Laurent, pelo carinho, ajuda incondicional, incentivo e co-orientação desta dissertação.

Aos Professores Zulcy de Souza, Edson Bortoni, Augusto Nelson de Carvalho e Genésio José Menon pelo incentivo e apoio dado.

Aos Professores Márcia Martins e Oscar Maldonado pela amizade e apoio incondicional.

À todas secretárias do LHPCH, especialmente à Evilene e Amélia, pela amizade e ajuda brindada.

Ao Centro Nacional de Referências em Pequenos Aproveitamentos Hidroenergéticos (CERPCH) pela aquisição do *software* utilizado nesta dissertação.

Ao Eng. Glauco Freitas da Voith Siemens pelas valiosas informações conferidas.

Ao meu filho Mauricio que com muita paciência fez os desenhos que compõe este trabalho.

À minhas filhas Viviana e Jessica pelas noites de companhia e ajuda na revisão da digitação.

À *Facultad de Economía y Administración* e ao *Departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad Nacional del Comahue* (UNCo), Patagônia, Argentina, por propiciar minha participação na concretização deste trabalho.

À diretora do *Departamento de Ciencias de la Computación*, Jorgelina Giorgetti pelo incentivo constante.

À todos os docentes do *Departamento Ciencias de la Computación*, especialmente à Laura Sanchez, Lidia López, Carina Fracchia, Claudia Allan, Ingrid Godoy, Alejandra Chegorsky, Nadina Carod, Susana Parra, Sandra Roger, Laura Cecchi e Silvia Amaro pela amizade e ajuda brindada.

Aos docentes Irene Mosconi do *Departamento de Matemática* e Marta Marizza do *Departamento de Construcciones* pela amizade e apoio dado.

Aos docentes Orlando Audisio e Ariel Marchegiani do *Departamento de Mecánica* pela colaboração prestada.

Meus agradecimentos a todas as pessoas envolvidas direta ou indiretamente, que colaboraram neste trabalho.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa da Dissertação.....	1
1.2 Objetivo da Dissertação.....	2
1.3 Conteúdo da Dissertação.....	3
1.4 Revisão Bibliográfica.....	3

CAPÍTULO 2 - EQUAÇÕES DIFERENCIAIS PARA TRANSITÓRIOS EM CIRCUITOS HIDRÁULICOS

2.1 Introdução.....	6
2.1.1 Causas dos Transitórios Hidráulicos.....	7
2.2 Propagação das Ondas de Pressão em um Sistema Hidráulico.....	7
2.2.1 Celeridade das Ondas de Pressão.....	12
2.2.2 Tempo de Reflexão da Onda no Conduto.....	13
2.3 Equações Fundamentais para o escoamento Transitório.....	15
2.3.1 Equação do Movimento.....	15
2.3.2 Equação da Continuidade.....	16
2.3.3 Forma Simplificada das Equações Fundamentais.....	17
2.3.4 Considerações sobre as Equações Fundamentais.....	18
2.4 Métodos de Resolução das Equações Diferenciais.....	19
2.5 Analogia entre Circuitos Hidráulicos e Elétricos: Resistência, Inertância e Capacitância Fluída.....	20
2.5.1 Grandezas por Unidade.....	23
2.6 Conclusões.....	25

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA DOS GRAFOS DE LIGAÇÃO

3.1 Origem dos Grafos de Ligação.....	26
---------------------------------------	----

3.2	Elementos Básicos dos Grafos de Ligação.....	27
3.3	Elementos Passivos e Ativos.....	29
3.3.1	Resistência.....	30
3.3.2	Capacitância.....	31
3.3.3	Inertância.....	32
3.3.4	Elementos Transdutores.....	34
3.3.5	Elementos de Junção.....	36
3.3.5.1	Junção tipo “0”.....	36
3.3.5.2	Junção tipo “1”.....	37
3.4	Causalidades.....	37
3.5	Algoritmo para Construção dos Grafos de Ligação.....	41
3.5.1	Procedimento para Assinalar as Causalidades.....	41
3.5.2	Exemplos de Construção dos Grafos de Ligação.....	42
3.5.2.1	Circuito Elétrico RLC.....	42
3.5.2.2	Sistema Mecânico de Translação: Massa-mola.....	44
3.5.2.3	Circuito hidráulico: Reservatório, Conduto Forçado e Válvula.....	46
3.6	Equações de Estado.....	48
3.7	Conclusões.....	52

CAPITULO 4 - APLICATIVOS DISPONÍVEIS

4.1	Introdução.....	53
4.2	20-SIM.....	53
4.2.1	Ambiente 20-SIM.....	54
4.3	SYMBOLS2000.....	59
4.3.1	Ambiente SYMBOLS 2000.....	59
4.4	POWERDYNAMO.....	64
4.4.1	Ambiente POWERDYNAMO.....	65
4.5	Outros Programas.....	70
4.6	Conclusões.....	71

CAPÍTULO 5 - SIMULAÇÃO DO GOLPE DE ARÍETE COM GRAFOS DE LIGAÇÃO

5.1 Modelagem do Conduto Forçado com Parâmetros Concentrados.....	72
5.2 Modelagem da Válvula.....	74
5.3 Exemplo Proposto por Wylie e Streeter (1990).....	75
5.3.1 Cálculo das Grandezas do Circuito Hidráulico para a Tubulação Discretizada em Dois Trechos com Circuito “T”.....	76
5.3.2 Grafos de Ligação do Exemplo Proposto.....	77
5.3.3 Comparação da simulação obtida com Grafos de Ligação e com o Método das Características.....	77
5.4 Correção da Capacitância.....	79
5.5 Resistência não Linear versus Resistência Linear.....	81
5.6 Exemplo Proposto por Watt.....	81
5.6.1 Grafos de Ligação do Exemplo Proposto.....	84
5.6.2 Comparação da Simulação obtida com Grafos de Ligação e com o Método das Características.....	85
5.7 Conclusões.....	87

CAPÍTULO 6 - INTERAÇÃO ENTRE TURBINA, REGULADOR DE VELOCIDADE E CARGA ELÉTRICA

6.1 Considerações Gerais.....	88
6.2 Modelagem da turbina com Grafos de Ligação: Girador ou Transformador?.....	91
6.3 Representação com Grafos de Ligação da Inércia Mecânica e a Carga Elétrica.....	93
6.4 Perdas e Rendimento.....	95
6.5 Diagrama de blocos do Regulador de Velocidade.....	98
6.6 Modelo de um sistema Hidrelétrico Isolado.....	100
6.7 Simulação com Grafos de Ligação de Casos de Rejeição e Aceitação de Carga Propostos por Wylie e Streeter (1993).....	101
6.8 Análise de Rejeição Total de Carga na Hidrelétrica Santa Clara.....	108
6.9 Conclusões.....	113

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Conclusões e Sugestões.....114

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....118

ANEXO A - PREÇOS DOS APLICATIVOS

ANEXO B - PUBLICAÇÕES DERIVADAS DESTA DISSERTAÇÃO

- B.1 *Bond Graphs* versus Mediciones de Laboratorio y el Método de las Características en la Simulación del Golpe de Ariete.
- B.2 O Uso da Técnica dos Grafos de Ligação na Simulação de Sistemas Hidráulicos em Regime Transitório.

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

CAPÍTULO 2

FIGURAS:

2.1	Onda de pressão no fechamento instantâneo de uma válvula.....	8
2.2	Fechamento instantâneo da válvula de um conduto forçado (sem perturbação).....	9
2.3	Válvula totalmente fechada.....	9
2.4	Tempo $L/2a$	10
2.5	Tempo L/a	10
2.6	Tempo $3L/2a$	10
2.7	Tempo $2L/a$	11
2.8	Tempo $5L/2a$	11
2.9	Tempo $3L/a$	11
2.10	Tempo $7L/2a$	12
2.11	Tempo $4L/a$	12
2.12	Volume de controle para a equação do movimento.....	16
2.13	Volume de controle para a equação da continuidade.....	17
2.14	Pequeno elemento de uma linha de transmissão.....	20

CAPÍTULO 3

FIGURAS:

3.1	Símbolo de causalidade.....	29
3.2	Representação convencional das fontes.....	30
3.3	Representação convencional para a resistência.....	30
3.4	Representação convencional para a capacitância.....	31
3.5	Lei constitutiva para a capacitância.....	32
3.6	Representação para a inertância.....	33
3.7	Lei constitutiva da inertância.....	34
3.8	Representação convencional do transformador.....	35

3.9	Representação convencional do elemento de transformação indireta.....	35
3.10	Representação convencional da junção “0”.....	36
3.11	Representação convencional da junção “1”.....	37
3.12	Circuito RLC.....	43
3.13	Exemplo de construção dos GL: Circuito Elétrico RLC.....	43
3.14	Sistema mecânico Massa- mola.....	44
3.15	Exemplo de construção com GL do Sistema Mecânico: Massa mola.....	45
3.16	Sistema Hidráulico.....	46
3.17	Exemplo de construção com GL do sistema hidráulico.....	47
3.18	Procedimentos para a obtenção das equações de estado a partir dos GL.....	49

TABELAS:

3.1	Variáveis generalizadas.....	28
3.2	Causalidades, diagrama de blocos dos elementos primários.....	39
3.3	Elementos básicos, equações constitutivas e causalidades.....	40

CAPÍTULO 4

FIGURAS:

4.1	Janelas do 20 SIM.....	54
4.2	Circuito RLC série com 20 SIM.....	55
4.3	Subjanela das equações constitutivas da capacitância.....	56
4.4	Subjanela <i>Parameters</i>	57
4.5	Janela <i>Simulator</i> : Representação gráfica.....	58
4.6	Resultado da simulação com 20.....	58
4.7	Janela do módulo <i>Bond Pad</i>	60
4.8	Módulo <i>Simulator</i> : subjanela de parâmetros e representação gráfica.....	61
4.9	Janela de compilação.....	62
4.10	Janela compilação: subjanela <i>Set Path</i>	62
4.11	Saída da simulação.....	63
4.12	Resultado da simulação com SYMBOLS 2000.....	64
4.13	Janela principal.....	65
4.14	Janela de biblioteca: elementos lineares dos Grafos de Ligação.....	65

4.15	Circuito RLC serie com POWERDYNAMO.....	66
4.16	Uma janela de parâmetros.....	67
4.17	Diagrama de blocos circuito RLC serie no ambiente SIMULINK.....	68
4.18	Diagrama de blocos circuito RLC modificado.....	68
4.19	Resultado da simulação circuito RLC serie com POWERDYNAMO.....	69
4.20	Obtenção da saída da simulação desde Grafos de Ligação.....	69
4.21	Resultado da simulação.....	70

CAPÍTULO 5

FIGURAS:

5.1	Conduto forçado da Usina Antas II em Poços de Caldas (MG Brasil).....	72
5.2	Representação do conduto forçado discretizado em dois trechos com Grafos de Ligação.....	74
5.3	Representação da válvula com Grafos de Ligação	75
5.4	Exemplo proposto por Wylie e Streeter.....	75
5.5	Representação do sistema hidráulico usando GL com o 20-SIM e a tubulação discretizada em 2 trechos”.....	77
5.6	Resultado da simulação com Grafos de Ligação.....	78
5.7	Resultado da simulação com o método das características.....	78
5.8	Sobrepessão na válvula com Grafos de Ligação e método das características.....	79
5.9	Sobrepessão na válvula com correção da capacitância	80
5.10	Golpe de aríete e amortecimento com resistência linear e não linear	82
5.11	Esquema original proposto por Watt.....	83
5.12	Modelo dos GL para simular golpe de aríete com 20-SIM e tubulação discretizada em 1 trecho “ π ”.....	85
5.13	Modelo dos GL para simular golpe de aríete com 20SIM e tubulação discretizada em 4 trechos “ π ”.....	85
5.14	Transitório de pressão medido e simulado com GL	86
5.15	Golpe de aríete simulado com o método das características e GL.....	87

TABELAS:

5.1	Lei de fechamento da válvula.....	83
-----	-----------------------------------	----

CAPÍTULO 6

FIGURAS:

6.1	Interação entre sistema hidráulico e elétrico.....	88
6.2	GL em “palavras” de um sistema hidrelétrico isolado.....	90
6.3	Variação dos módulos do transformador e girador durante uma rejeição total de carga, excluindo o efeito da abertura.do distribuidor	93
6.4	Modelagem da turbina como transformador modulado não linear com 20- SIM.....	93
6.5	Turbina, gerador e volante de inércia da Usina Antas II de Poços de Caldas.....	94
6.6	Representação com 20 SIM da inércia e da carga como fonte inversa modulada.....	95
6.7	Perdas de torque (esquerda) e por escorregamento (direita) modeladas com resistências.....	95
6.8	Perda de torque modelada com uma fonte inversa controlada.....	96
6.9	Perdas de torque moduladas com a vazão e a velocidade.....	97
6.10	Vista do servomotor principal do regulador da Usina Santa Clara (M.G.).....	98
6.11	Diagrama de blocos de um regulador com estatismo nulo, limitadores de velocidade e posição, e tabela de correção da abertura.....	100
6.12	GL de um sistema hidrelétrico isolado modelado com 20 SIM.....	101
6.13	Porção do diagrama de colina da turbina estudada.....	102
6.14	Curvas correspondentes às tabelas da figura 6.12 para o caso proposto por Wylie e Streeter.....	103
6.15	Obtenção das condições iniciais automaticamente.....	103
6.16	Simulação da rejeição parcial de carga com TURB.FOR.....	104
6.17	Simulação da rejeição parcial de carga com 20-SIM.....	104
6.18	Simulação de rejeição total de carga com TURB.FOR.....	105
6.19	Simulação de rejeição total de carga com 20-SIM e distribuidor não linear.....	105
6.20	Simulação de rejeição total de carga com 20-SIM e distribuidor linear.....	106
6.21	Simulação de aceitação de carga com TURB.FOR.....	107
6.22	Simulação da aceitação de carga com 20 SIM.....	107
6.23	Rendimento pouco realista em função da vazão segundo o TURB.FOR.....	108
6.24	Vista panorâmica da Usina Hidrelétrica Santa Clara (M.G Brasil).....	108
6.25	Simulação rejeição total de carga com o programa SIPROHS da VOITH-HYDRO..	111
6.26	Rejeição total de carga na Usina Hidrelétrica Santa Clara.....	112

LISTA DE SÍMBOLOS

Caracteres Latinos

a	celeridade da onda de pressão [m/s]
A	área [m ²] matriz dos coeficientes das variáveis de estado
A_o	área da secção transversal do conduto
A(x)	área da válvula
B	matriz dos coeficientes das variáveis de estado
C	capacitância [F]
C₁	tipo de fixação do conduto
C_x	capacitância por unidade de comprimento
C_d	coeficiente de descarga da válvula
C_{pu}	capacitância fluida por unidade
C/x	capacitância por unidade de comprimento
D	diâmetro
E_c	energia cinética [J]
E_m	coeficiente característico da válvula
E_p	energia potencial [J]
E(t)	variável relacionada à fonte de esforço
E	módulo de elasticidade do material
e	esforço variável de estado espessura da parede do tubo
f	fluxo variável de estado fator de fricção
F	força [N]
F(t)	variável relacionada à fonte de fluxo
GY	girador
g	aceleração da gravidade
H_o	carga estática do sistema
H_R	altura do reservatório
H	carga hidráulica [m]
I	inertância
I_{pu}	inertância fluida em por unidade
I/x	inertância por unidade de comprimento
I	corrente elétrica [A]
J	momento total de inércia
k	compressibilidade
K	constante de proporcionalidade ganho
L	comprimento do tubo [m] indutância [H]
m	massa [kg] módulo do transformador
P_o	potência referência
Pe	potência no eixo [w]
p	quantidade de movimento
P	pressão [Pa]
ḡ	derivada da quantidade de movimento

p.u	por unidade
Q	vazão [m ³ /s]
Q_o	vazão de operação do sistema
q	deslocamento
R_{/Q}	resistência por unidade de vazão
r	módulo do girador
r_{pu}	resistência fluida em por unidade
R	resistência elétrica
R_v	resistência da válvula
R_{v/Q}	resistência por unidade de vazão da válvula
R_{pu}	resistência fluida em por unidade
R/x	resistência por unidade de comprimento
Se	fonte de esforço
Sf	fonte de fluxo
T	tempo [s]
TF	transformador
t_c	tempo de fechamento da válvula
T	torque [N.m]
T_o	torque correspondente à potência absorvida pelo gerador
T_d	constante de tempo do amortecedor
T_α	constante de tempo de prontidão
U	tensão [Volts]
u(t)	vetor coluna correspondente as variáveis de excitação
V	velocidade [m/s]
v_o	velocidade do escoamento em regime permanente
x	distância
y	abertura distribuidor [pu]
Z_o	impedância base

Caracteres Gregos

α	ângulo de inclinação do conduto grandeza unitária
ΔH	sobrepresão máxima
ΔU	queda de voltagem
δ	estatismo transitório
∂ / ∂	derivada parcial
η	rendimento [pu]
η_T	rendimento total [pu]
θ	ângulo de inclinação
Λ	grandeza qualquer
Λ_o	grandeza de referência
ρ	massa específica [kg/m ³]
σ	estatismo permanente
τ_o	tensão de cisalhamento
τ	lei de fechamento da válvula
ω	freqüência fundamental de oscilação velocidade angular [rd/s]

RESUMO

Estuda-se a simulação de fenômenos transitórios em tubulações e centrais hidrelétricas usando aplicativos de uso geral baseados na metodologia dos Grafos de Ligação. A modelagem com Grafos de Ligação tira proveito do intercâmbio de potência e das analogias entre os subsistemas hidráulico, mecânico e elétrico, permite descrever não linearidades importantes dos componentes, e pode utilizar-se para simular pequenas e grandes respostas transitórias. Apresenta-se um panorama sobre os aplicativos mais convenientes para o uso acadêmico.

Faz-se uma análise da modelagem das tubulações através de parâmetros concentrados versus distribuídos. As simulações do Golpe de Ariete em dois sistemas simples compostos de um reservatório, conduto forçado e válvula, dão resultados bastante exatos desde o ponto de vista prático nas comparações com simulações com método das características e dados experimentais.

Ao final, propõe-se uma modelagem original da turbina hidráulica como um transformador não linear e desenvolve-se um modelo de eficiência, carga elétrica e regulador de velocidade. Esta modelagem é usada para simular rejeições parcial e total de carga e aceitações de carga em dois sistemas de potência elétrica isolados: um caso tirado da literatura clássica e um estudo recente da Usina Hidrelétrica Santa Clara em Minas Gerais, Brasil. As comparações dos transitórios de velocidade e pressão com outros métodos e aplicativos especializados confirmaram a validade da modelagem da turbina e dos outros componentes.

ABSTRACT

The simulation of transient phenomena in pipes and hydroelectric power plants, using standard software based on the Bond Graphs approach, is investigated. The Bond Graphs modeling takes advantage of the power exchange and the analogies between the hydraulic, mechanic and electrical subsystems, permits to describe the major nonlinearities of the components, and can be used to simulate the small and large transient response. A survey about the most suitable software for academic use is presented.

The modeling of conduits through lumped parameters versus distributed ones is analyzed. The simulations of water hammer in two simple systems composed of reservoir, conduit and valve, give quite accurate results from the practical point of view when compared with simulations with the Method of Characteristics and experimental results.

Finally, a new model of hydraulic turbine as a nonlinear transformer is proposed and a model of efficiency, electric load and governor are developed. This modeling is used to simulate partial and total load rejection and load acceptance in two isolated electrical power systems: a case extracted from classical literature and a recent study of Santa Clara Hydroelectric Power Plant in Minas Gerais, Brazil. The comparisons of speed and pressure transients with another methods and specialized software confirmed the validity of the turbine and the others components modeling.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa da Dissertação

Os fenômenos transitórios em sistemas hidráulicos podem causar sérios problemas aos equipamentos e tubulações. O golpe de aríete é o fenômeno transitório de elevação (golpe de aríete positivo) ou diminuição (golpe de aríete negativo) da pressão provocado pelo fechamento ou abertura rápida do mecanismo de controle (válvula, injetor, distribuidor, etc.) de vazão em um conduto forçado. Um caso de interesse é o fechamento do distribuidor que o regulador de velocidade executa quando ocorre uma rejeição parcial ou total de carga em uma central hidrelétrica para limitar a sobrevelocidade do gerador e da turbina. O conhecimento deste fenômeno transitório é fundamental para o dimensionamento técnico e economicamente adequado dos sistemas hidráulicos.

O método mais utilizado para a simulação de transitórios hidráulicos é o denominado Método das Características, introduzido na década de 1960 por Streeter. As equações diferenciais parciais fundamentais: da quantidade de movimento e da continuidade que modelam uma tubulação são do tipo hiperbólicas e para serem solucionadas são expressas em forma de diferenças finitas e integradas numericamente no plano (x,t) com intervalos Δt e Δx constantes. Lamentavelmente, os programas computacionais baseados neste método resultam poucos flexíveis e têm a desvantagem de estar limitados a casos particulares e de apresentar dificuldades para modelar a interação entre os diferentes domínios de energia: hidráulico, mecânico, elétrico, etc., em uma central hidrelétrica. Seu principal mérito é sua exatidão por considerar a tubulação com parâmetros distribuídos.

Um método que não tem estas limitações e que começou a ser utilizado para este fim é a técnica dos Grafos de Ligação. O objetivo da sua criação foi superar as limitações dos modelos clássicos baseados em funções de transferência e diagrama de blocos que somente utilizam uma entrada e uma saída.

Curiosamente, esta técnica foi criada pelo professor Henry Paynter para modelar justamente a interação entre os subsistemas hidráulico, mecânico e elétrico no processo de geração hidrelétrica, embora tenha sido utilizada mais popularmente em outras aplicações.

Nos últimos anos vem sendo utilizada em forma crescente com o propósito inicial da sua criação (Tiago Filho, 1994; Carvalho 1995).

Então, a justificativa deste trabalho é a necessidade de aprofundar no estudo da aplicabilidade do método dos Grafos de Ligação na modelagem de centrais hidrelétricas para simulação de transitórios, vistas as suas vantagens e potencialidades. Uma motivação importante é a inexistência de antecedentes na literatura de modelagem de turbinas hidráulicas com esta metodologia.

1.2 Objetivo da Dissertação

O objetivo principal deste trabalho de dissertação é o estudo da utilização do método dos Grafos de Ligação na simulação de transitórios em centrais hidrelétricas. Particularmente se pretende verificar a aplicabilidade do método na determinação do golpe de aríete provocado pelo fechamento rápido de válvulas no conduto forçado e obter a modelagem da turbina hidráulica, regulador de velocidade e carga para simulação de rejeição parcial ou total da carga elétrica. Além disso, outro objetivo é fazer um estudo e revisão dos programas computacionais existentes no mercado que utilizam esta metodologia, especialmente os mais apropriados para uso acadêmico.

As simulações obtidas com os Grafos de Ligação são confrontadas com simulações obtidas pelo método das características, resultados experimentais e estudos realizados por empresas especializadas de engenharia na etapa de projeto de PCH com programas profissionais próprios.

1.3 Conteúdo da Dissertação

Este trabalho de dissertação está estruturado da seguinte maneira:

No Capítulo 2 são apresentadas as equações fundamentais do escoamento transitório e através da analogia entre circuitos hidráulicos e elétricos mostra-se a obtenção das grandezas dos circuitos hidráulicos nas formas: dimensional e em por unidade.

No Capítulo 3 é descrita a metodologia dos Grafos de Ligação: origem, elementos básicos, equações constitutivas, causalidades e exemplos de aplicação.

No Capítulo 4 é apresentada uma revisão dos programas computacionais que utilizam a metodologia dos Grafos de Ligação. Faz-se uma comparação entre eles e analisam-se facilidades de uso, preços e versões demo na *Web*.

No Capítulo 5 é apresentada a simulação do Golpe de Aríete com o método dos Grafos de Ligação, se analisa a modelagem do conduto forçado com parâmetros concentrados, modelagem da válvula e mostra-se a simulação de alguns casos propostos na literatura. Os resultados da simulação são comparados com os resultados obtidos pelo método das características. Apresenta-se uma análise da utilização de resistência linear versus resistência não linear e propõe-se uma correção da capacitância na modelagem do conduto forçado.

No Capítulo 6 é desenvolvida a modelagem não linear da turbina com os Grafos de Ligação. Apresenta-se um modelo simplificado de regulador de velocidade com diagrama de blocos e o modelo de um sistema hidrelétrico isolado. Mostra-se a validação da modelagem desenvolvida com Grafos de Ligação comparando com estudos de simulação de rejeições e aceitações de carga realizadas com outros métodos. Apresentam-se dois casos práticos: um exemplo proposto no livro clássico de Wylie e Streeter, e um estudo da Usina Hidrelétrica Santa Clara (Minas Gerais) recentemente fornecido pela VOITH SIEMENS para esta validação.

Finalmente no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões e sugestões do trabalho de dissertação.

1.4 Revisão Bibliográfica

Com o avanço da área numérica computacional, novas técnicas têm sido empregadas na solução e representação do equacionamento dos sistemas dinâmicos e atualmente, diversos métodos numéricos são utilizados para analisar os transitórios hidráulicos. Tais métodos substituíram os métodos algébricos e gráficos que devido a sua menor aproximação não são convenientes para a análise de grandes sistemas ou sistemas tendo condições de contorno complexas. O método das características introduzido na década de 1960 por Streeter (Wylie e Streeter, 1978, 1990, 1993) vem sendo usado largamente até os dias de hoje. Com o objetivo de superar as limitações já mencionadas anteriormente surgiram novas técnicas, sendo uma

delas a metodologia dos Grafos de Ligações. Este método baseia-se no conceito de analogias entre sistemas de distintas naturezas físicas com os sistemas elétricos. A evolução dos programas computacionais baseados nesta técnica permite atualmente simular em forma interativa diretamente da representação gráfica do sistema. Existem vários programas disponíveis no mercado entre os quais pode-se mencionar o 20-SIM, SYMBOLS 2000 e POWERDYNAMO, etc. Neste trabalho se utilizou o 20-SIM pela sua facilidade de uso, baixo custo e interface amigável com o usuário.

A metodologia dos Grafos de Ligação foi amplamente difundida desde a década de 1960 através dos livros de Karnopp e Rosenberg (1975, 1983, 2000) e Thoma (1975). Uma pesquisa realizada por Montbrum-Di Filippo; Brie e Paynter (1991) sobre teoria, aplicações e programas lista mais de 500 artigos e livros publicados sobre a metodologia até esse momento. Paynter (2000) publicou na *Web* um artigo sobre a gestação e nascimento do método dos Grafos de Ligação que inclui documentação original da década de 1950. Existem vários artigos introdutórios, por exemplo, Speranza Neto (1992) apresenta o emprego dos Grafos de Ligação em alguns problemas típicos na área de termociências com o objetivo de motivar pesquisadores e engenheiros a utilizarem esta metodologia. Kofman e Junco (1999) apresentam um ambiente computacional para a modelagem de sistemas dinâmicos usando a técnica.

Em aplicações hidráulicas se distinguem nos últimos anos os trabalhos de Tiago Filho (1994) que utilizou em sua tese de doutorado para a simulação do transitório hidráulico em um conduto, dotado de uma válvula de alívio anti-golpe de aríete e de Carvalho (1995) que analisou em sua dissertação de mestrado sua aplicabilidade na simulação de transitórios hidráulicos. Os programas utilizados nestes trabalhos requeriam algumas aproximações no modelo que faziam que os resultados não tivessem toda a exatidão desejável. Mais a sua evolução foi muito boa e estas restrições foram superadas completamente, ganhando em flexibilidade e facilidade de uso.

Diante das facilidades apresentadas, o presente trabalho de dissertação tem como objetivo o uso da metodologia dos Grafos de Ligação para simular o golpe de aríete no conduto forçado, e a determinação do modelo da turbina, regulador de velocidade e carga elétrica para simulação de rejeição parcial e total de carga e aceitação de carga, justificando o estudo devido a existência de interações de diferentes meios físicos. Para validar o método se utiliza um caso de referência baseado em resultados experimentais de laboratório publicados por Watt (1980) e por Wylie e Streeter (1978, 1990, 1993).

Na bibliografia recente destaca-se uma pesquisa paralela a desta dissertação de mestrado publicada em três artigos de C. Nicolet (2001, 2002, 2003) do Laboratório de Maquinas Hidráulicas do Instituto Federal Suíço de Tecnologia de Lausana (Suíça). O estudante de doutorado Nicolet está desenvolvendo na sua tese de doutorado um método denominado de impedância e implementou-o computacionalmente. Fundamentalmente este método se baseia, como a metodologia geral dos Grafos de Ligação, na analogia dos sistemas mecânicos e hidráulicos com os elétricos, daí a denominação de método de impedância, e permite simular a interação entre conduto forçado, turbina, regulador de velocidade e sistema elétrico durante fenômenos transitórios.

CAPÍTULO 2

EQUAÇÕES DIFERENCIAIS PARA TRANSITÓRIOS EM CIRCUITOS HIDRÁULICOS

2.1 Introdução

Transitório hidráulico é um dos mais importantes termos para descrever escoamentos não permanentes de fluidos em condutos forçados, cujas condições em qualquer ponto variam com o tempo. Por exemplo, a variação da pressão quando a velocidade de escoamento sofre alguma perturbação causada pela ação de algum mecanismo de controle do sistema (válvula, injetor, distribuidor, etc).

Durante o transitório hidráulico, as oscilações de pressão ao longo da tubulação ocorrem de maneira brusca provocando ruídos característicos comumente denominados “golpe de aríete”. Estas sobrepressões e subpressões podem causar sérios problemas ao conduto forçado e seus equipamentos, se estes não foram dimensionados para suportar tais sobrecargas, comprometendo a segurança e o funcionamento do sistema.

A análise do Golpe de Aríete consiste na determinação das pressões e velocidades em uma determinada seção de um conduto forçado no período em que ocorre um escoamento transitório. A quantificação das pressões máximas e mínimas é de importante interesse para o projetista, a fim de que este possa dimensionar a tubulação e introduzir equipamentos protetores, cuja finalidade é amortecer as variações de carga prejudiciais à vida útil da instalação.

O estudo está baseado nas denominadas equações do movimento e da continuidade. Estas duas equações hiperbólicas formam um sistema de equações diferenciais cuja solução exata não está disponível, sendo necessário utilizar técnicas específicas para se determinar uma solução aproximada do problema. Existem diferentes métodos para a solução destas equações, mais com algumas dificuldades na sua utilização, devido a diferentes suposições restritivas. Com a evolução de programas computacionais, estas dificuldades foram superadas e atualmente encontram-se programas de fácil uso e com resultados bastante precisos.

2.1.1 Causas dos Transitórios Hidráulicos

As causas mais comuns dos transitórios hidráulicos em sistemas de condutos sob pressão são devidas a manobras em algum equipamento hidromecânico do sistema. Por exemplo, no fechamento programado ou acidental das válvulas, pode produzir-se uma elevação anormal da pressão no conduto que antecede o mecanismo de controle ou regulação, e uma queda anormal da pressão no tubo de sucção conectado depois, enquanto na abertura pode produzir-se o fenômeno contrário. Também se podem mencionar outras causas de transitórios hidráulicos como:

- Alterações de potência em turbinas (rejeições de carga).
- Aumento ou diminuição da pressão, provocados por variações rápidas na vazão do conduto forçado.
- Instabilidade do regulador de velocidade da turbina.
- Vibrações nos distribuidores ou rotores de turbinas.
- Ondas de pressão no reservatório, câmara de carga ou chaminé de equilíbrio.
- Instabilidade no tubo de sucção devido aos escoamentos helicoidais.

2.2 Propagação das Ondas de Pressão no Sistema Hidráulico

O fenômeno do golpe de aríete é um intercâmbio de energia cinética em potencial e vice-versa. Quando se fecha uma válvula rapidamente, obedecendo ao princípio da conservação da energia, ao diminuir a energia cinética esta vai se transformando em um trabalho de compressão do fluido que enche o conduto e no trabalho necessário para dilatá-lo, produzindo então uma onda de pressão positiva (sobrepessão) ou golpe de aríete positivo. O fluido num ponto determinado do conduto possui uma energia cinética e potencial, resultando uma energia total conforme a equação (2.1):

$$E_t = E_c + E_p \quad (2.1)$$

ou seja:

$$E_t = \frac{V_1^2}{2} + \frac{P_1}{\tilde{\rho}} + g z_1 = \frac{V_2^2}{2} + \frac{P_2}{\tilde{\rho}} + g z_2 \quad (2.2)$$

onde: o índice **1** representa um tempo inicial t_1 e o índice **2** um tempo posterior t_2 e V é a velocidade do fluido

Como se está analisando um ponto determinado do conduto forçado, a altura é a mesma, portanto z_1 e z_2 podem ser simplificados de forma que a equação (2.2) fica:

$$\tilde{n} \frac{V_1^2}{2} + P_1 = \tilde{n} \frac{V_2^2}{2} + P_2 \quad (2.3)$$

Na equação (2.3) P_1 e P_2 representam a pressão estática enquanto que os termos da velocidade se associam com a pressão dinâmica. Então se pode expressar:

$$P_{total} = P_{estática} + 1/2\rho V^2 \quad (2.4)$$

Na equação (2.4) pode-se observar que no instante onde se produz a parada brusca do fluido (fechamento instantâneo da válvula), toda a energia cinética do fluido se transforma em energia potencial, portanto a pressão estática aumenta.

$$P_{total} = P_{estática} \quad (2.5)$$

Conseqüentemente observa-se que a pressão estática que afeta o conduto nesse instante é maior devido a esta transformação. Embora fisicamente seja impossível fechar instantaneamente uma válvula, o estudo inicial do caso de fechamento instantâneo ajuda a análise dos casos reais. A propagação das ondas de pressão em um sistema de adução será descrita a seguir, considerando-se o fechamento instantâneo de uma válvula e um caso sem atrito. O ciclo completo ou período inicia-se quando do fechamento desta válvula ($t = 0$) onde o fluido é comprimido e tem sua velocidade reduzida a zero.

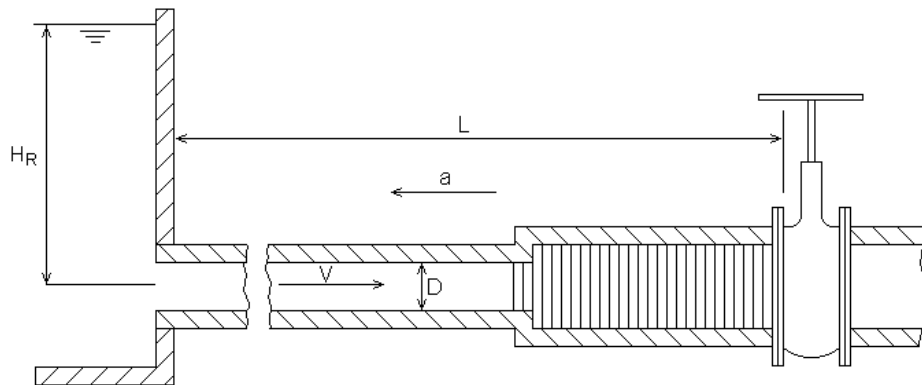


Figura 2.1- Onda de pressão no fechamento instantâneo de uma válvula

Ao fechar-se instantaneamente a válvula da figura 2.1 a parede do conduto é dilatada. Se o fluido for dividido em camadas, a primeira camada é comprimida e o processo se propaga para as próximas camadas. O fluido continua a mover-se do reservatório para a válvula e a velocidade diminuindo até que as camadas sucessivas tenham sido comprimidas. Na válvula se originou uma onda de pressão que se propaga com velocidade a , a qual no instante considerado tem sentido contrário à velocidade V do fluido, se formou uma onda elástica ou seja uma onda de pressão que se propaga pelo conduto, se reflete no reservatório, volta para a válvula, novamente ao reservatório e assim sucessivamente originando sobrepressões e subpressões no conduto o qual se dilata ou se contrai. Sendo a a velocidade da onda e L o comprimento do conduto, o tempo que demora a onda em recorrer uma vez a distância entre a válvula e o reservatório é $t_0 = L/a$. Ao final de um tempo $t = 4t_0 = 4L/a$ o ciclo se repete. Considera-se nas figuras seguintes a série dos acontecimentos no conduto durante um período $T = 4L/a$.

A figura 2.2 mostra o sistema hidráulico em regime permanente (sem perturbação). O fluido se move com velocidade V do reservatório para a válvula. O diâmetro do conduto forçado é normal.

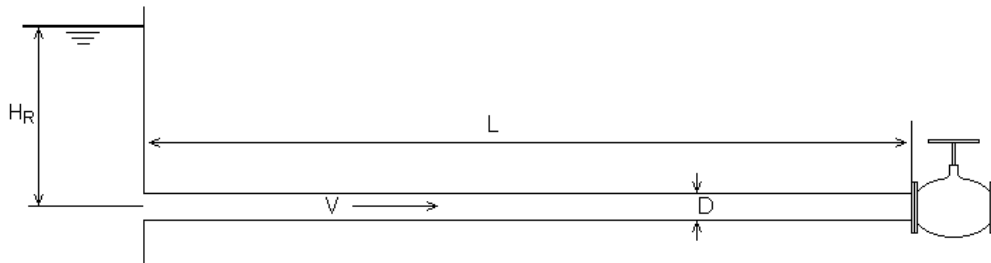


Figura 2.2 - Fechamento instantâneo da válvula de um conduto forçado (sem perturbação)

A válvula fecha instantaneamente ($t = 0$). A velocidade do fluido se anula a partir da válvula, em todo o conduto forçado.

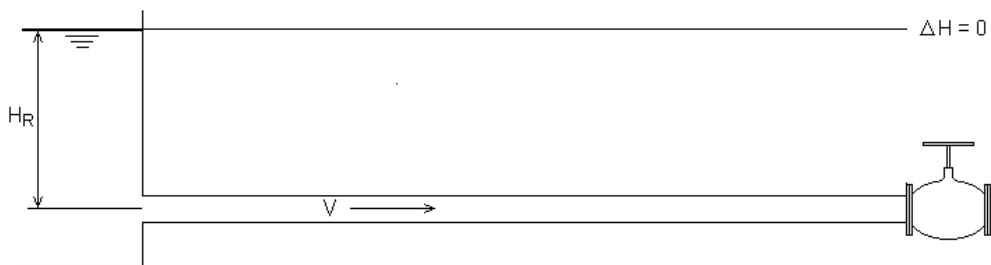


Figura 2.3 - Válvula totalmente fechada ($t = 0$)

A onda de pressão se propagou ao reservatório com celeridade a e a frente da onda chegou até a metade do conduto forçado. A metade direita do conduto foi dilatada pela sobrepressão, e na metade esquerda o diâmetro é normal. Nesta metade esquerda o fluido segue escoando com velocidade V para a válvula. Na metade direita $V = 0$.

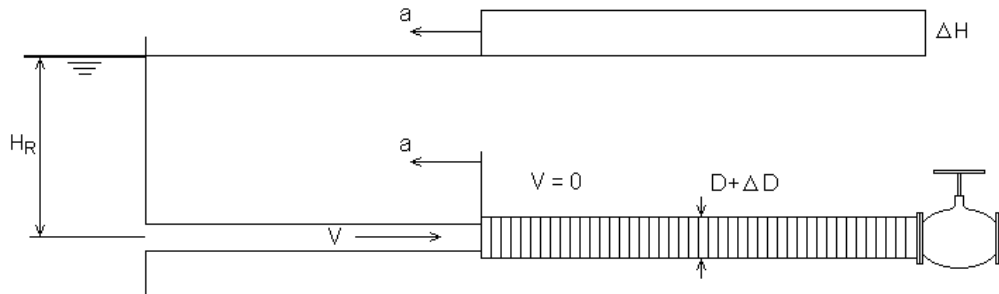


Figura 2.4 - Tempo $L/2a$

A onda de pressão chegou ao reservatório. Em todo o conduto forçado o fluido está em repouso, $V = 0$, mas não está em equilíbrio. O conduto forçado está todo dilatado. Como uma mola se expande, o fluido no conduto forçado começa a escoar com velocidade V , mas em sentido contrário ao da figura 2.2. Ele começa mover-se pelas camadas próximas ao reservatório.

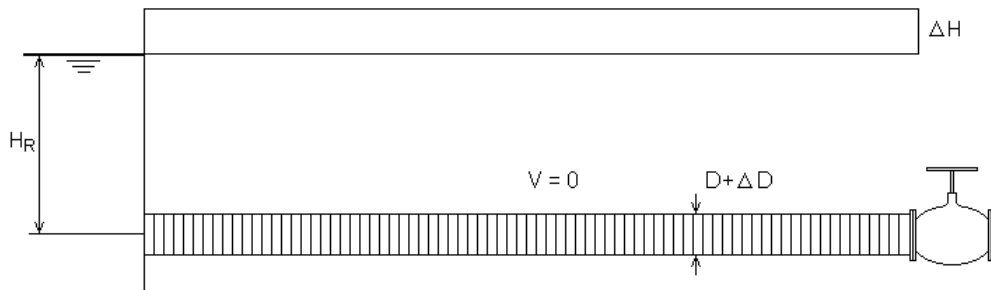


Figura 2.5 - Tempo L/a

A metade esquerda do conduto forçado voltou ao seu diâmetro normal. A onda segue propagando-se à direita do conduto com velocidade a . Na metade esquerda do conduto o fluido escoar com velocidade V .

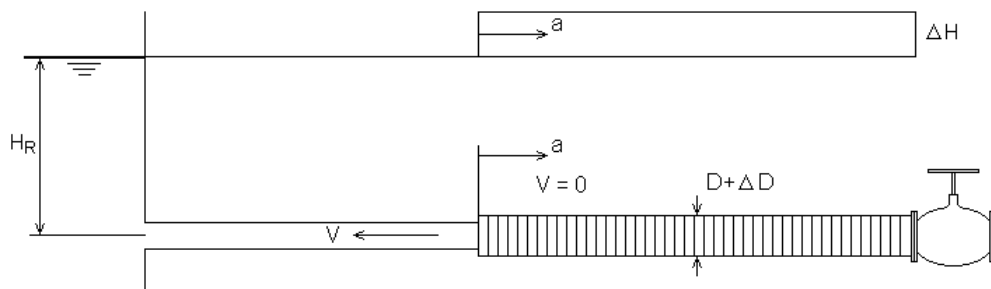


Figura 2.6 - Tempo $3L/2a$

O diâmetro de todo o conduto forçado está normal. Todo o fluido do conduto forçado se move da válvula ao reservatório com velocidade V contrária a das figuras 2.2, 2.3 e 2.4. Não há sobrepressão em nenhuma parte do conduto, mas pela inércia a pressão continua diminuindo, a onda elástica segue propagando-se, agora com depressão desde a válvula ao reservatório com a velocidade a . O diâmetro do conduto forçado irá diminuindo com valores abaixo do seu diâmetro normal.

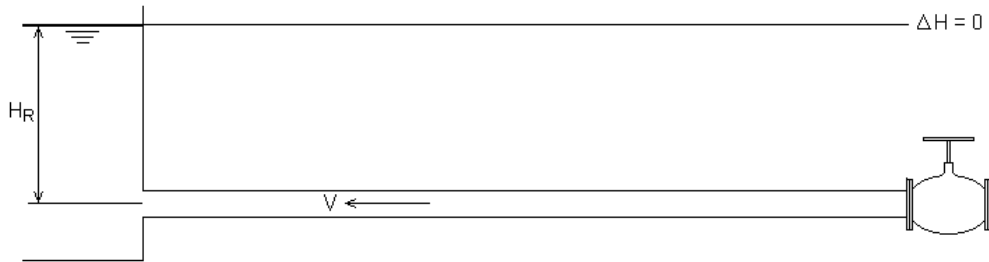


Figura 2.7 - Tempo $2L/a$

A depressão alcançou a metade do conduto forçado. A metade direita do conduto contém o fluido em repouso e a uma pressão abaixo da normal. O diâmetro do conduto nesta metade é inferior ao normal.

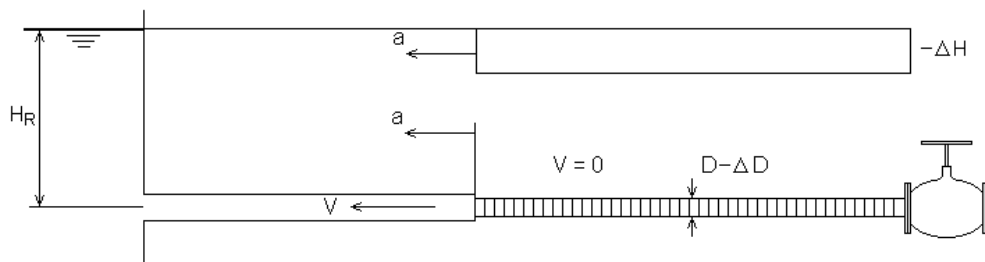


Figura 2.8 - Tempo $5L/2a$

O fluido em todo o conduto está em repouso, mas não está em equilíbrio, e o fluido inicia seu movimento desde o reservatório com direção à válvula com velocidade V com sentido à direita. O diâmetro de todo o conduto forçado é inferior ao normal.

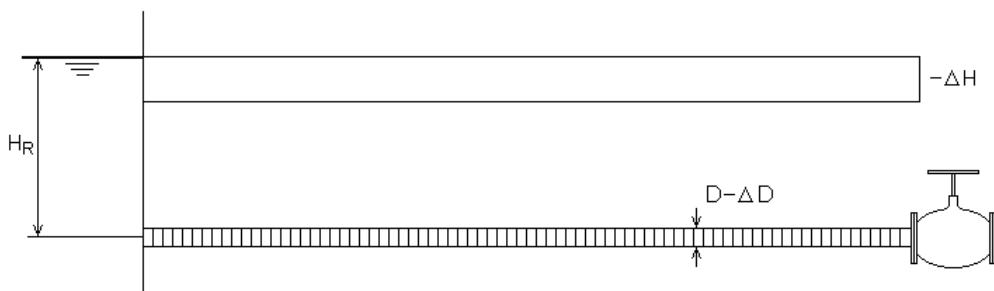


Figura 2.9 - Tempo $3L/a$

Na metade esquerda do conduto forçado o fluido está em movimento com velocidade V em direção à válvula. Na metade direita o fluido continua em repouso e em depressão. O diâmetro da parte esquerda do conduto é normal e na metade direita é menor que o normal; a e V tem o mesmo sentido.

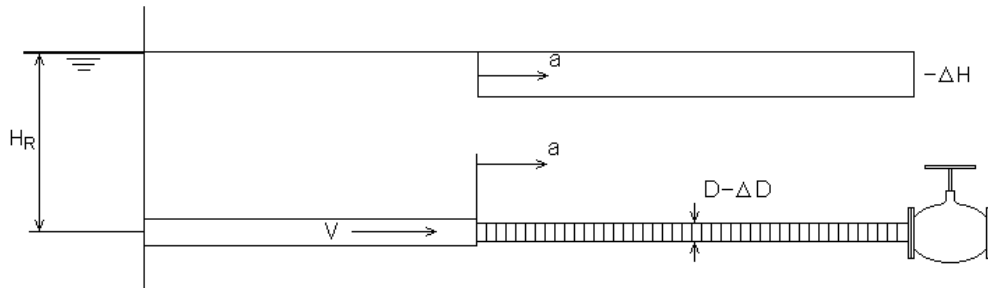


Figura 2.10 - Tempo $7L/2a$

O diâmetro do conduto forçado está normal. Todo o fluido em movimento com velocidade V com direção à válvula. No instante $4L/a$ as condições são exatamente as mesmas do que no instante de fechamento para $t = 0$. Esse processo é então repetido a cada $4L/a$ indefinidamente para o caso sem atrito. Portanto o período deste movimento é dado por: $T = 4t_0 = 4L/a$. Com a ação do atrito no fluido, a imperfeita elasticidade do fluido e parede do conduto forçado, as oscilações de pressão são amortecidas até que o fluido permanentemente retorne à condição de repouso.

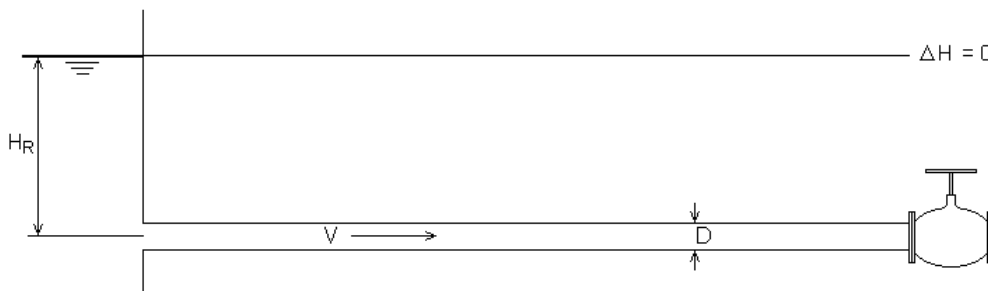


Figura 2.11 - Tempo $4L/a = T = \text{período}$

2.2.1 Celeridade das Ondas de Pressão

A celeridade das ondas de pressão (Wylie eStreeter, 1990) representa a velocidade de propagação do som em um meio fluido infinito com propriedades k e ρ , compressibilidade e massa específica, representada pela seguinte expressão:

$$a = \sqrt{\frac{k}{\rho}} \tag{2.6}$$

Se o meio for finito, como é o interior de um tubo, faz-se necessário a introdução de elementos modificadores que levem em conta o módulo de elasticidade **E**; e as características geométricas do tubo (diâmetro **D**; a espessura da parede **e**) e o tipo de fixação do conduto **C₁**.

$$a = \frac{\sqrt{\frac{k}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{k \cdot D}{e \cdot E} C_1}} \quad (2.7)$$

onde: o numerador representa a velocidade de propagação do som em um meio fluido infinito com propriedades **k** e **ρ**, e o denominador é o elemento modificador do som pelo fato do meio não ser infinito e sim confinado num tubo de diâmetro **D**, espessura **e**, e módulo de elasticidade **E**.

No caso de sistemas hidráulicos a equação (2.7) é conhecida como de Allievi, e fica:

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + k \cdot \frac{D}{e}}} \quad (2.8)$$

onde: **k** é o coeficiente função do módulo de elasticidade do material que constitui o tubo

D é o diâmetro do tubo

e é a espessura do tubo

O coeficiente **k** para os materiais mais comuns são os seguintes:

Aço	0,5
Ferro fundido	1
Fibrocimento	4,4
Plástico, PVC	18
Madeira	20

2.2.2 Tempo de Reflexão da Onda no Conduto

Define-se por tempo de reflexão da onda no conduto ao tempo **T** que leva a onda de pressão para deslocar-se desde a válvula até o reservatório, retornando novamente até a

válvula, ou seja, é duas vezes o tempo de viagem da onda no conduto, conforme equação (2.9):

$$T = \frac{2L}{a} \quad (2.9)$$

onde: L é o comprimento do conduto

a é a celeridade da onda de pressão

As manobras que ocasionam os transitórios hidráulicos como o fechamento de uma válvula ou do distribuidor de uma turbina são classificadas por comparação entre o tempo t_c que dura a manobra e o tempo T (Zulcy et al., 1999).

Se $t_c < T$, manobra rápida, não recomendável para centrais hidrelétricas

Se $t_c = T$, manobra crítica

Se $t_c > T$, manobra lenta, recomendável para centrais hidrelétricas

A sobrepressão máxima provocada pelo fechamento brusco de uma válvula, manobra rápida, pode ser estimada pela fórmula clássica de Joukowsky (Abreu et al., 1995):

$$\Delta H = \frac{a \cdot V_o}{g} \quad (2.10)$$

onde: V_o é a velocidade do escoamento em regime permanente e g a aceleração da gravidade

Se a manobra é lenta a sobrepressão máxima pode ser estimada pela fórmula de Michaud (Zulcy et al., 1999).

$$\Delta H = \frac{2L \cdot V_o}{g t_c} \cong 0,2 \cdot \frac{L V_o}{t_c} \quad (2.11)$$

cujas variáveis já foram definidas anteriormente.

2.3 Equações Fundamentais para o Escoamento Transitório

A fim de desenvolver o método e a solução de problemas de transitórios hidráulicos, duas equações fundamentais básicas da mecânica são aplicadas a um curto trecho de fluido para obtenção das equações do movimento e da continuidade. Elas devem ser resolvidas simultaneamente e fornecem a carga e a vazão numa determinada posição da tubulação em função do tempo. Essas equações formam um sistema de equações diferenciais parciais do tipo hiperbólico quase-linear cuja solução analítica exata não se pode determinar, contudo, desprezando ou linearizando os termos não lineares, diversos métodos gráficos, analíticos e numéricos foram desenvolvidos para se chegar a uma solução aproximada. As variáveis dependentes são a pressão P e a velocidade V , numa determinada seção transversal do conduto, sendo considerada positiva a velocidade na direção de montante para jusante. As variáveis independentes são a distância x , medida na tubulação com origem na extremidade de montante e o tempo t . Portanto $P = P(x,t)$ e $V = V(x,t)$. No estudo desse escoamento em regime transitório, segundo Wylie e Streeter (1990) são feitas as seguintes hipóteses:

- O escoamento é unidimensional
- O tubo permanece cheio de água durante todo o tempo
- A pressão mínima do fluido é superior à pressão de vaporização
- A velocidade do fluido é uniforme em toda a seção do tubo
- A tubulação e o fluido são perfeitamente elásticos
- As perdas por atrito no regime transitório são as mesmas do regime permanente

2.3.1 Equação do Movimento

A equação do movimento é obtida a partir do escoamento de um fluido em um tubo cônico ou cilíndrico. A equação considera a pressão na linha de centro do tubo $P(x,t)$ e a velocidade média $V(x,t)$. Por conveniência dos sistemas hidráulicos essa equação é convertida na forma de carga hidráulica $H(x,t)$, também chamada de altura, carga piezométrica ou simplesmente carga, e vazão $Q(x,t)$. A carga $H(x,t)$ e a vazão $Q(x,t)$ são variáveis dependentes, x e t são as variáveis independentes. A figura 2.12 mostra um elemento fluido de seção transversal com área A e a espessura δx .

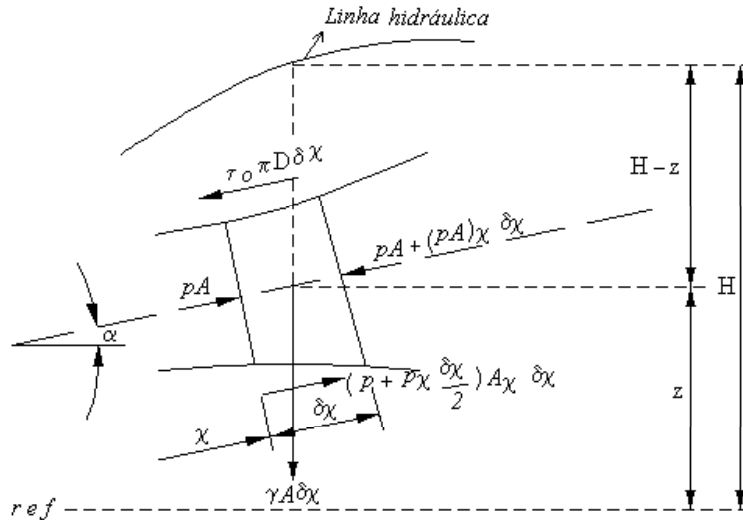


Figura 2.12 - Volume de controle para a equação do movimento

O tubo é inclinado em relação à horizontal de um ângulo α . As forças atuantes no sistema na direção x são as forças de pressão normais às superfícies transversais, a força lateral exercida pelo tubo no fluido e a força cortante devido ao atrito do fluido. Em função da gravidade, adiciona-se uma componente da força peso na direção de x . A força de cisalhamento τ_0 age na direção $-x$.

O somatório de forças é igual à massa vezes a aceleração (segunda lei de Newton). Aplicando-se a segunda lei e fazendo-se as simplificações necessárias, obtém-se a equação diferencial do movimento:

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f V |V|}{2D} = 0 \quad (2.12)$$

No último termo da equação 2.12, como o atrito se opõe ao movimento, expressa-se V^2 como $V|V|$ para introduzir o sinal adequado ao termo.

2.3.2 Equação da Continuidade

A equação da continuidade é obtida a partir do princípio de conservação de massa aplicada a um volume de controle de comprimento δx em um instante t , conforme mostra a figura 2.13.

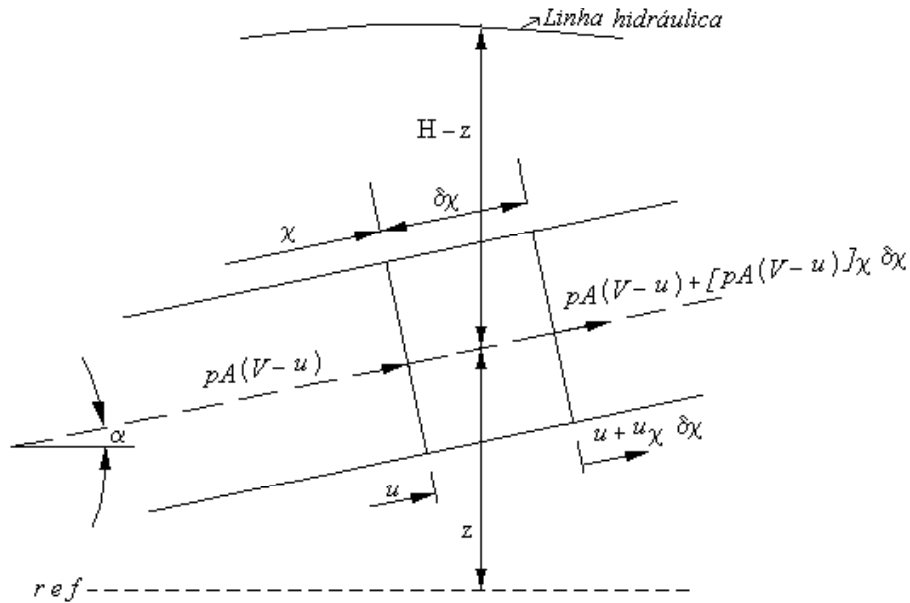


Figura 2.13 - Volume de controle para a equação da continuidade

Portanto, aplicando-se a lei de conservação de massa para este volume de controle, e fazendo-se as simplificações e rearranjos necessários, obtém-se a equação diferencial da continuidade, que considera o efeito da compressibilidade da água bem como o efeito de elasticidade do tubo:

$$V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} - V \operatorname{sen} \alpha + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.13)$$

É uma forma conveniente para a equação da continuidade com **V** e **H** como variáveis dependentes e com **x** e **t** como variáveis independentes. A celeridade **a** representa as propriedades do fluido e da tubulação.

2.3.3 Forma Simplificada das Equações Fundamentais

Representando a equação do movimento dada pela equação (2.12) em termos de altura **H** e vazão **Q**, sabendo que $V = Q/A$ e desprezando-se o termo convectivo $V \partial V / \partial x$ obtém-se:

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{fQ|Q|}{2gDA^2} = 0 \quad (2.14)$$

A equação (2.14) constitui a “Equação fundamental do modelo rígido”, traduz o comportamento transitório do escoamento de um líquido no interior de uma tubulação rígida e para a sua integração é necessário especificar as condições iniciais ($t = 0$).

Da mesma forma representando a equação da continuidade dada pela equação (2.13) em termos de altura H e vazão Q e desprezando-se o termo convectivo $V \partial H / \partial x$ e o terceiro termo obtém-se:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{Ag}{a^2} \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (2.15)$$

Uma observação importante relativa à condutos onde a celeridade apresenta valores baixos ou em que a quantidade de gás dissolvido na água é elevada, os termos convectivos bem como a inclinação do conduto passam a influenciar o fenômeno. Nestes casos, portanto os termos desprezados deverão ser considerados visando maior precisão dos resultados.

2.3.4 Considerações sobre as Equações Fundamentais

A equação (2.12) aplica-se a um escoamento não permanente e é verificada para o caso especial de escoamento permanente. De fato, se o regime é permanente com velocidade V , $\partial V / \partial t = 0$ e $H = H(x)$ substituindo estes valores resulta a equação (2.16):

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f V |V|}{2 g D} = 0 \quad (2.16)$$

Integrando a equação (2.16) obtém-se a expressão de Darcy-Weisbach, que fornece a perda de carga por unidade de comprimento:

$$\frac{\Delta H}{\Delta x} = - \frac{f V |V|}{2 g D} \quad (2.17)$$

Para o caso ideal, ou seja, sem atrito, substituindo $f = 0$ na equação (2.14) obtém-se:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} = -\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2.18)$$

Integrando a equação (2.18) pode-se ver que a diferença de carga por unidade de comprimento é utilizada para acelerar o líquido.

2.4 Métodos de Resolução das Equações Diferenciais

Atualmente, diversos métodos numéricos são utilizados para analisar os transitórios hidráulicos. Tais métodos substituíram os métodos algébricos e gráficos que devido a sua menor aproximação não são convenientes para a análise de grandes sistemas ou sistemas tendo condições de contorno complexas. Dos métodos numéricos utilizados destacam-se o Método das Características, o Método das Diferenças Finitas e o Método dos Elementos Finitos. O método das características introduzido na década de 1960 por Streeter é o mais utilizado para a simulação de transitórios hidráulicos. As equações diferenciais parciais fundamentais da quantidade de movimento e da continuidade que modelam uma tubulação, são expressas em forma de diferenças finitas e integradas numericamente no plano (x,t) com intervalos Δt e Δx constantes, ou seja, os parâmetros são considerados em forma aproximada como distribuídos. Os programas computacionais baseados neste método resultam poucos flexíveis e tem a desvantagem de estar limitados a casos particulares e de apresentar dificuldades para modelar a interação entre os diferentes domínios de energia.

Um método que não tem estas limitações, e que está sendo utilizado nos últimos anos para este fim, é a técnica dos Grafos de Ligação. Esta técnica baseia no fluxo de potência entre os componentes do sistema e através de sinais, linhas e símbolos próprios, permite representar graficamente o modelo físico do sistema com parâmetros concentrados. Como foi mencionado no capítulo 1, esta técnica foi criada pelo professor Henry Paynter do MIT para modelar justamente a interação entre os subsistemas hidráulico, mecânico e elétrico no processo de geração hidrelétrica, embora tenha sido utilizada mais popularmente em outras aplicações de Engenharia Mecânica. Nos últimos anos vem sendo utilizada em forma crescente com o propósito inicial da sua criação.

A vantagem dos Grafos de Ligação é o de fornecer todas as informações necessárias à modelagem matemática do sistema através da representação física, e obtenção das equações de estado do mesmo. A evolução dos programas computacionais baseados nesta técnica permite atualmente simular em forma interativa diretamente da representação gráfica do sistema, conforme será visto no Capítulo 3.

2.5 Analogia entre Circuitos Hidráulicos e Elétricos: Resistência, Inertância e Capacitância Fluida

A metodologia dos Grafos de Ligação baseia-se no conceito de analogias entre sistemas de distintas naturezas físicas com os sistemas elétricos. Para mostrar a analogia entre os sistemas hidráulicos e elétricos considera-se o pequeno elemento de uma linha de transmissão esquematizado na figura 2.14,

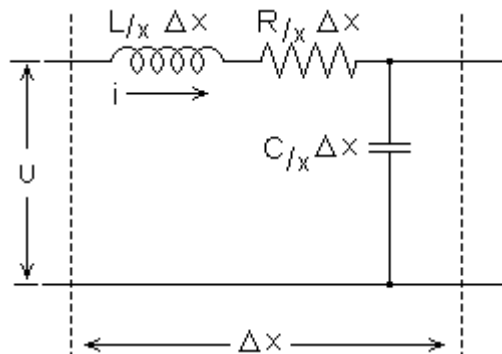


Figura 2.14 - Pequeno elemento de uma linha de transmissão

onde: U é a tensão entre os nós [Volts]

i é a corrente elétrica [Ampère]

L/x é a indutância [Henry/m]

R/x a resistência [Ohm/m]

C/x é a capacitância [Farad/m].

A seguir mostra-se a modelagem do circuito, onde a queda de tensão no indutor e resistência se calcula com a seguinte equação:

$$-\Delta U = L/x \Delta x \frac{\partial i}{\partial t} + R/x \Delta x i \quad (2.19)$$

A equação (2.19) pode ser escrita como:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -L_{/x} \frac{\partial i}{\partial t} - R_{/x} i \quad (2.20)$$

A corrente no capacitor pode ser calculada com a seguinte equação:

$$- \Delta i = C_{/x} \Delta x \frac{\partial U}{\partial t} \quad (2.21)$$

A equação (2.21) pode ser escrita como:

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -C_{/x} \frac{\partial U}{\partial t} \quad (2.22)$$

Comparando as equações (2.20) e (2.22) com as equações fundamentais do circuito hidráulico (2.14) e (2.15), pode-se estabelecer as seguintes analogias. Substituindo $H = P/\rho g$ na equação (2.14) e fazendo as simplificações correspondentes se obtém a seguinte equação:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{\rho}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{\rho f |Q| Q}{2 D A^2} \quad (2.23)$$

Substituindo H na equação (2.15) e também fazendo as simplificações correspondentes se obtém a equação:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{-A}{\rho a^2} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2.24)$$

Comparando a equação (2.23) do escoamento transitório com a equação (2.20) do circuito elétrico pode-se estabelecer as seguintes analogias:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{\rho}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{\rho f |Q| Q}{2 D A^2} = -I_{/x} \frac{\partial Q}{\partial t} - R_{/x} Q \quad (2.25)$$

Portanto:

$$I_{/x} = \frac{\rho}{A}, \quad R_{/x} = \frac{\rho f |Q|}{2DA^2} \quad (2.26)$$

onde: $I_{/x}$ é a inércia por unidade de comprimento devido à massa do fluido, ou indutância hidráulica por unidade de comprimento

$R_{/x}$ é a resistência por unidade de comprimento devido à perda por atrito ou resistência hidráulica por unidade de comprimento

Comparando a equação (2.24) do escoamento transitório com a equação (2.22) do circuito elétrico pode-se estabelecer as seguintes analogias:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{-A}{\rho a^2} \frac{\partial P}{\partial t} = -C_{/x} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2.27)$$

Portanto:

$$C_{/x} = \frac{A}{\rho a^2} \quad (2.28)$$

onde: $C_{/x}$ é a capacitância por unidade de comprimento devido à deformabilidade do conjunto fluido-conduto ou capacitância fluida por unidade de comprimento.

Para um trecho do conduto de comprimento L pode-se reescrever $I_{/x}$, $R_{/x}$, $C_{/x}$ como valores totais de Inércia, Resistência e Capacitância.

Para Inércia fluida obtém-se:

$$I = \frac{\rho L}{A} \quad (2.29)$$

A inércia fluida representa a inércia da massa contida no interior de um trecho de tubo. É a capacidade do fluido em acumular energia na forma cinética. A inércia fluida é proporcional à massa específica do fluido ρ , ao comprimento do tubo L , e inversamente proporcional à área da seção transversal do tubo.

Para a Capacitância fluida obtém-se:

$$C = \frac{AL}{\rho a^2} \quad (2.30)$$

A capacitância fluida é o elemento que leva em conta a compressibilidade do fluido e a deformabilidade das paredes do conduto forçado. É a capacidade do sistema em acumular energia na forma potencial.

Para a resistência fluida obtém-se:

$$R = \frac{\rho f L |Q|}{2DA^2} \quad (2.31)$$

A parte constante da expressão anterior pode ser denominada resistência em por unidade de vazão e será expressa pela letra $R_{/Q}$ conforme se mostra na seguinte equação:

$$R_{/Q} = \frac{\rho f L}{2DA^2} \quad (2.32)$$

A resistência fluida corresponde à dissipação de energia, em sistemas hidráulicos, na sua forma mais simples está associada à perda por atrito viscoso ao longo do conduto forçado.

2.5.1 Grandezas Por Unidade

Muitos dos sistemas de controle são complexos e envolvem componentes de diferentes naturezas físicas resultando difícil a comparação entre as distintas variáveis. Para superar essas dificuldades, se aconselha trabalhar com todas as variáveis e parâmetros expressos na mesma dimensão e ordem de grandeza. O procedimento para isso é referindo todas as variáveis aos valores tomados como base. As grandezas assim dimensionadas são especificadas em [pu] ou por unidade. Por exemplo: sendo Λ uma grandeza qualquer e Λ_0 a grandeza de referência tomada como base, a grandeza α por unidade será:

$$\alpha = \frac{\Lambda}{\Lambda_0} [p.u]$$

Considerando as seguintes grandezas básicas para o sistema hidráulico:

P_0 é a potência tomada como referência

Q_0 é a vazão de operação do sistema

A_o é a área da seção transversal do conduto

H_o é a carga estática do sistema

Da analogia entre o sistema hidráulico e elétrico a pressão P com a tensão U e a vazão Q com a corrente i pode-se escrever as equações:

Sistema elétrico: $Z_o = \frac{U_o}{i_o}$, onde: Z_o impedância base

Sistema hidráulico por analogia: $Z_o = \frac{P_o}{Q_o}$

Utilizando as expressões anteriores obtém-se a equação para a resistência fluida em [pu] dada pela equação (2.33):

$$R_{pu} = \frac{R_{/Q}}{Z_o} = R_{/Q} \frac{Q_o}{P_o} \quad (2.33)$$

Substituindo o valor de $R_{/Q}$ da equação (2.32) em (2.33) e $P_o = \rho g H_o$, obtém-se a resistência fluida por unidade conforme mostra-se na equação (2.34):

$$R_{pu} = \frac{f L Q_o}{2 g D_o A_o^2 H_o} \quad (2.34)$$

A inércia fluida em [pu] se calcula como:

$$I_{pu} = \frac{I}{Z_o} = I \frac{Q_o}{P_o} \quad (2.35)$$

Substituindo o valor de I da equação (2.29) na equação anterior obtém-se a inércia fluida por unidade:

$$I_{pu} = \frac{Q_o L}{A_o g H_o} \quad (2.36)$$

A capacitância fluida em [pu] se calcula como:

$$C_{pu} = C \frac{P_o}{Q_o} \quad (2.37)$$

Substituindo o valor de C da equação (2.30) na equação (2.37) obtém-se a capacitância fluida por unidade:

$$C_{pu} = \frac{g A_o H_o L}{a^2 Q_o} \quad (2.38)$$

2.6 Conclusões

Foram mostrados os fundamentos sobre transitórios hidráulicos como fenômenos de ondas viajantes de pressão e vazão e a modelagem matemática de tubulações através das equações diferenciais hiperbólicas do movimento e da continuidade. Discutiram-se brevemente as limitações da solução numérica desta modelagem de parâmetros distribuídos com o método das características, e a proposta de utilização da metodologia dos Grafos de Ligação baseada em parâmetros concentrados. Mostraram-se as analogias entre circuitos hidráulicos e elétricos nas quais se baseia a metodologia dos Grafos de Ligação, e apresentaram-se as equações de inércia, capacitância e resistência concentrada para um trecho de tubulação de longitude finita que serão utilizados nos capítulos seguintes. Mostrou-se uma forma baseada na analogia dos circuitos hidráulicos com os elétricos de se expressar em por unidade as grandezas que representam os componentes concentrados.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA DOS GRAFOS DE LIGAÇÃO

3.1 Origem dos Grafos de Ligação

O termo Grafos de Ligação (GL), tradução do termo original *Bond Graphs*, é bastante apropriado para designar esta metodologia devido ao fato que a sua principal característica é a de ligar os componentes de um sistema através de símbolos próprios e sinais, que permitem representar graficamente o modelo físico do sistema. É uma ferramenta poderosa na modelagem de sistemas dinâmicos e baseia-se no conceito de analogias entre os sistemas de distintas naturezas físicas com os sistemas elétricos.

Esta metodologia foi criada em 1959 pelo professor Henry Paynter 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 de GL, outros à aplicação do método em diferentes campos, e ainda alguns ao desenvolvimento de programas de computador usando este método.

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 de GL, de acordo a Paynter foi para generalizar o conceito de diagrama de circuito elétrico, como também para eliminar algumas de suas limitações (Paynter, 2000).

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 como 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 GL como uma disciplina formal.

Esta técnica foi amplamente difundida nos Estados Unidos desde a década de 1960 por Karnopp e Rosenberg (1978, 2000), professores nas Universidades da Califórnia e Michigan respectivamente, e na Europa por Thoma (1975). No Brasil se distinguem os trabalhos dos professores Speranza Neto da PUC (1992,1995) e Tiago Filho da UNIFEI (1994), e na Argentina as pesquisas e o desenvolvimento de aplicativos realizados pelos professores Kofman e Junco (1999) da UNR.

3.2 Elementos Básicos dos Grafos de Ligação

Este capítulo baseia-se no livro de D. Karnopp e R. Rosenberg (2000) e no trabalho desenvolvido por Tiago Filho (1994). Na metodologia dos GL são encontrados nove elementos básicos: as fontes de esforço S_e , as fontes de fluxo S_f , as resistências R , os capacitores C , as inertâncias I , os transformadores TF , os giradores GY e as junções “0” e “1”, que representam respectivamente os geradores de potência, os dissipadores, os acumuladores de energia e os elementos de acoplamento. A combinação desses elementos em forma conveniente descreve o modelo físico de um sistema através de uma representação gráfica usando simbologia própria, que além de permitir a visualização das conexões entre os vários elementos do sistema, traz implícito todo o equacionamento do modelo

Um modelo de GL 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. Independentemente do seu domínio físico, dois componentes são modelados pelo mesmo elemento dos GL se processam a energia da mesma forma. Este fato motiva a generalização das variáveis físicas em quatro tipos:

- Variáveis de Potência : esforço (e) e fluxo (f)
- Variáveis de Energia : quantidade de movimento (p) ou momentum e deslocamento (q)

As variáveis de esforço $e(t)$ e de fluxo $f(t)$ são chamadas de variáveis de potência porque o produto dessas duas variáveis consideradas como funções do tempo, é igual à potência instantânea que flui entre os dois componentes conectados pela ligação conforme indicado na equação (3.1).

$$P(t) = e(t).f(t) \quad (3.1)$$

As variáveis de energia são definidas pelas integrais no tempo das variáveis de potência. A quantidade de movimento é representada de acordo a equação (3.2) e o deslocamento conforme a equação (3.3).

$$p = \int^t e(t) dt \tag{3.2}$$

$$q(t) = \int^t f(t) dt \tag{3.3}$$

A tabela 3.1 mostra em cada domínio físico uma possível generalização com as respectivas variáveis.

Tabela 3.1: Variáveis generalizadas

Domínio físico	Variáveis de Potência		Variáveis de Energia	
	Esforço e	Fluxo f	Quantidade movimento p	Deslocamento q
Mecânico Translação	Força	Velocidade	Quantidade movimento	Posição
Mecânico Rotação	Torque	Velocidade angular	Quantidade movimento	Ângulo
Hidráulico	Pressão	Vazão volumétrica	Quantidade movimento	Volume
Elétrico	Tensão	Corrente	Fluxo magnético	Carga elétrica
Químico	potencial químico	Fluxo molar		Número de moles
Termodinâmico	Temperatura	Fluxo de entropia		Entropia

O elemento fundamental desta técnica é o de ligação, representado por uma barra onde são indicadas as variáveis de energia ou de potência devidamente indexadas. Através da meia seta conforme se mostra na figura 3.1, 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, e 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 3.1.

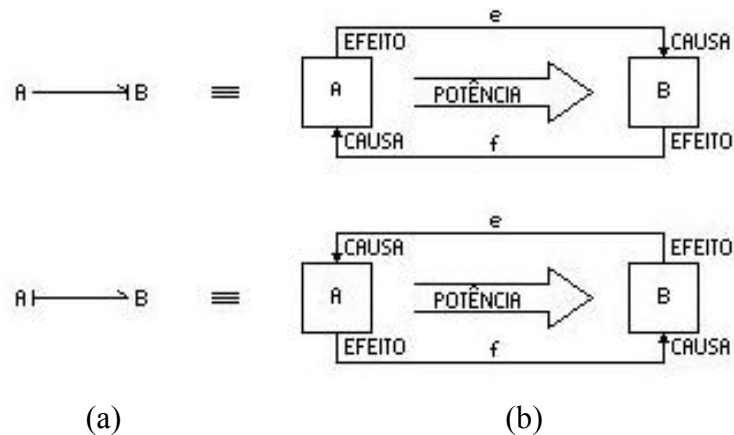


Figura 3.1- Símbolo de causalidade
(a) GL, (b) diagrama de blocos.

3.3 Representação dos Elementos Básicos

Na metodologia dos GL procura-se modelar um sistema físico através das leis constitutivas dos vários elementos que constituem esse sistema. Os diferentes efeitos físicos podem ser representados por três elementos puros: elementos que dissipam energia, resistência **R**, e elementos que armazenam energia, capacitância **C** e inertância **I**. Estes elementos podem ser não lineares, neste caso seus parâmetros se “modulam” por funções externas.

Os elementos que fazem a interação do sistema dinâmico com o meio ambiente, têm a função de impor ou de drenar energia ao sistema. Em função da natureza da variável suprida, as fontes podem ser: fonte de esforço **Se** e fonte de fluxo **Sf**. A fonte de esforço **Se** assim definida quando a variável que supre o sistema tem a dimensão de esforço, por exemplo: fonte de torque no sistema mecânico rotacional; fonte de tensão no sistema elétrico, fonte de pressão no sistema hidráulico, etc. A fonte de fluxo **Sf** assim definida quando a variável que supre o sistema tem a dimensão de fluxo, por exemplo: fonte de velocidade no sistema mecânico, fonte de corrente no sistema elétrico e fonte de vazão no sistema hidráulico, etc.

As simbologias utilizadas para as fontes são:



Figura 3.2- Representação convencional das fontes

(a) Fonte esforço, (b) Fonte de fluxo

3.3.1 Resistência

É um elemento dissipador de energia. A relação constitutiva entre as variáveis de potência, o esforço e e o fluxo f , constituem em uma dissipação dada pela relação (3.4) para o caso linear e pela relação (3.5) para o caso não linear.

$$e(t) = Rf(t) \tag{3.4}$$

$$e(t) = \phi_R \cdot f(t) \tag{3.5}$$

Convencionalmente pela técnica dos GL, a resistência, será representada pelo diagrama da figura 3.3.

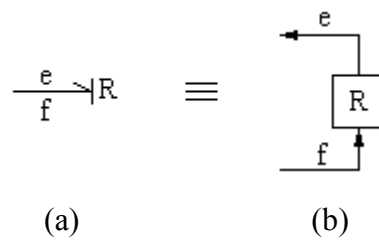


Figura 3.3 - Representação convencional para a resistência

(a) GL, (b) diagrama de blocos

3.3.2 Capacitância

A capacitância C , é o elemento armazenador de energia, que relaciona a variável de potência, o esforço e , com a variável integral, deslocamento q . Isso ocorre quando o elemento tem a capacidade de acumular energia na forma potencial, o que implica que e é função de q conforme a seguinte relação:

$$e = e(q) \tag{3.6}$$

Como q é uma integral no tempo do fluxo, f , definido pela expressão (3.3), a lei constitutiva será:

$$e = \frac{1}{C} q \tag{3.7}$$

Ou seja:

$$e(t) = \frac{1}{C} \int_0^t f(t) dt \tag{3.8}$$

A figura 3.4 representa convencionalmente a capacitância com GL e com diagrama de blocos.

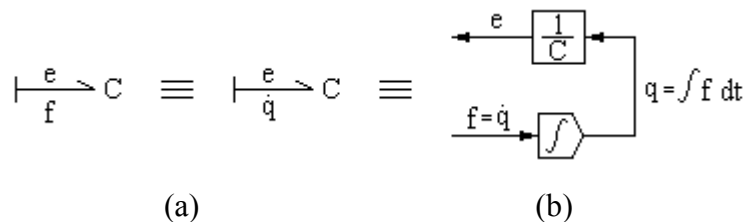


Figura 3.4 - Representação convencional para a capacitância
 (a) GL, (b) diagrama de blocos

De acordo com a equação (3.3) tem-se:

$$dq = f dt \tag{3.9}$$

Portanto o fluxo será:

$$f = \frac{dq}{dt} = \dot{q} \tag{3.10}$$

A figura 3.5 mostra de forma gráfica a lei constitutiva para a capacitância, onde a área sob a curva $e = e(q)$ corresponde à energia acumulada, características do elemento capacitivo, e é dada pela integral mostrada na equação (3.11).

$$E(q) = \int_0^q e(q) dq \tag{3.11}$$

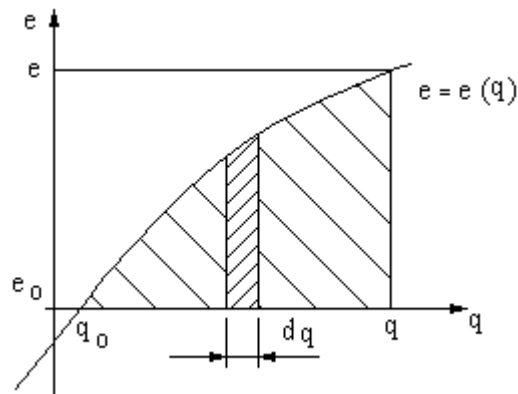


Figura 3.5 - Lei constitutiva para a capacitância.

3.3.3 Inertância

É um elemento passivo e corresponde à indutância de energia no sistema. Relaciona a variável de potência fluxo **f** com a variável integral quantidade de movimento **p**. O elemento de inertância tem a capacidade de acumular energia na forma de energia cinética, o que implica que **f** é função de **p**.

$$f = f(p) \tag{3.12}$$

De acordo com a equação (3.2), a quantidade de movimento ou momentum é definida como a integral no tempo do esforço **e**. Desta forma o elemento de inertância terá uma lei constitutiva na forma:

$$f = \frac{1}{I} p \tag{3.13}$$

ou seja:

$$f(t) = \frac{1}{I} \int_0^t e(t) dt \tag{3.14}$$

A equação (3.14) representa a lei constitutiva do elemento de inércia se a sua causalidade for integral. A figura 3.6 mostra as convenções para o elemento de inércia nos GL e diagrama de blocos respectivamente.

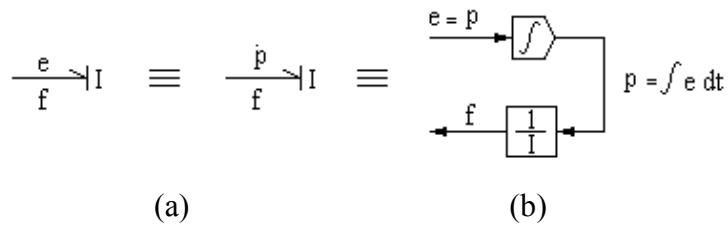


Figura 3.6 - Representação para a inércia.
(a) GL, (b) diagrama de blocos

De acordo com a equação (3.2) a variável de potência o esforço **e** é dado por:

$$e(t) = \frac{dp}{dt} = \dot{p} \tag{3.15}$$

A energia acumulada no sistema é representada pela seguinte expressão:

$$E(t) = \int_0^t P(t)dt = \int_0^t e(t) f(t) dt \tag{3.16}$$

De acordo com a equação (3.2) tem-se:

$$d p = e(t) dt \tag{3.17}$$

Então pode-se considerar o fluxo **f** como uma função da quantidade de movimento:

$$f = f(p) \tag{3.18}$$

A equação (3.16) indica que a energia acumulada no sistema corresponderá à área sob a curva $f = f(P_p)$ da figura 3.7 calculada pela equação:

$$E(p) = \int_0^{P_p} f(p) dp \tag{3.19}$$

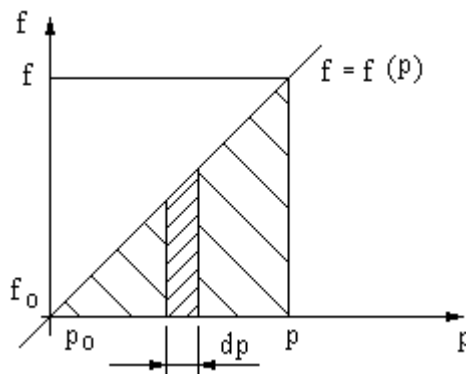


Figura 3.7 - Lei constitutiva da inércia

3.3.4 Elementos Transdutores

São elementos capacitados a ampliar ou reduzir a amplitude de uma entrada, ou elementos conversores de energia, onde a transformação do domínio da energia dá-se segundo a lei de conservação de potência. Desta forma o elemento transformador **TF** de acordo com a sua natureza pode fazer a interação entre dois domínios de energia.

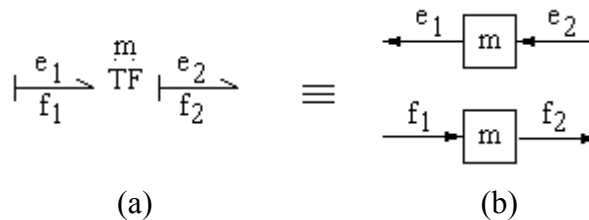


Figura 3.8 - Representação convencional do transformador

(a) GL, (b) diagrama de blocos

A lei constitutiva do elemento de transformação direta é dada por:

$$\begin{aligned} e_1 &= m e_2 \\ m f_1 &= f_2 \end{aligned} \tag{3.20}$$

onde: **m** é o módulo de transformação.

A lei constitutiva de conservação de potência no elemento transformador pode ser verificada da seguinte forma:

$$P_1 = e_1 f_1 \quad e \quad P_2 = e_2 f_2 \tag{3.21}$$

Então:
$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{e_1 f_1}{e_2 f_2} = \frac{m e_2 f_1}{e_2 m f_1} = 1 \quad (3.22)$$

Da equação (3.22) fazendo as simplificações se verifica que:

$$P_1 = P_2$$

São exemplos de transformadores diretos, isto é, que ampliam ou reduzem um sinal: os servomecanismos, as alavancas, as caixas de engrenagens e os transformadores de potência nos circuitos elétricos e pistão hidráulico.

Outro tipo de elemento transformador é o girador, **GY**, é do tipo transformador inverso, cuja relação de transformação entre as variáveis de esforço de entrada com o fluxo de saída e o fluxo de entrada com o esforço de saída conforme mostrado na figura 3.9.

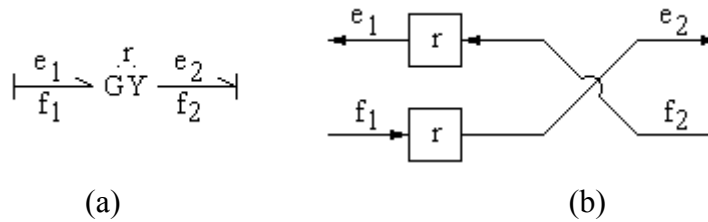


Figura 3.9 - Representação convencional do elemento de transformação indireta.

(a) GL,

(b) diagrama de blocos

A lei constitutiva deste elemento é dada:

$$e_1 = r f_2$$

$$r f_1 = e_2$$

onde: **r** é o modulo de giração

Um exemplo de girador é a relação entre a força e velocidade de deslocamento de um núcleo metálico no interior de uma bobina com a tensão e a corrente dessa bobina.

3.3.5 Elementos de Junção

De maneira a compor a topologia do sistema, faz-se necessário interligar todos os seus elementos. Na metodologia dos GL isto é feito através dos elementos de junção onde ocorre acúmulo ou dissipação de energia. Estes elementos simplesmente distribuem a potência entre vários componentes do sistema. Existem dois tipos de junções: junção tipo “0” e junção tipo “1”.

3.3.5.1 Junção do tipo “0”

Sua característica é o esforço comum, isto é, todos os elementos ligados entre si por uma junção deste tipo estão sob a ação de um mesmo esforço. Neste caso, para que a lei de conservação de energia seja válida, o somatório do fluxo desse elemento tem que ser zero. A junção do tipo “0” é uma generalização da lei de Kirchhoff de correntes (lei dos nós).

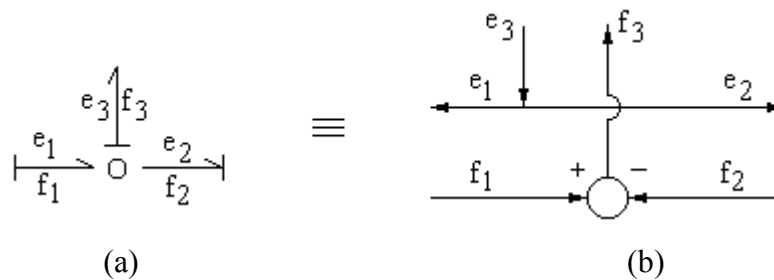


Figura 3.10 - Representação convencional da junção “0”

(a) GL, (b) diagrama de blocos

Por definição na junção “0” tem-se:

$$e_1 = e_2 = e_3 \tag{3.23}$$

Assim de acordo com o sentido das potências indicado através da meia seta, o somatório dos fluxos resulta:

$$f_1 - f_2 - f_3 = 0 \tag{3.24}$$

As equações (3.23) e (3.24) formam as relações constitutivas desse elemento de junção.

3.3.5.2 Junção do tipo “1”

Sua característica é o fluxo comum, isto é, todos os elementos ligados entre si por uma junção do tipo “1”, estão sob a ação do mesmo fluxo, e o somatório dos esforços deve ser zero. A junção do tipo “1” é uma generalização da lei de Kirchhoff de tensões (lei das malhas).

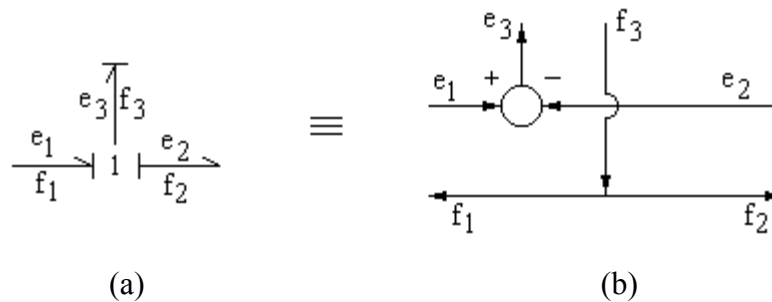


Figura 3.11 - Representação convencional da junção “1”
 (a) GL, (b) diagrama de blocos

Por definição na junção “1”, tem-se:

$$f_1 = f_2 = f_3 \tag{3.25}$$

De acordo com o sentido das potências indicadas através da meia seta, o somatório dos esforços resulta:

$$e_1 - e_2 - e_3 = 0 \tag{3.26}$$

3.4 Causalidades

A causalidade permite indicar entre as duas variáveis de potência, o esforço *e* e fluxo *f* qual é a entrada e qual é a saída num determinado elemento, isto é, qual é a excitação e qual é a resposta. É a maneira utilizada na metodologia dos GL para relacionar a causa ao efeito da troca de energia entre os elementos. A causalidade é indicada através de uma barra vertical, denominada barra causal, inserida em uma das extremidades da ligação do elemento em questão, de forma a indicar qual é o sentido da variável de esforço *e*, ou seja, para que lado a

variável de esforço atua como entrada. É importante notar que a causalidade e o sentido da potência em uma ligação são completamente independentes. A primeira indica a relação de causa e efeito entre as variáveis de potência enquanto a meia seta indica em qual sentido a potência é positiva, ou seja, o sentido em que ambas variáveis são positivas ou ambas são negativas. De acordo com a natureza do elemento primário a causalidade poderá ser: necessária, restrita, integral, derivativa ou arbitrária.

A causalidade será de caráter necessário quando o elemento indicado é uma fonte de esforço ou fonte de fluxo, pois obrigatoriamente a causalidade será em função da fonte. Na fonte de esforço tem sempre o fluxo como saída e o esforço como entrada e na fonte de fluxo tem o fluxo como entrada e o esforço como saída.

A causalidade será de caráter restrito quando o elemento indicado é o tipo onde ocorre o fluxo de potência através do mesmo: transformador, girador, junção “0” e junção “1”. Nos elementos de inércia **I** e de capacitância **C**, dependendo do caráter do elemento e da topologia do sistema, a causalidade poderá assumir o caráter integral ou derivativo.

Finalmente, nos elementos de resistência, devido à sua característica dissipativa, a causalidade assume o caráter arbitrário. A tabela 3.2 adaptada de (Karnopp, 2000 e Tiago Filho, 1994) apresenta em forma sintética as causalidades inerentes a cada elemento primitivo citado, relacionando-as com os respectivos diagramas de blocos.

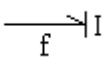
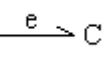
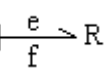
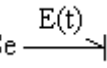
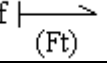
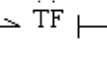
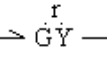
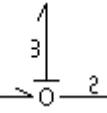
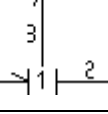
A tabela 3.3 (Karnopp, 2000) mostra as variáveis de potência e energia e os nove elementos básicos de GL com as atribuições de fluxo de potência e de causalidade no domínio físico Elétrico e Hidráulico. O modelo matemático é determinado a partir das equações constitutivas lineares ou não destes elementos.

A partir do modelo físico estabelecido para o sistema e uma vez identificados os seus elementos componentes de acordo com a tabela 3.3, pode-se obter a sua representação usando a metodologia de GL. 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.

Tabela 3.2 Causalidades, diagrama de blocos dos elementos primários
CAUSALIDADES

Caráter	GL	Diagrama de blocos	GL	Diagrama de blocos
NECESSÁRIO	$S_e \xrightarrow{E(t)}$		$S_f \xrightarrow{F(t)}$	
INTEGRATIVO	$\left \begin{array}{l} e \\ f = \dot{q} \end{array} \right. C$		$\left \begin{array}{l} e = \dot{p} \\ f \end{array} \right. I$	
DERIVATIVO	$\left \begin{array}{l} e \\ f \end{array} \right. C$		$\left \begin{array}{l} e \\ f \end{array} \right. I$	
ARBITRÁRIO	$\left \begin{array}{l} e \\ f \end{array} \right. R$		$\left \begin{array}{l} e \\ f \end{array} \right. R$ ou $\left \begin{array}{l} e \\ f \end{array} \right. G$	
RESTRITIVO	$\left \begin{array}{l} e_1 \\ f_1 \end{array} \right. \begin{array}{c} m \\ TF \end{array} \left \begin{array}{l} e_2 \\ f_2 \end{array} \right.$		$\left \begin{array}{l} e_1 \\ f_1 \end{array} \right. \begin{array}{c} 1/m \\ TF \end{array} \left \begin{array}{l} e_2 \\ f_2 \end{array} \right.$	
	$\left \begin{array}{l} e_1 \\ f_1 \end{array} \right. \begin{array}{c} r \\ GY \end{array} \left \begin{array}{l} e_2 \\ f_2 \end{array} \right.$		$\left \begin{array}{l} e_1 \\ f_1 \end{array} \right. \begin{array}{c} 1/r \\ GY \end{array} \left \begin{array}{l} e_2 \\ f_2 \end{array} \right.$	

Tabela 3.3: Elementos básicos, equações constitutivas e causalidades

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	Quantidade de movimento	$p = \int e dt$	p	Fluxo elétrico, λ [V.s]	Quantidade movimento de pressão, p [Pa.s]
	Deslocamento	$q = \int f dt$	q	Carga elétrica, q [C]	Volume, V [m ³]
Inertância	Indutância de energia ao sistema	$f(t) = \frac{1}{I} \int_0^t e(t).dt$		Indutância Elétrica [H]	Inertância Fluida [Pa.s ² /m ³]
Capacitância	Capacidade de acumular energia	$e(t) = \frac{1}{C} \int_0^t f(t).dt$		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	Pistão hidráulico
Girador	Relaciona esforço de entrada e fluxo de saída e vice versa	$e_1 = r f_2$ $r f_1 = e_2$		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	Impedância fluida em paralelo
	Junção "1"	$f_1 = f_2 = f_3$ $e_1 - e_2 - e_3 = 0$		Impedância em série	Impedância fluida em série

3.5 Algoritmo para Construção dos Grafos de Ligação

A construção dos GL tem por objetivo unir os elementos que o compõem, sem desprezar as leis físicas que regem o sistema. Neste item serão apresentados os procedimentos para a construção dos GL em função da natureza do sistema a ser modelado.

Segundo Karnopp (2000) apud Tiago Filho (1994), a rotina para a ordenação da direção de potência nos GL, independe da natureza e energia do sistema a ser modelado a qual será a mesma para sistema de diferentes domínios físicos. A seguir são mostrados os passos para a construção de GL.

1. Indica-se a direção da potência da fonte.
2. Indica-se nos elementos passivos: **R**, **C** e **I** a potência com o sentido da junção para o elemento.
3. Indica-se nos elementos transformadores **TF** e **GY**, a potência como passante.
4. Nos elementos de junções “0” e “1” a potência é indicada com o sentido da primeira para a segunda junção.

3.5.1 Procedimento para Assinalar as Causalidades

Após levantado o Grafo de Ligação para o sistema desejado é necessário assinalar as causalidades estabelecidas. A seguir mostra-se o procedimento para assinalar a causalidade aos Grafos de Ligação. (SCAP: *Sequential Causality Assignment Procedure*), (Karnopp, 2000), que respeita as condições detalhadas na tabela 3.2.

1. Assinalam-se as causalidades de caráter necessário, que são as causalidades das fontes de esforço (**Se**) e fontes de fluxo (**Sf**).
2. Assinalam-se as causalidades de caráter integral em todos os elementos de inércia (**I**) e capacitância (**C**) que admitem tal causalidade.
3. Assinalam-se as causalidades de caráter restrito em todos os elementos transformadores (**TF**) e indiretos (**GY**).
4. Assinalam-se as causalidades também de caráter restrito nos elementos de junções “0” e “1”.

5. Levando-se em conta as causalidades já assinaladas, marca-se a causalidade de carácter arbitrário nos elementos de resistência (**R**).
6. Verifica-se o GL tem consistência do ponto de vista das causalidades. Caso contrário, modificam-se as causalidades até que a consistência seja satisfeita.

3.5.2 Exemplos de Construção dos Grafos de Ligação

Para ilustrar a metodologia apresentam-se a seguir os passos para a construção dos GL em forma didática através de exemplos dos sistemas: elétrico, mecânico e hidráulico, mostrando a analogia entre eles.

É importante destacar que com a prática e utilização de *softwares* comerciais a construção dos GL se faz de maneira muito simples não necessitando seguir todos estes passos.

3.5.2.1 Circuito Elétrico RLC

Utilizando os seguintes passos mostra-se nas figuras 3.12 e 3.13 o circuito RLC e a construção dos GL.

1. Para cada ponto do circuito com mesmo potencial ou tensão estabelece-se uma junção “0”
2. Entre cada par adequado de junções “0” insere junções “1” ligadas aos respectivos elementos que estejam sob ação da mesma diferença de tensão.
3. Adiciona-se respectivas fontes de corrente e de tensão.
4. Elimina-se o potencial terra e sua respectiva junção “0”. Caso não haja o potencial terra escolhe-se uma tensão de referência e elimina-a.
5. Simplifica-se o GL de acordo com as regras estipuladas.
6. Assinala-se o sentido da potência, conforme a rotina estipulada.
7. Assinalam-se as causalidades conforme as regras descritas anteriormente.
8. Proceda a formulação das equações de estado.

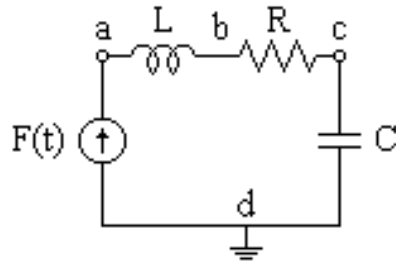


Figura 3.12 - Circuito RLC

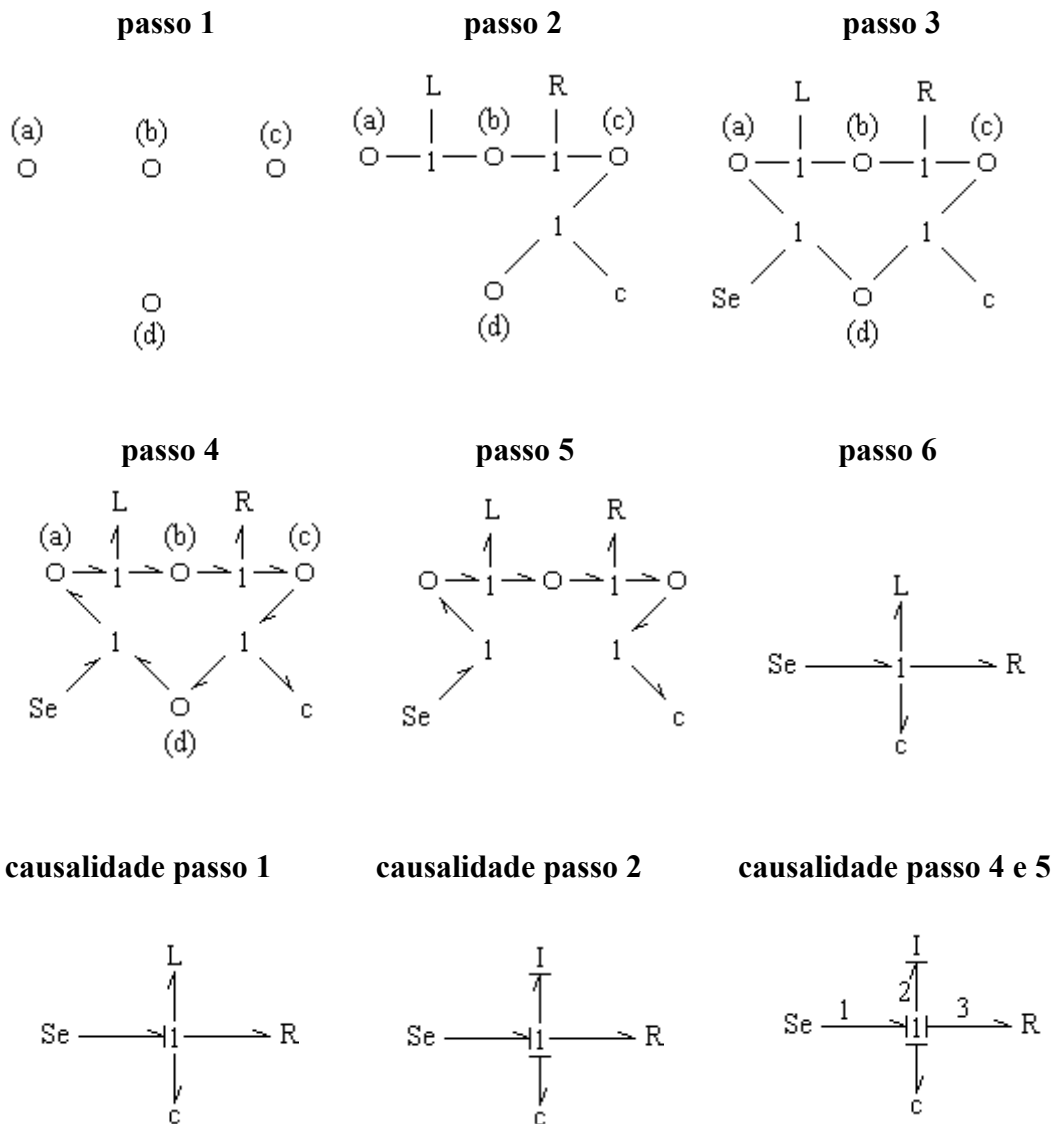


Figura 3.13 - Exemplo de construção dos GL: Circuito Elétrico RLC

O gráfico final fornecido no 4º e 5º passos da causalidade da figura 3.13, representa os Grafos de Ligação, relativo ao circuito elétrico RLC. Ele representa perfeitamente o circuito RLC com fonte de corrente, uma vez que pela junção “1”, todos os elementos têm o mesmo fluxo, corrente elétrica comum, e os esforços, tensões são distribuídos pelos elementos, conforme se mostra na equação (3.27).

$$\begin{aligned} \text{Tensão: } V_{ad} &= V_{ab} + V_{bc} + V_{cd} \\ \text{Corrente: } i_{ad} &= i_{ab} = i_{bc} = i_{cd} = i \end{aligned} \quad (3.27)$$

3.5.2.2 Sistema Mecânico de Translação: Massa-mola

Utilizando os seguintes passos mostra-se nas figuras 3.14 e 3.15 o sistema mecânico: massa-mola e a construção dos Grafos de Ligação.

1. Para cada velocidade distinta estabelece-se uma junção “1”. Algumas junções representarão velocidades absolutas e outras velocidades relativas.
2. Entre cada par adequado de junções “1” inserem-se junções “0” ligadas aos respectivos elementos que tenham a mesma velocidade.
3. Adicionam-se as respectivas fontes de esforço.
4. Assinala-se o sentido da potência conforme estipulado.
5. Eliminam-se as junções “1” onde a velocidade for zero.
6. Simplifica-se o GL conforme as regras estipuladas.
7. Assinale as causalidades conforme as regras estipuladas em 3.5.1.
8. Proceda a formulação das equações de estado.

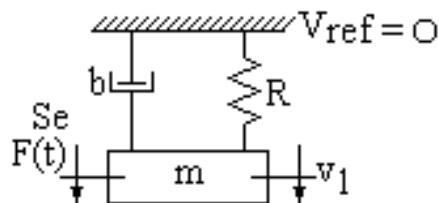


Figura 3.14 - Sistema Mecânico Massa-mola

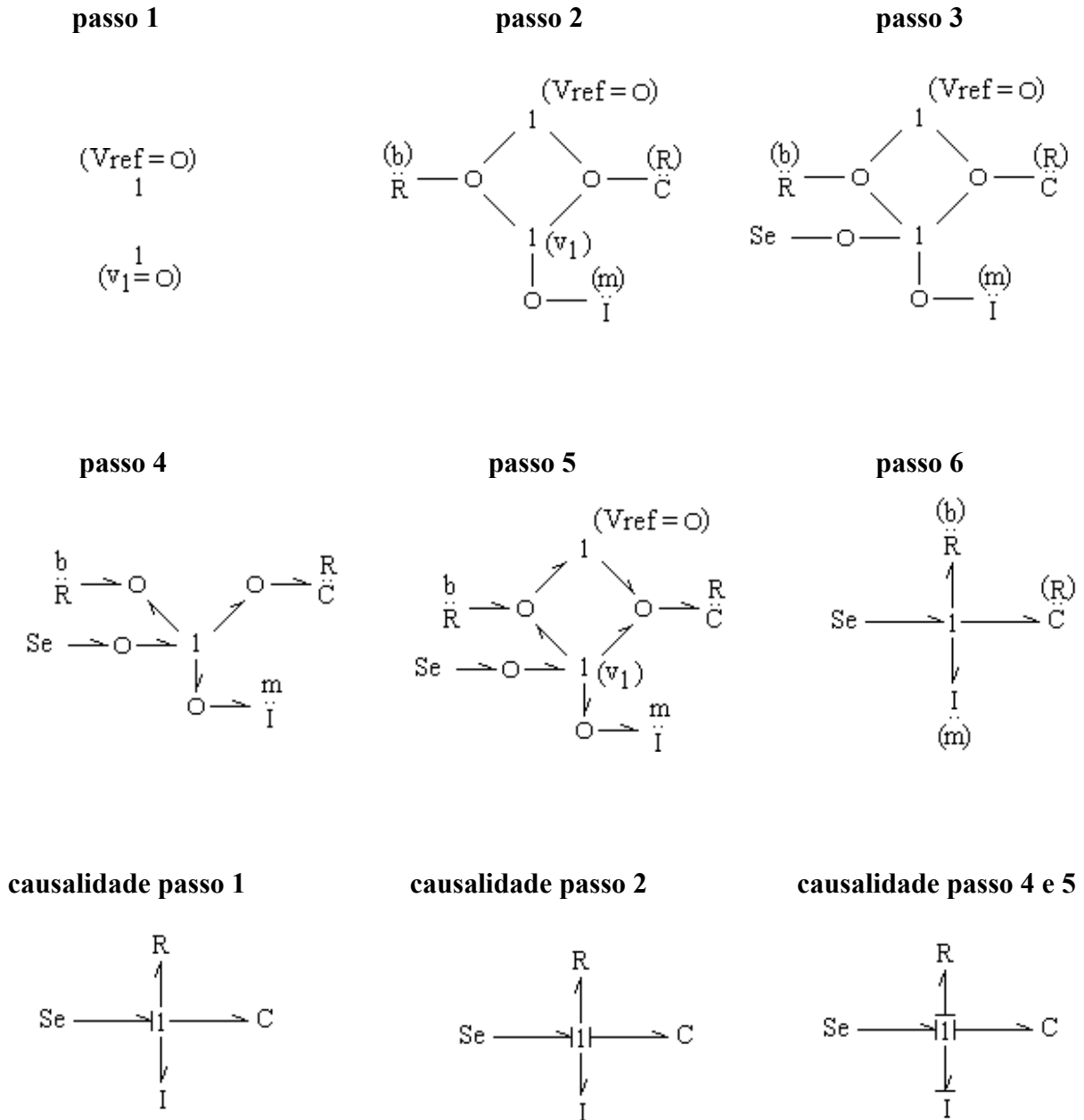


Figura 3.15 - Exemplo de construção com GL do Sistema Mecânico: Massa-mola

O grafo resultante no passo 4 e 5 é similar ao grafo obtido no exemplo do circuito RLC, permitindo desta forma concluir que estes sistemas são análogos.

3.5.2.3 Circuito Hidráulico: Reservatório, Conduto forçado e Válvula

Para este exemplo considera-se um sistema composto de um reservatório finito, de nível variável, na extremidade de montante da tubulação e uma válvula na extremidade de jusante. Nos sistemas hidráulicos as variáveis de potência, esforço e fluxo têm dimensão de pressão P e vazão Q respectivamente. O elemento de resistência R , está diretamente relacionado com a perda de carga por atrito, o elemento de capacitância C está relacionado com a compressibilidade da água e flexibilidade da tubulação. O elemento de inércia I , está relacionado com a energia cinética da massa fluida e a fonte de esforço corresponde à fonte de pressão.

Utilizando os seguintes passos mostra-se nas figuras 3.16 e 3.17 o sistema hidráulico e a construção dos GL.

1. Estabelece-se junção “0” para cada pressão distinta.
2. Entre os pares apropriados de junção “0” insere-se junções “1”, ligadas aos respectivos componentes que estejam sob ação do mesmo diferencial de pressão.
3. Adicionam-se as respectivas fontes de vazão e pressão.
4. Assinala-se o sentido da potência
5. Define-se todas as pressões do sistema relativo a uma pressão de referência, normalmente tomada como a pressão atmosférica. Elimina-se a junção “0” correspondente à pressão de referência juntamente com as suas ligações .
6. Simplificam-se o GL.
7. Assina-se as causalidades conforme as regras estipuladas em 3.5.1.
8. Proceda a formulação das equações de estado.

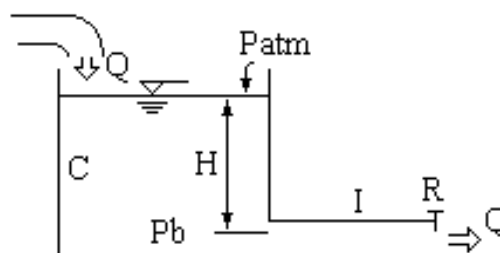
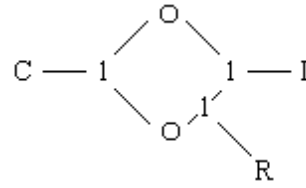


Figura 3.16- Sistema Hidráulico

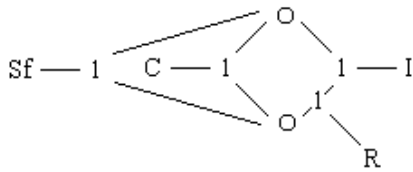
passo 1

- (Patm)
- (Pb)

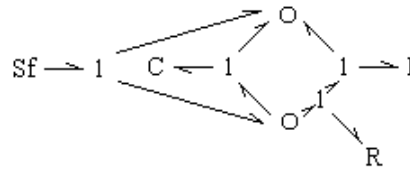
passo 2



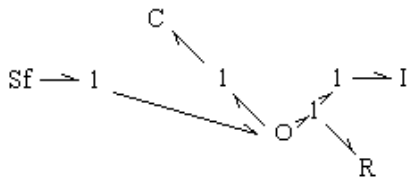
passo 3



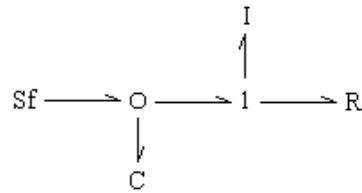
passo 4



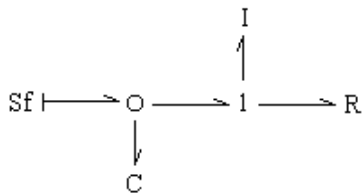
passo 5



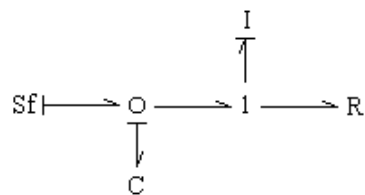
passo 6



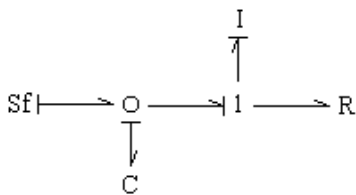
causalidade - passo 1



causalidade - passo 2



causalidade - passo 4 (junção 0)



causalidade - passo 4 e 5 (junção 1)

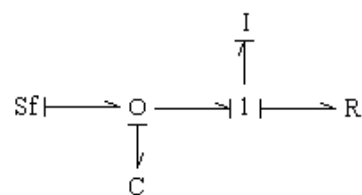


Figura 3.17- Exemplo de construção com GL do sistema hidráulico

3.6 Equações de estado

A modelagem matemática dos sistemas dinâmicos tem por objetivo obter uma ou várias equações diferenciais capazes de descrever o regime transitório ao qual o mesmo poderá ficar sujeito. Os Grafos de Ligação fornecem todas as informações necessárias à modelagem matemática do sistema e permite obter de forma sistemática e ordenada as equações de estado. A obtenção das equações de estado do sistema, a partir do GL faz-se relacionando as variáveis de potência com as variáveis integrais dos elementos **C** e **I** de causalidade integral associando-se as leis constitutivas de cada elemento do grafo, bem como aos elementos resistores dissipadores de energia e as fontes de excitação. O número de equações de estado será equivalente ao número de elementos capacitivos e inerciais de causalidades integrais existentes no sistema. No caso desses elementos **C** e **I** apresentar causalidade derivativa, esse apenas fornecerá uma relação algébrica que não participará do sistema de equações de estado. As variáveis de estado x_1, x_2, \dots , serão as variáveis integrais correspondendo à quantidade de movimento **p**, para cada inércia **I**, e ao deslocamento **q** para cada capacitância **C**. O número de variáveis de entrada corresponderá ao número das respectivas fontes do sistema.

Segundo Karnopp (2000) apud Tiago Filho (1994) mostra-se a seguir os passos para a formulação das equações de estado do Sistema Hidráulico a partir dos Grafos de Ligação:

1. Considerando os GL como o fluxo de potência e as causalidades assinaladas, enumera-se de forma ordenada todas as ligações.
2. Identificam-se as variáveis de entrada a fonte de esforço **E(t)** e o fluxo **F(t)**.
3. De acordo com as leis constitutivas dos elementos **C** e **I** de causalidade integral, associa-se a variável de energia **p** e **q** com as respectivas variáveis de estado.
4. Identifica-se nos elementos **C** e **I**, as respectivas variáveis de co-energia, o esforço **e**, identificado pela derivada da quantidade de movimento $e = \dot{p}$, e o fluxo **f**, identificado pela derivada do deslocamento, sendo $f = \dot{q}$.
5. Nos elementos dissipadores de energia **R** e de transformação **TF** e **GY** identificam-se e formulam as respectivas leis constitutivas.
6. A partir das relações constitutivas das junções “0” e “1” levando-se em conta o sentido da potência e suas respectivas causalidades, relaciona-se as variáveis de estado.

7. Finalmente depois de levantadas as relações constitutivas são feitas as devidas substituições, de forma a obter-se as equações de estado do sistema em questão.

A figura 3.18 mostra a obtenção das equações de estado a partir dos Grafos de Ligação do sistema hidráulico ilustrado em 3.5.2.1 utilizando os procedimentos anteriores.

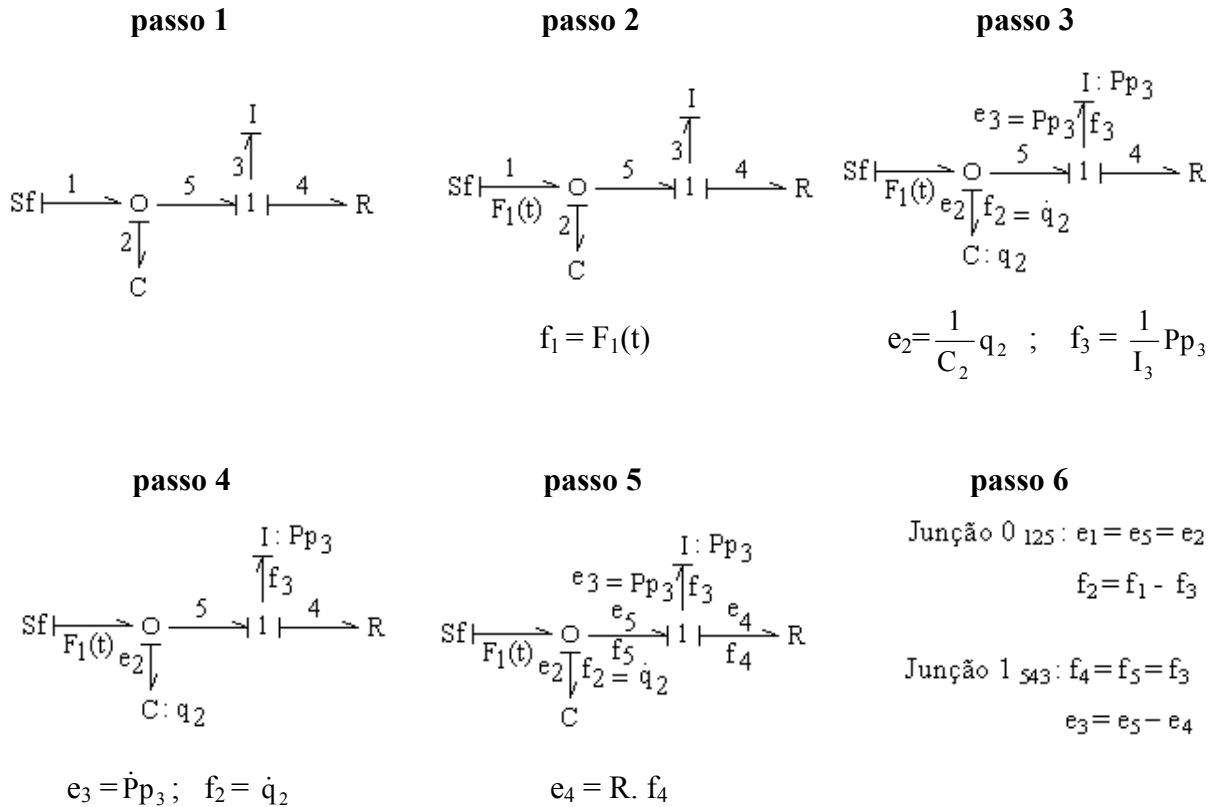


Figura 3.18 - Procedimentos para a obtenção das equações de estado a partir dos GL

Das relações mostradas na figura 3.18 tem-se:

Leis constitutivas da junção 0₁₂₅:

$$\begin{aligned} e_1 &= e_2 = e_5 \\ f_2 &= f_1 - f_5 \end{aligned} \quad (3.28)$$

Lei constitutiva do elemento capacitância:

$$e_2 = \frac{1}{C_2} q_2 \quad (3.29)$$

Lei constitutiva do elemento inércia:

$$f_3 = \frac{1}{I_3} p_3 \quad (3.30)$$

A variável de co-energia, o esforço, e é identificado pela derivada da quantidade de movimento pela seguinte expressão:

$$\dot{p}_3 = e_3 \quad (3.31)$$

A variável de co-energia, o fluxo f , é identificado pela derivada do deslocamento pela expressão:

$$\dot{q}_2 = f_2 \quad (3.32)$$

Lei constitutiva da junção \mathbf{I}_{345} :

$$\begin{aligned} f_3 &= f_4 = f_5 \\ e_3 &= e_4 - e_5 \end{aligned} \quad (3.33)$$

Lei constitutiva do elemento de resistência temos:

$$e_4 = R_4 f_4 \quad (3.34)$$

De acordo com o passo 7, faz-se a redução das relações constitutivas levantadas nas equações (3.27) a (3.34) e forma-se o sistema de equações de estado. A primeira equação será obtida a partir da equação (3.34), fazendo as devidas substituições obtém-se a seguinte expressão:

$$\dot{q}_2 = f_1 - f_5 = F_1(t) - \frac{1}{I_3} p_3 \quad (3.35)$$

A segunda equação de estado será obtida a partir da equação (3.32), considerando as devidas substituições tem-se:

$$\dot{p}_3 = e_5 - e_4 = e_2 - R_4 f_4 = \frac{1}{C_2} q_2 - R_4 \frac{1}{I_3} p_3 \quad (3.36)$$

Das equações (3.35) e (3.36) obtém-se o sistema na seguinte forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_2 \\ \dot{p}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{I_3} \\ \frac{1}{C_2} & -\frac{R_4}{I_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_2 \\ p_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} [F_1(t)] \quad (3.37)$$

Escrevendo de forma reduzida obtém-se:

$$\dot{x} = Ax + B u(t) \quad (3.38)$$

onde, para esse exemplo, \dot{x} corresponde às variáveis de co-energia do sistema:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{q}_2 \\ \dot{p}_3 \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

E o vetor x corresponde às variáveis de energia do sistema:

$$x = \begin{bmatrix} q_2 \\ p_3 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

A matriz **A**, cujos coeficientes são dados pelos parâmetros **C₂**, **I₃** e **R₄** do sistema está representada por:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{I_3} \\ \frac{1}{C_2} & -\frac{R_4}{I_3} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

A matriz **B**, cujos coeficientes correspondem à atuação das fontes de entrada ou de excitação do sistema e é identificada pela matriz $u(t)$.

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

$$u(t) = [F_1(t)] \quad (3.43)$$

3.7 Conclusões

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. Foi apresentada a origem da metodologia, seus nove elementos básicos, suas equações constitutivas, procedimentos para assinalar as causalidades e obtenção das equações de estado. Ilustrou-se o algoritmo de construção com aplicações a circuitos elétricos e hidráulicos, enfatizando-se a analogia entre eles. O enfoque teórico do capítulo teve um objetivo fundamentalmente didático, já que a evolução dos programas computacionais baseados nesta técnica permite na atualidade em forma interativa editar, parametrizar, assinalar a causalidade automaticamente e simular um sistema diretamente da representação gráfica.

CAPÍTULO 4

APLICATIVOS DISPONÍVEIS

4.1 Introdução

Apresenta-se uma revisão de alguns aplicativos 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 se obteve informação das características dos programas, preços, manuais e demos. Os principais que se oferecem na *Web* são: 20-SIM, SYMBOLS 2000, CAMP-G, POWERDYNAMO, AMESIM, MS1, BONDLAB, etc. A seguir se analisam alguns deles e se ilustra o seu funcionamento com a simulação do transitório de energização de um circuito elétrico RLC série com uma fonte de tensão de um degrau.

4.2 20-SIM

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 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 aplicativo é não necessitar de um programa externo para executá-lo.

4.2.1 Ambiente do 20-SIM

Na figura 4.1 mostra-se a janela correspondente ao editor subdividida em: editor do modelo, menu de interface, hierarquia e ícones. Também se pode observar a janela de *Library* com as bibliotecas de *Bond Graph*, *Iconic Diagrams*, *Signal* e *System*. Na janela do editor do modelo utilizando o menu *file* pode-se construir modelos novos, abrir modelos existentes, guardar e imprimir. O arquivo de armazenamento tem extensão “.em”.

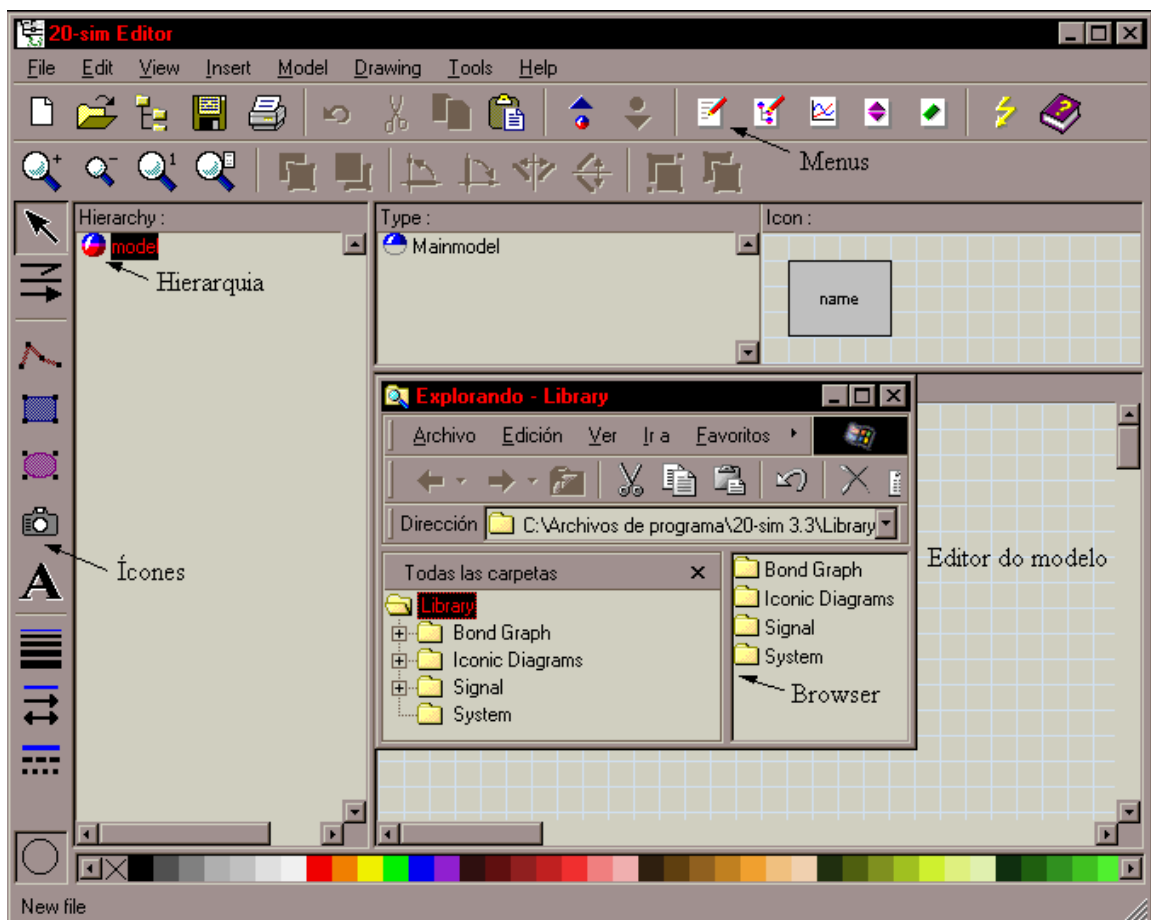


Figura 4.1- Janelas do 20-SIM

Para a construção do modelo do circuito RLC série deve-se abrir a pasta Grafos de Ligação na janela *Library*. Utilizando o botão direito do mouse pressionado arrastar o

elemento selecionado até a janela do editor do modelo, continua-se este procedimento para todos os elementos do modelo. As ligações fazem-se utilizando o ícone correspondente a meia seta. Neste exemplo os elementos que se devem inserir são: uma junção “1” correspondente a um circuito série, o elemento dissipador de energia **R**, os elementos acumuladores de energia inércia **I** e capacitância **C**, e a fonte de esforço **Se**. A causalidade é atribuída de forma automática pelo 20-SIM, mas pode ser modificada pelo usuário caso seja necessário. Uma vez terminado o modelo deve-se verificar a sua integridade utilizando o comando *Check complete model* no menu de interface ou utilizando o ícone correspondente na barra de ferramentas. O 20-SIM verifica o modelo em forma automática e se existe algum erro será apresentada a mensagem corresponde. O modelo resultante mostra-se na figura 4.2.

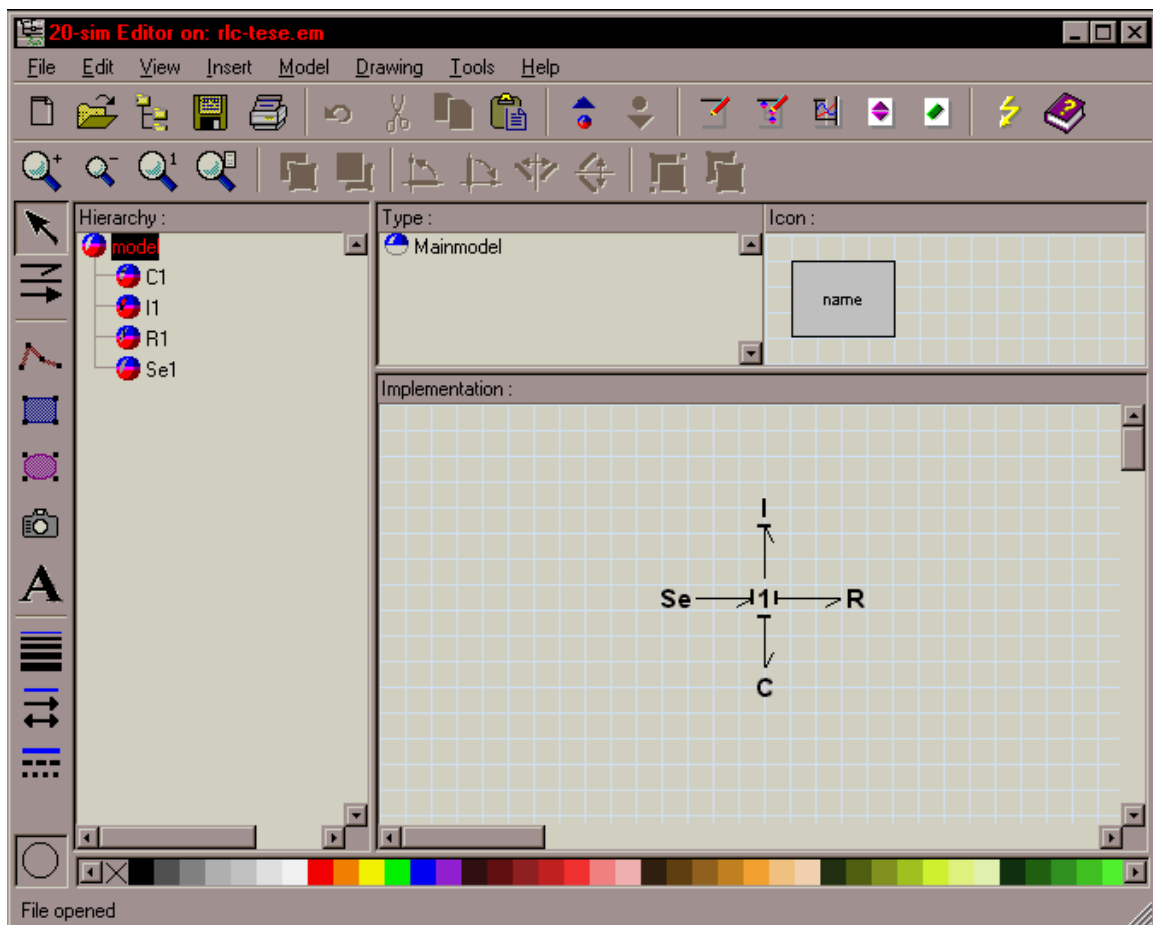


Figura 4.2 - Circuito RLC serie com 20-SIM

Para verificar as equações constitutivas do modelo, ou seja, a relação entre o esforço e o fluxo de cada elemento dos Grafos de Ligação deve-se selecionar o elemento para o qual se pretende analisar as equações, por exemplo: para a capacitância na subjanela *Equations* são apresentadas as equações do elemento selecionado conforme se mostra na figura 4.3.

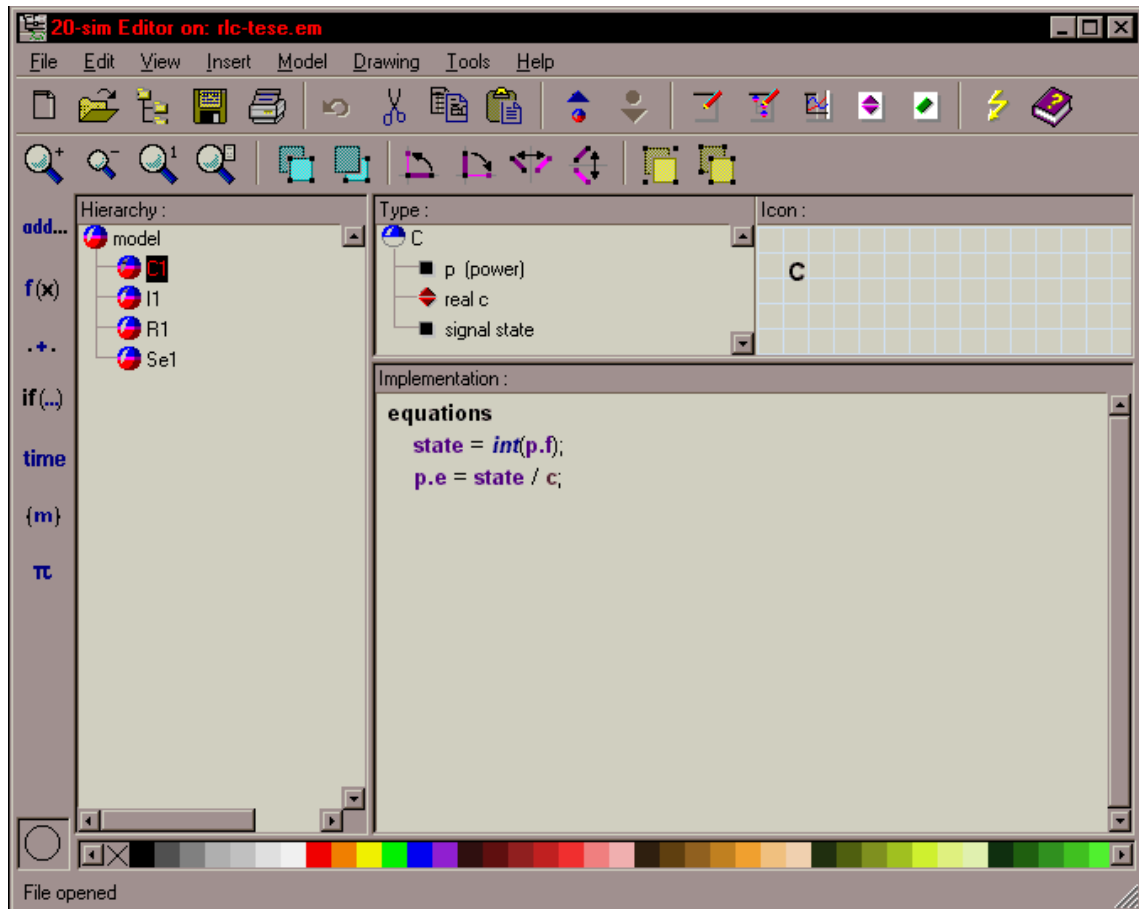


Figura 4.3 - Subjanela das equações constitutivas da capacitância

Para realizar a simulação selecione o comando *Show Parameters* do menu *Model* ou o ícone correspondente na barra de ferramenta onde se ingressam os valores dos parâmetros do modelo. As condições iniciais ingressam-se em *initial value*.

Em 20-SIM existem dois tipos de variáveis de estado segundo estejam relacionadas às inercâncias ou capacitâncias. Numa inercância a variável de estado é a integral do esforço, que se calcula como o produto da inercância pelo fluxo, e numa capacitância é a integral do fluxo que se calcula como o produto da capacitância pelo esforço.

Na figura 4.4 apresenta-se a subjanela *Parameters* onde se ingressam os valores dos parâmetros, para o exemplo proposto são:

I1*v* 0.01

Se1\effort 1

R1*r* 10

C1*c* 0.0001

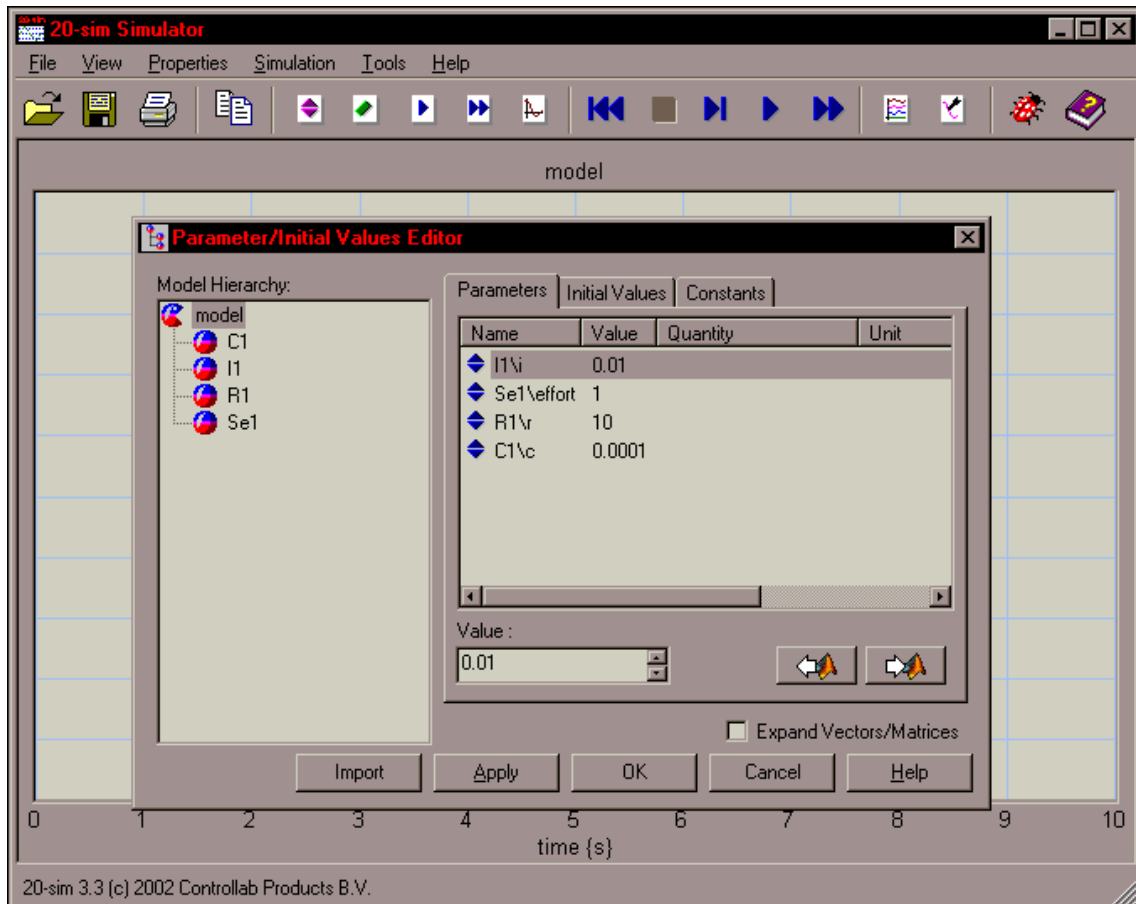


Figura 4.4 - Janela *Simulator* - subjanela *Parameters*

Para especificar os parâmetros da simulação e da representação gráfica deve-se selecionar o comando *Simulator* do menu *Tools* da janela do editor do modelo ou o ícone correspondente na barra de ferramenta. Para simular deve-se selecionar o comando *Simulation* do menu *Properties* ou o ícone da barra de ferramenta. O arquivo de simulação armazenado tem a extensão “.exp”. Os parâmetros da representação gráfica são especificados selecionando o comando *Plot* do menu *Properties* da janela *Simulator*.

Na figura 4.5 mostra-se a janela correspondente onde se deve selecionar o quadro correspondente à variável *Y axis* e a opção *Choose* que permite selecionar a variável que deve ser representada no eixo *X* e no eixo *Y*. A figura 4.5 mostra a variável *C1/pe* correspondente ao esforço (tensão na capacitância). Para seguir com a representação gráfica deve-se selecionar as outras variáveis de interesse e realizar um clique em *Add curve*.

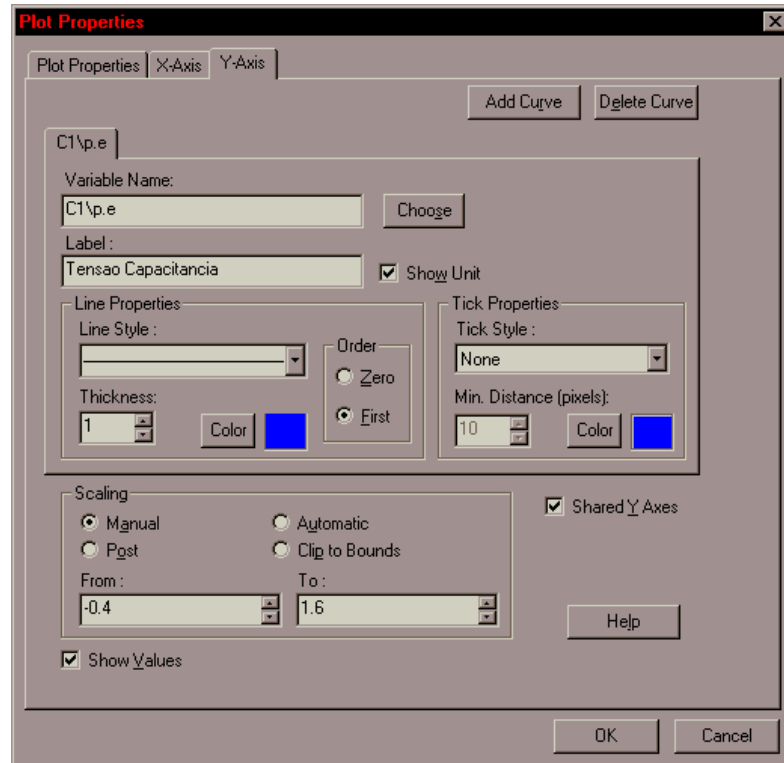


Figura 4.5 - Janela *Simulator*: representação gráfica

Na figura 4.6 mostra-se o resultado da simulação do circuito RLC: tensão na capacitância, indutância e resistência.

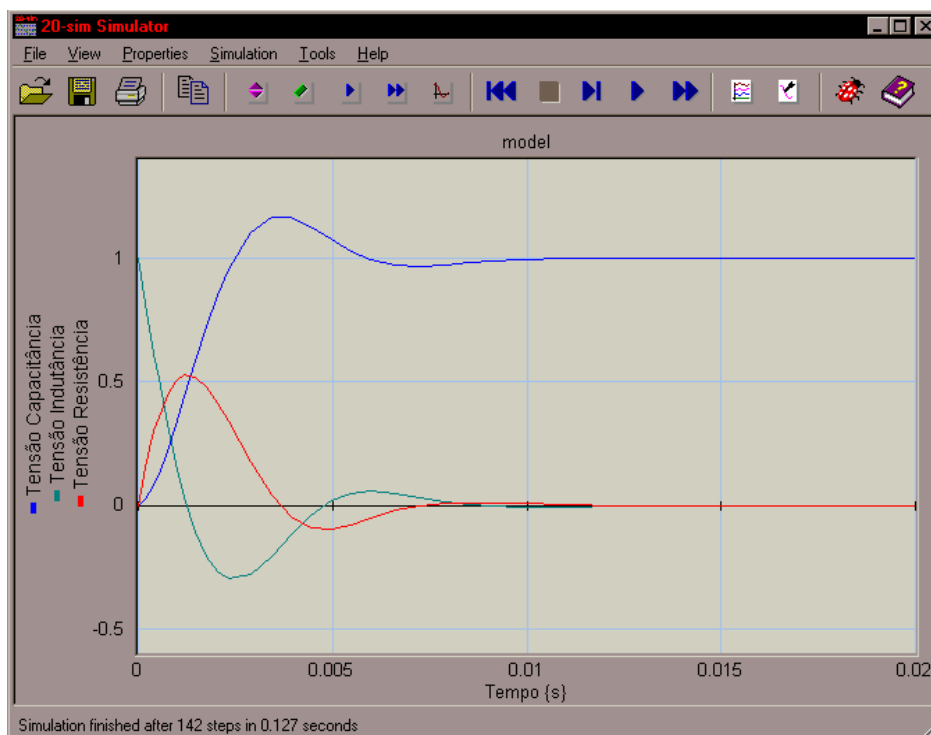


Figura 4.6- Resultado da simulação com 20-SIM

4.3 SYMBOLS 2000

SYMBOLS 2000: *System Modeling by Bondgraph Language and Simulation*, 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. Está disponível um grande número de submodelos avançados chamados cápsulas para aplicação em diferentes domínios da engenharia.

Deriva automaticamente as equações de sistemas reduzidos. A causalidade diferencial e laços algébricos são resolvidos usando a sua capacidade de solução simbólica. Gera um código de linguagem C de alto nível e permite embutir qualquer código externo. O programa possui um módulo de controle bem desenvolvido, que automaticamente transforma os módulos espaço-estado a partir dos GL e de diagrama de blocos e converte-os para funções de transferência analógicas ou digitais. Tem uma notável interface com o usuário, sua capacidade de solução numérica e simbólica é muito avançada. 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.

4.3.1 Ambiente do SYMBOLS 2000

A figura 4.7 mostra a janela do módulo *Bond Pad*, ou seja, a janela do editor do modelo. Desde o menu *file* pode-se realizar um modelo novo, abrir um modelo existente, guardar e imprimir. Com o botão direito do mouse pressionado realiza-se um clique no elemento desejado na biblioteca *Drawing Tools*, subjanela à esquerda, arrastando-o para a janela do editor do modelo, onde encontra-se os elementos lineares dos GL (junções “0” e “1”), elemento dissipador **R**, elementos armazenadores de energia do tipo **I** e **C** e elementos acopladores.

As ligações podem fazer-se selecionando a biblioteca *Connections/Line*. Clicando os ícones correspondentes à numeração (#), meia seta, causalidade e a integridade na parte superior da janela, automaticamente a causalidade é assinalada ao modelo. No menu *Options* deve-se selecionar a opção *Derive Equations*. Os arquivos de armazenamento tem a extensão “.bgp”.

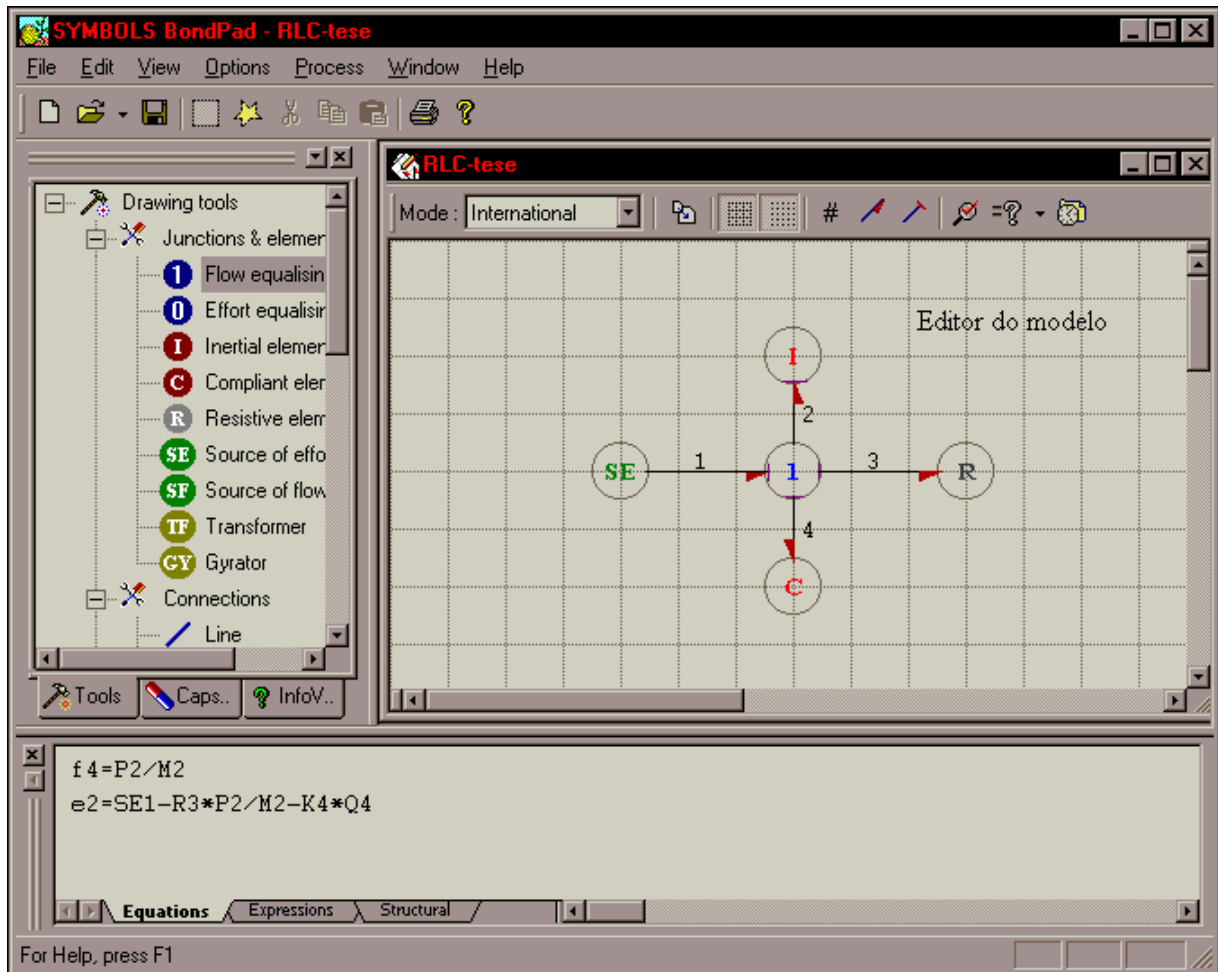


Figura 4.7 - Janela do módulo *Bond Pad*

Para o processo de compilação previamente deve-se carregar uma versão superior a 5.0 do *software* turbo C++. Na janela do editor do modelo deve-se seleccionar no menu *Process* a opção *Generate Simulation Code*, onde o arquivo de simulação vai ser gerado com a extensão “.sym”. As equações relativas ao modelo podem ser visualizadas clicando na parte inferior da janela em *equations*.

Nesta janela pode-se aceder clicando em *Capsule Tab* à biblioteca de cápsulas de diferentes grupos de aplicações. As cápsulas podem ser escolhidas dentro de diferentes categorias: hidráulica, elétrica, mecânica, estrutural etc.

Também pode-se aceder ao visualizador de informação clicando em *Infoviewer Tab*, onde se explica resumidamente como utilizar o módulo *Bond Pad*, geração do código de simulação, interface com Matlab/Simulink, etc

Para realizar a simulação deve-se carregar o módulo *Simulator*. A figura 4.8 apresenta a janela do módulo *Simulator*, e a subjanela de *Parameter* onde se deve ingressar os valores numéricos dos parâmetros da simulação.

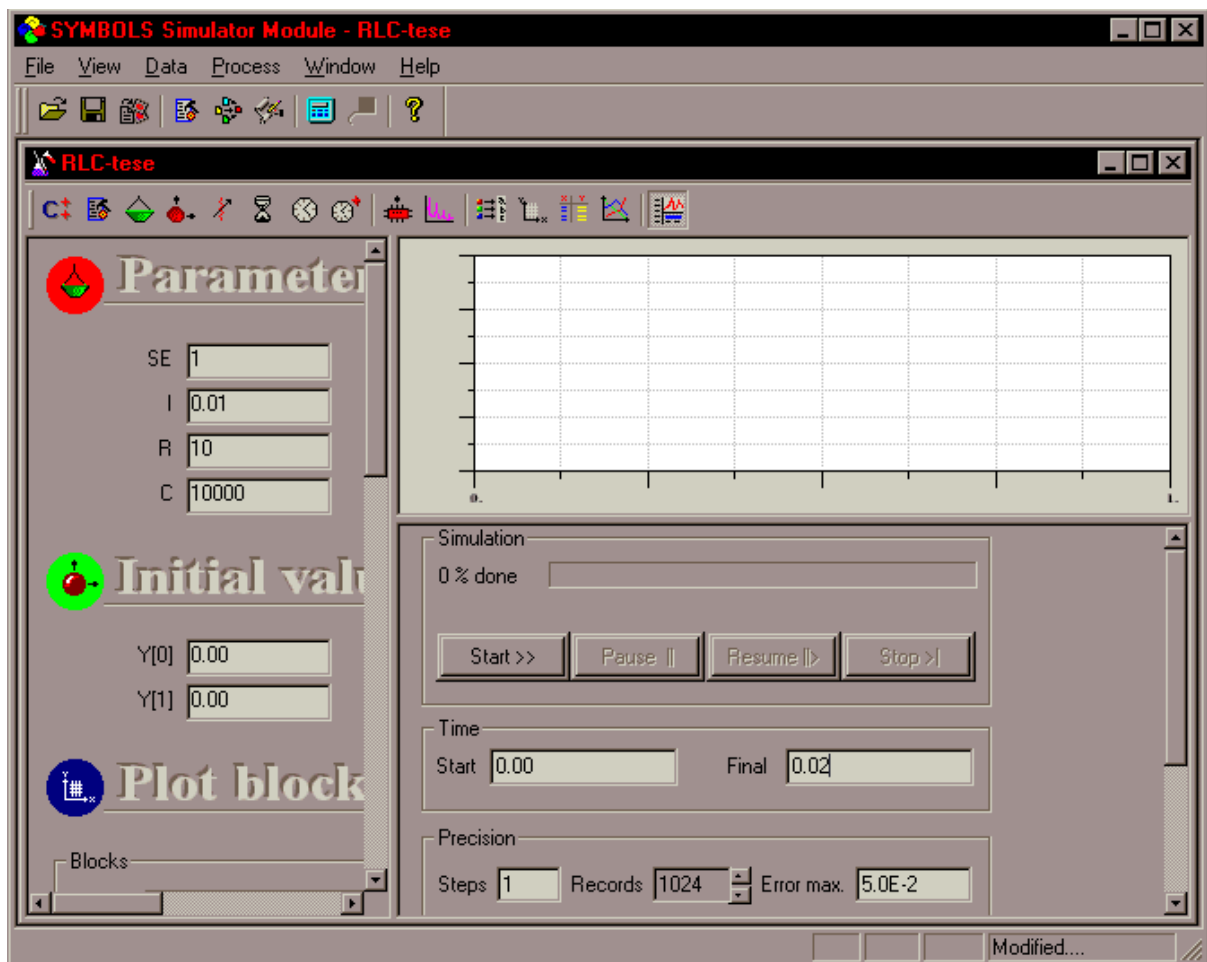


Figura 4.8 - Módulo *Simulator*: subjanela de parâmetros e representação gráfica

Para compilar deve-se selecionar na janela *Simulator* no menu *File* a opção *Compile*, onde se geram o arquivo fonte em C++ extensão “.cpp”, o arquivo “.def” e o “.bat”, e o arquivo “.obj”. A figura 4.9 apresenta uma janela de compilação. Deve-se selecionar *set path* para indicar o caminho do arquivo a ser compilado conforme se mostra na figura 4.10 clicando em *add* para inserir e *remove* para apagar o caminho de arquivos anteriores. Depois clicar em *Create* e finalmente em *Compile* selecionando a opção *Compile through Borland command line compiler*. O arquivo compilado tem a extensão “.sxp”.

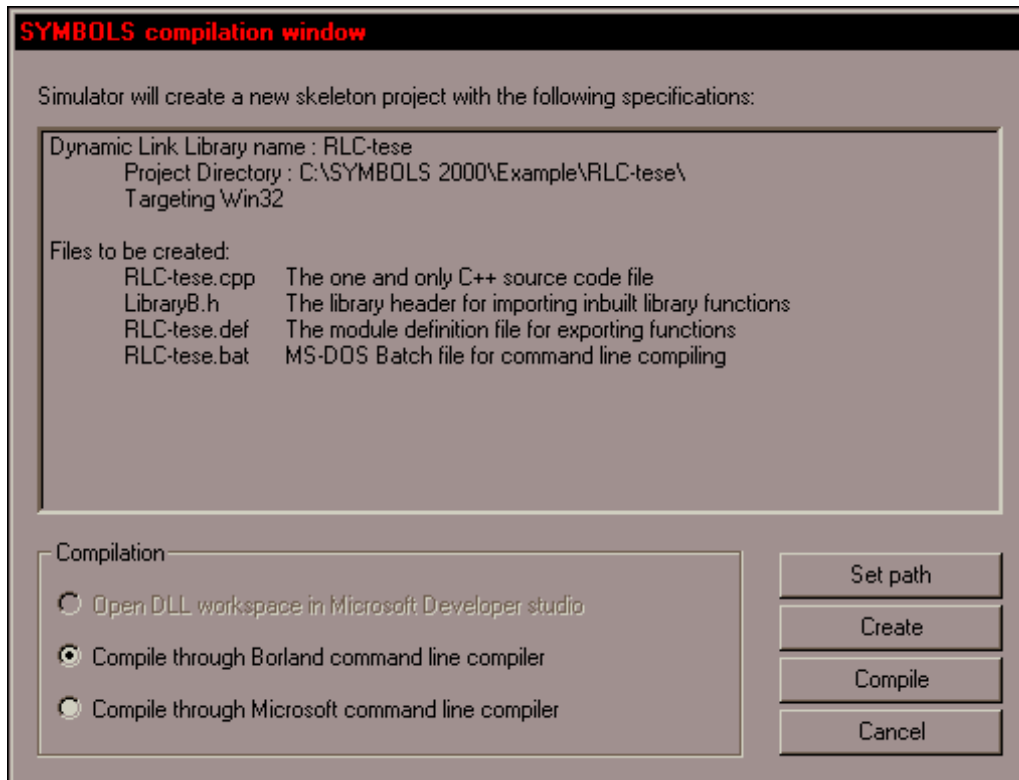


Figura 4.9 - Janela de compilação

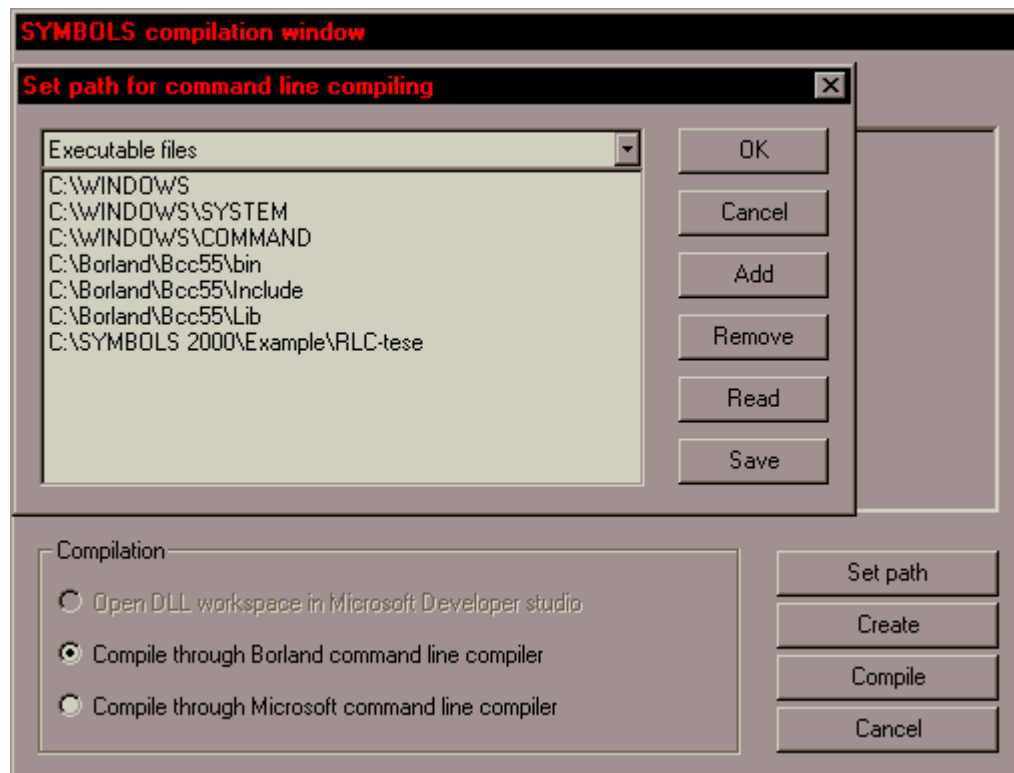


Figura 4.10 - Janela compilação: subjanela Set Path

Para realizar a simulação deve-se atualizar os parâmetros, para o exemplo utilizou-se a variável tempo final igual a 0.02 segundos. Para graficar seleciona-se na subjanela à esquerda *Plot blocks* a variável a ser graficada, neste exemplo foi selecionada **Q4** que é a variável de estado usada pelo programa e que corresponde à tensão na capacitância dividida por 10000. Portanto para obter o valor desta tensão multiplicou-se por 10000. Na figura 4.11 mostra-se o resultado da simulação.

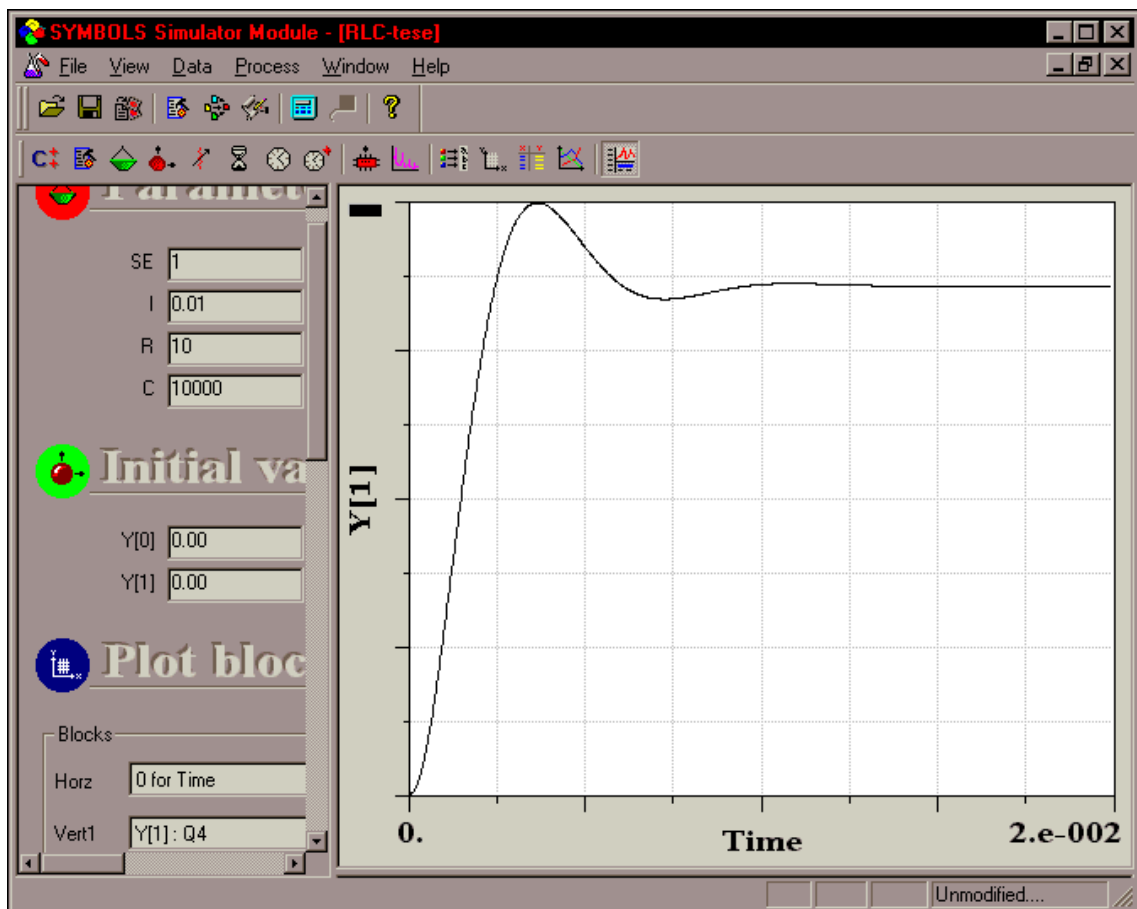


Figura 4.11 -Saída da simulação

No menu *View* seleciona-se a opção *Graphics display* ou o ícone correspondente na barra de ferramenta, onde se pode mudar a escala, cor, colocar legendas, etc., e na figura 4.12 mostra-se a saída da simulação para o circuito RLC serie.

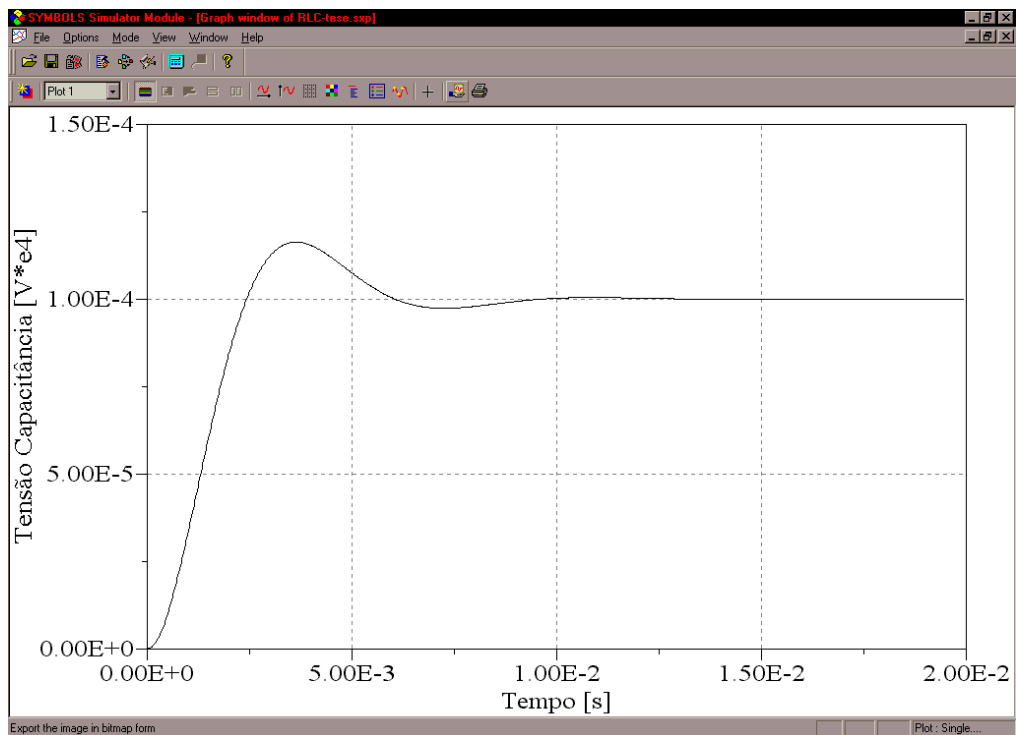


Figura 4.12 - Resultado da simulação com SYMBOLS 2000

4.4 POWERDYNAMO

POWERDYNAMO: É um aplicativo que permite a modelagem de sistemas físicos dinâmicos com GL, admite também combinações com diagrama de blocos denominadas diagramas mistos. Foi desenvolvido em 2002 pelo professor Kofman da Universidade Nacional de Rosário (Argentina). POWERDYNAMO é uma aplicação que se 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 GL a diagramas de bloco do SIMULINK. O programa contém bibliotecas com os elementos mais comuns dos GL, diagrama de blocos e mistos. É um aplicativo de fácil utilização e com um ambiente muito amigável.

4.4.1 Ambiente do POWERDYNAMO

A figura 4.13 mostra a janela principal de POWERDYNAMO onde se pode abrir modelos existentes, modelos novos, e bibliotecas. Também se pode aceder à ajuda do programa propriedade compartilhada por todas as janelas de todos os modelos.

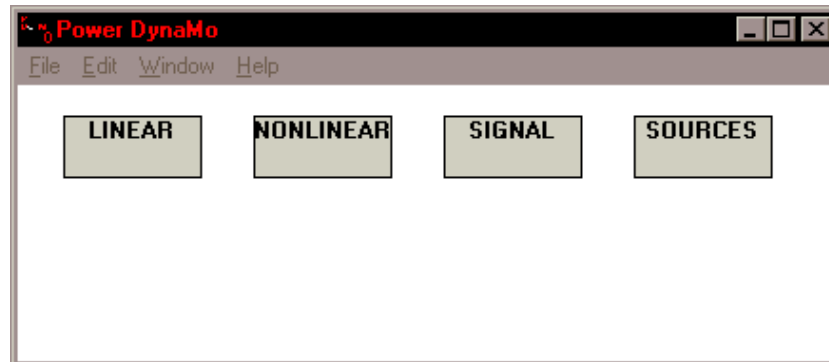


Figura 4.13 - Janela principal

Pode-se ver quatro bibliotecas: *LINEAR*, *NONLINEAR*, *SIGNAL*, *SOURCES*, qualquer uma delas pode ser acedida fazendo um duplo clique com o botão direito do *mouse*. Na figura 4.14 mostra-se uma janela de biblioteca de elementos lineares dos GL.

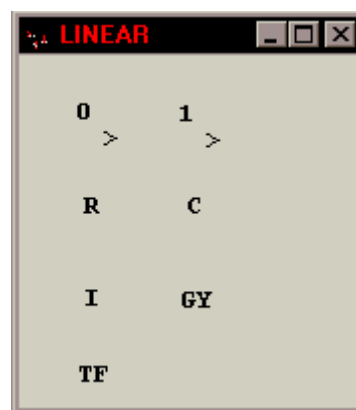


Figura 4.14 - Janela de biblioteca: elementos lineares dos Grafos de Ligação

As bibliotecas não podem modificar-se, entretanto abrindo-as como se fossem um modelo podem adicionar ou apagar elementos à vontade. Os modelos se constroem arrastando os elementos das janelas da biblioteca às janelas do modelo conforme figura 4.15, que podem

abrir-se a partir do Menu *File* da janela Principal, copiando e logo colando partes desde outros modelos, desenhando linhas de sinal e ligações de potência, etc. Desde o menu *File* de uma janela de modelo pode-se guardar, imprimir e fechar o modelo. Desde o menu *Edit*, é possível seleccionar, copiar (ao porta-papeis), colar (desde o porta-papéis). No menu *Options* pode-se escolher, ver ou não os parâmetros dos elementos de potência, e a versão de Simulink na qual vai-se converter os modelos. Na opção *Run* pode-se gerar o modelo Simulink, e assinalar e verificar a causalidade do modelo em forma automática, e desde o menu *Help* pode-se aceder à ajuda. Na figura 4.15 mostra-se a construção do modelo do circuito RLC serie.

As ligações podem-se desenhar clicando perto de um elemento e arrastando até o outro elemento. A causalidade também se pode assinalar em forma manual fazendo duplo clique sobre a ligação correspondente. As linhas de sinal podem-se desenhar “copiando” os conectores de sinal (“>”, “<”, “v”, “^” o “•”) com o botão direito e arrastando a um conector de entrada.

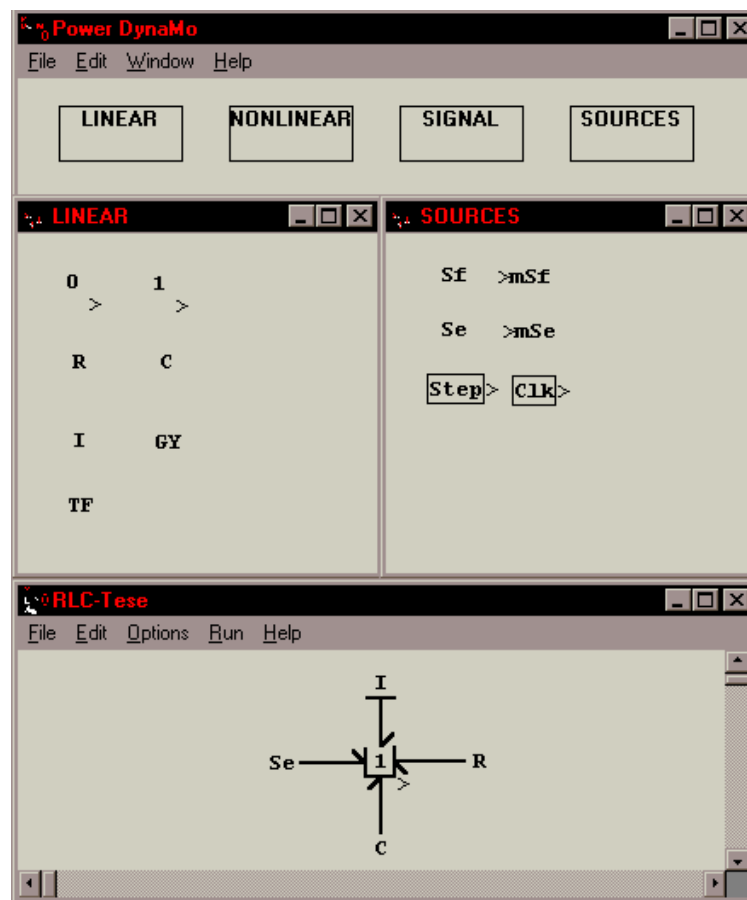


Figura 4.15 - Circuito RLC série com POWERDYNAMO

Os valores numéricos dos elementos se ingressam e podem modificar-se através de um duplo clique no elemento. Por exemplo, para a indutância pode-se observar na figura 4.16 a janela de parâmetros correspondente.

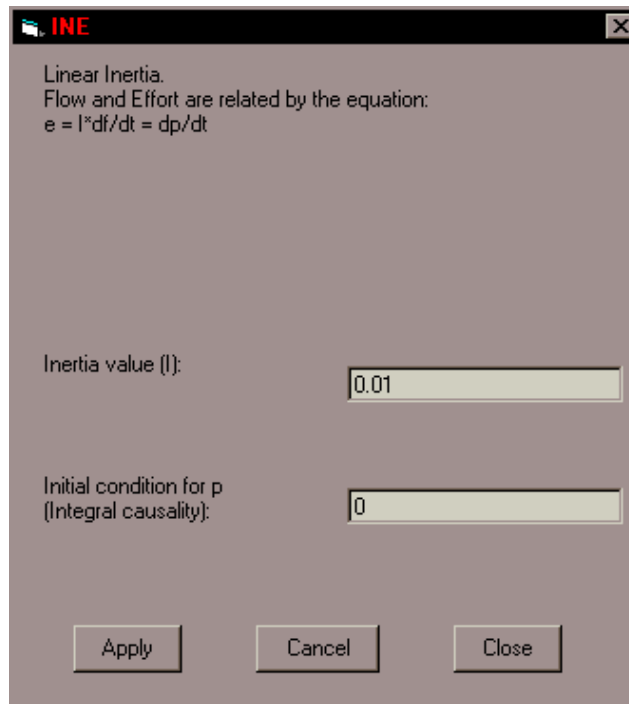


Figura 4.16 - Uma janela de parâmetros

Os arquivos de armazenamento dos modelos tem a extensão “.bgf” e as bibliotecas são arquivos de modelo com extensão “.lib” localizados no subdiretório *library* da aplicação. O programa assinala automaticamente a causalidade a todos os elementos do circuito, também é possível que seja feita pelo usuário. Pode-se detectar erros causais devido tanto a um possível conflito estrutural do modelo como uma previa assinalação errônea por parte do usuário. No algoritmo SCAP, existe basicamente duas ações: uma de assinalar causalidade a um elemento de acordo a sua prioridade causal, e outra de estender essa causalidade a través das junções, transformadores e giradores quando seja possível, esta segunda do menu *Run*. As rotinas de conversão à diagramas de blocos SIMULINK se baseiam na existência de um DB para cada elemento *bondgraph* causalizado, e, portanto de um DB para cada GL causalizado ou Diagrama Misto. Em base a esta propriedade se geram arquivos de texto com extensão “.cod” que tem o código do DB SIMULINK correspondente a cada elemento incluído nas livrarias da aplicação. Estes arquivos se encontram em diferentes diretórios segundo a versão de SIMULINK selecionada para a conversão. Na figura 4.17 mostra-se o diagrama de bloco do circuito e RLC serie gerado automaticamente pelo POWERDYNAMO.

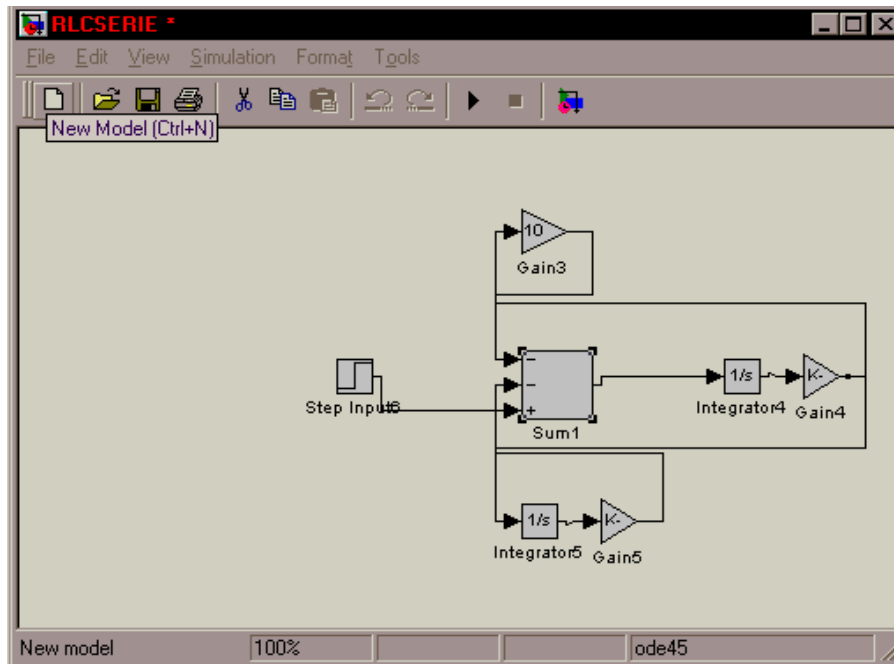


Figura 4.17 - Diagrama de blocos circuito RLC serie no ambiente SIMULINK

Como se pode observar para este simples exemplo o diagrama gerado pelo programa é um pouco confuso e é conveniente editá-lo para que seja mais claro e se possa visualizar melhor as entradas e saídas das variáveis. Na figura 4.18 mostra-se o diagrama de blocos modificado.

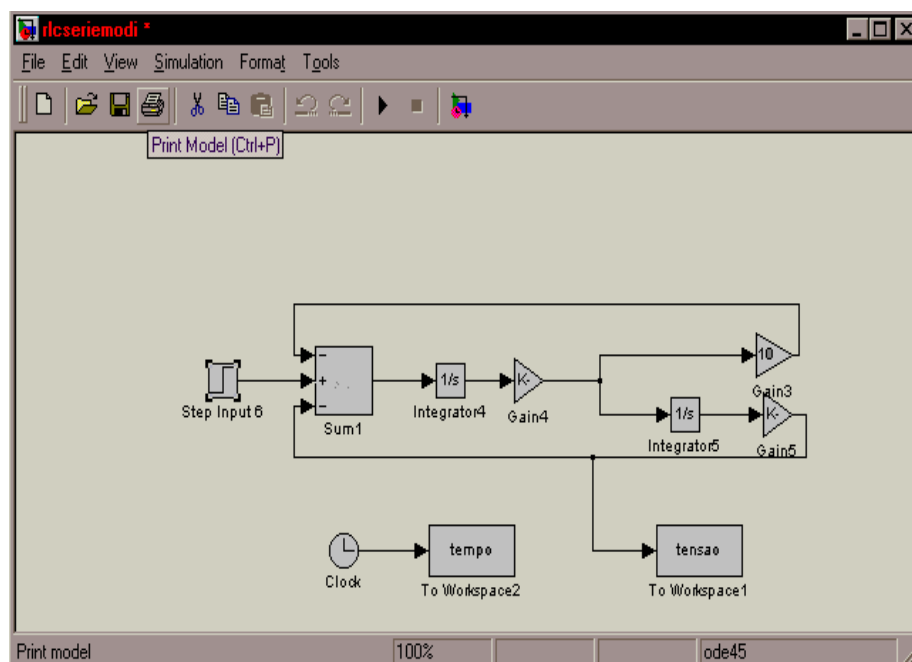


Figura 4.18 - Diagrama de blocos circuito RLC modificado

A saída da simulação variável Tensão e Tempo foi direcionada para o ambiente de trabalho do MATLAB conforme se pode ver na figura 4.19.

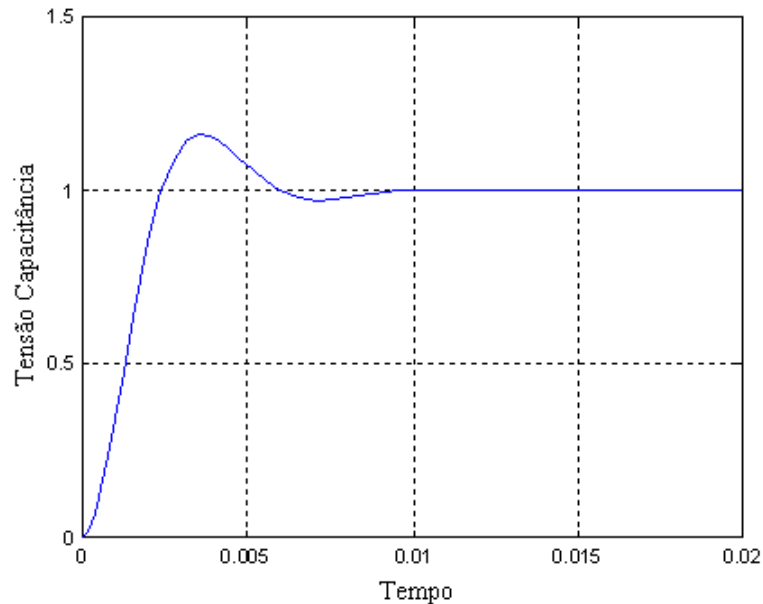


Figura 4.19 - Resultado da simulação circuito RLC serie com POWERDYNAMO

Outra forma de obter a saída da simulação é inserir diretamente desde da edição dos Grafos de Ligação os blocos correspondentes a *Sources* conforme mostrado na figura 4.20.

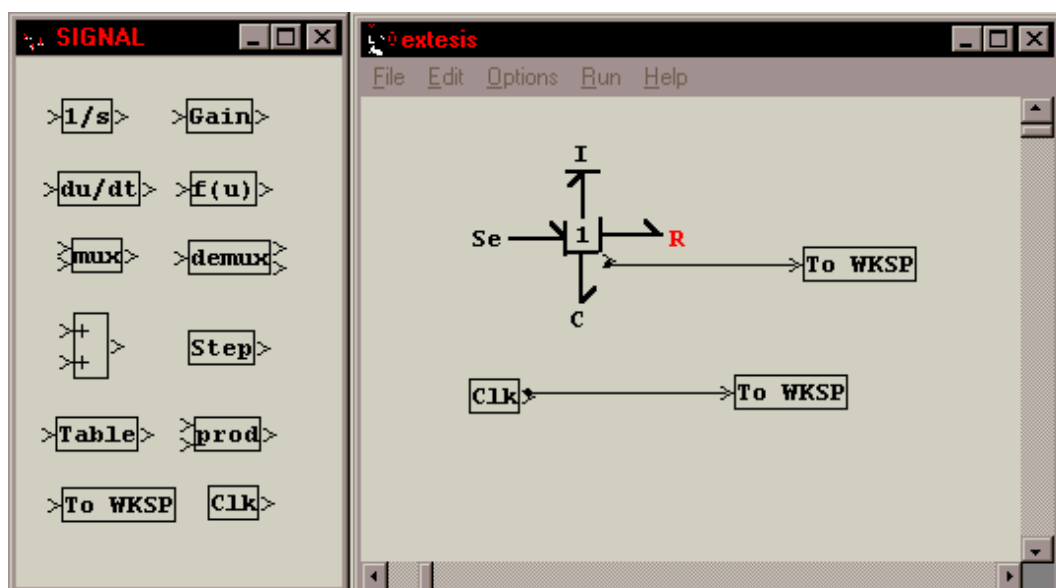


Figura 4.20 - Obtenção da saída da simulação desde Grafos de Ligação

Como é um circuito série somente pode-se obter a corrente no circuito porque o programa permite visualizar o fluxo nas junções “1” e o esforço nas junções “0”. Para obter outras variáveis podem ser geradas facilmente com os diagramas de bloco. Na figura 4.21 mostra-se a corrente simulada no circuito RLC.

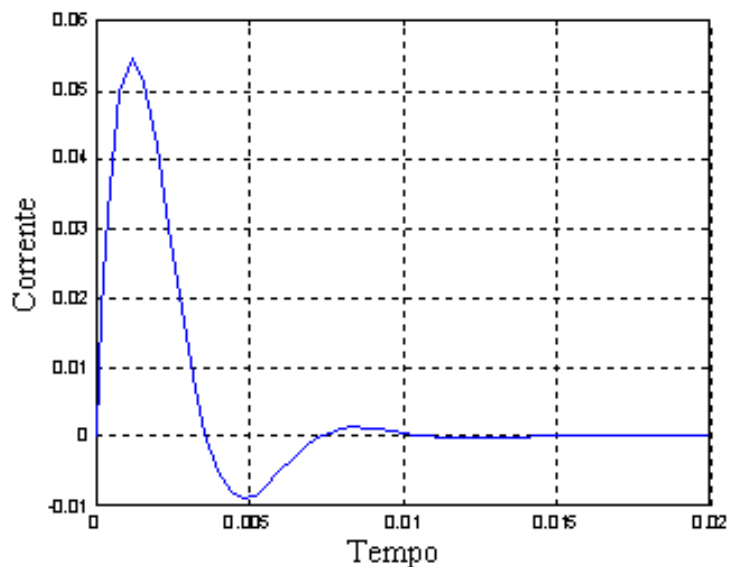


Figura 4.21 - Resultado da simulação

4.5 Outros programas

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.

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.

Existem também outros *softwares* usados para a modelagem de sistemas dinâmicos que utilizam a técnica dos Grafos de Ligação: CMBAS, DYMOLA, ENPORT, HYBRISIM, PASION, etc.

4.6 CONCLUSÃO

Foi apresentada uma revisão dos aplicativos de simulação de sistemas dinâmicos que utilizam a técnica dos Grafos de Ligação. Desta análise preliminar podemos sugerir para uso acadêmico e de pequenas instituições, levando em conta 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, SYMBOLS 2000, POWERDYNAMO.

Mostrou-se o funcionamento dos programas sugeridos com a simulação de um circuito elétrico RLC.

CAPÍTULO 5

SIMULAÇÃO DO GOLPE DE ARIETE COM GRAFOS DE LIGAÇÃO

5.1 Modelagem do Conduto Forçado com Parâmetros Concentrados

O fenômeno transitório de variação de pressão e de vazão que ocorre ao longo de um conduto forçado conhecido como golpe de ariete é 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. Na figura 5.1 mostra-se uma vista de um conduto forçado.



Figura 5.1 - Conduto forçado da Usina Antas II em Poços de Caldas (MG-Brasil)

Com os programas atuais a modelagem da tubulação utilizando Grafos de Ligação só é possível com parâmetros concentrados, ou seja, representando vários circuitos em série “**T**” ou “**π**”, não sendo isto uma restrição importante porque os transitórios hidráulicos são em geral fenômenos lentos. Este método foi primeiramente aplicado por Tiago Filho (1994) e depois foi verificado por Carvalho (1995).

Em transitórios lentos não é muito importante a forma como é discretizada a tubulação e se a capacitância é representada concentrada ou distribuída, só é importante o valor total da inertância. Este conceito pode ser justificado matematicamente colocando a conhecida fórmula de Michaud, equação (2.11), em função da inertância, equação (2.29), conforme mostra a equação (5.1):

$$\Delta H = \frac{2L.V_0}{g t_c} = \frac{2IQ_0}{\rho g t_c} \quad (5.1)$$

Nesta equação observa-se que o golpe de aríete é proporcional à inertância total **I**, proporcional à vazão em regime permanente **Q₀** e inversamente proporcional ao tempo de fechamento **t_c**, mas que não depende da capacitância.

Na figura 5.2 mostra-se a modelagem com 20-SIM de um conduto forçado de comprimento **L** e área **A** pela qual escoa uma vazão **Q₀** através de uma discretização com dois circuitos equivalentes “**T**” em série. Observa-se no lado esquerdo a fonte de pressão **Se**, a seguir o conduto forçado representado por três inertâncias **I**, três resistências moduladas **MR** e duas capacitâncias **C** concentradas. A resistência e a inertância nos extremos correspondem a 1/4 e as centrais a 1/2 dos valores totais, e cada capacitância corresponde a 1/2 do valor total. As resistências **MR**, e as inertâncias **I** estão associadas às junções “**1**” de fluxo comum e as capacitâncias **C** às junções “**0**” do esforço comum.

As resistências estão moduladas com a vazão para levar em conta que a queda de pressão é proporcional ao quadrado da vazão de acordo a equação (2.31). A vazão **Q** é medida no sensor de fluxo “**F**”, que tem a mesma função da junção “**1**” para efeitos de medição, a seguir é calculado o valor absoluto da vazão **|Q|** no bloco “**|x|**”, finalmente o resultado é multiplicado pela resistência em por unidade de vazão **R_Q**, bloco correspondente ao ganho “**K**”, obtendo-se a resistência da equação (2.31).

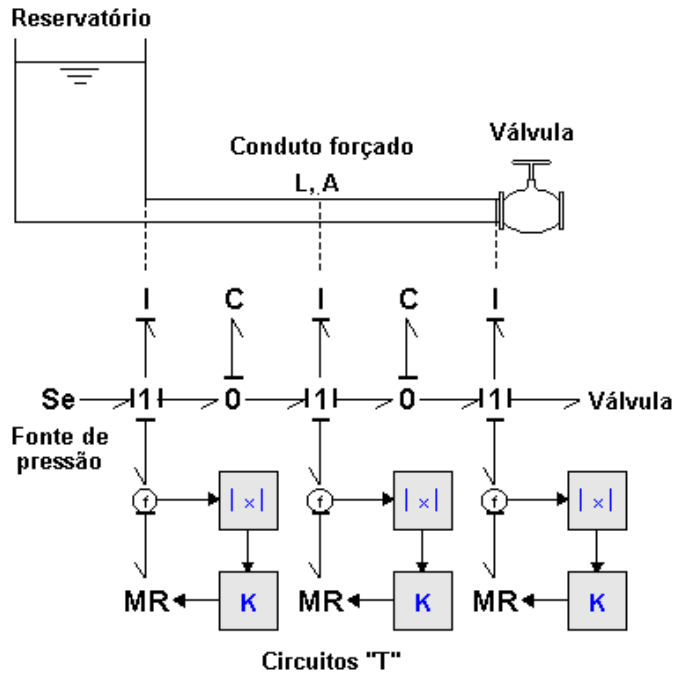


Figura 5.2 - Representação do conduto forçado discretizado em dois trechos com Grafos de Ligação

5.2 Modelagem da Válvula

A válvula segue a lei geral da queda de pressão proporcional ao quadrado da vazão dada pela seguinte equação (Rosenberg e Karnopp, 1983):

$$P = \frac{\rho}{2 C_d^2(x) A^2(x)} |Q| Q = R_{v/Q} |Q| Q \quad (5.2)$$

onde: ρ é a massa específica da água, $C_d(x)$ e $A(x)$ o coeficiente de descarga e a área da válvula respectivamente, x a coordenada de posição da mesma e $R_{v/Q}$ a resistência por unidade de vazão da válvula.

Em forma similar à tubulação pode-se definir uma resistência da válvula R_v dada por:

$$R_v = R_{v/Q} |Q| \quad (5.3)$$

A lei de manobra da válvula pode ser aproximada pela seguinte equação (Wylie e Streeter, 1990):

$$\hat{o} = \frac{C_d(x)A(x)}{C_d(0)A(0)} = \left(1 - \frac{t}{t_c}\right)^{E_m} \quad (5.4)$$

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

Na figura 5.3 mostra-se a modelagem da válvula com Grafos de Ligação, que como a resistência do conduto forçado está representada por uma resistência modulada pela vazão MR , também modulada pelo tempo de acordo à equação (5.4) representada pelo diagrama de blocos à direita.

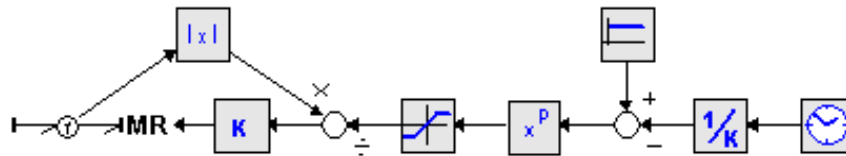


Figura 5.3- Representação da válvula com Grafos de Ligação

5.3 Exemplo Proposto por Wylie e Streeter (1990)

Esta aplicação foi proposta por Wylie e Streeter (1990) no seu conhecido livro “*Fluids Transients*” como exemplo 3.1, onde se considera um sistema simples, composto de um reservatório de nível constante, conduto uniforme e uma válvula na extremidade de jusante conforme mostrado na figura 5.4. Os dados fornecidos para a modelagem do conduto forçado (inertância, capacitância, e resistência fluida), da válvula e determinação de condições iniciais são os seguintes: o comprimento $L = 600$ m, diâmetro $D = 0.5$ m, fator de fricção $f = 0,018$, celeridade $a = 1200$ m/s, a altura reservatório $H_R = 150$ m, tempo de fechamento da válvula $t_c = 2.1$ s, coeficiente da válvula $E_m = 1.5$, $C_d(0)A(0) = 0.009$, aceleração gravidade $g = 9.806$ m/s², densidade da água $\rho = 1000$ kg/m³.

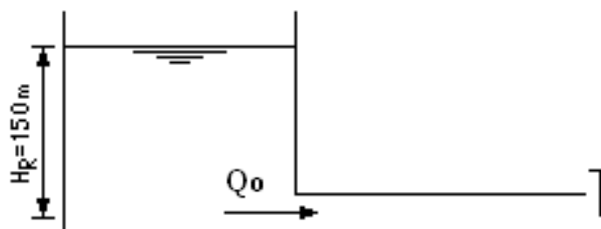


Figura 5.4 - Exemplo proposto por Wylie e Streeter

Apresenta-se a simulação do transitório do sistema hidráulico modelado com a técnica dos GL combinada com o diagrama de blocos. Utilizou-se o programa 20-SIM versão 3.3 conforme descrição feita no Capítulo 4. Foi escolhida pela sua facilidade de uso, interface amigável com o usuário e a disponibilidade de utilização de elementos modulados. Também se implementou o método das características usando o programa MATLAB com o objetivo de comparação.

5.3.1 Cálculo das Grandezas da Tubulação Discretizada em Dois Trechos com Circuitos “T”

Os valores totais da Inertância **I**, Capacitância **C** e Resistência em por unidade de vazão **R_{/Q}** para a tubulação, e **R_{v/Q}** para a válvula, foram calculados utilizando os dados fornecidos anteriormente e as equações (2.29, 2.30, 2.32 e 5.2) e mostram-se a seguir:

$$\begin{aligned} R_{/Q} &= 280133 \text{ Pa s}^2/\text{m}^6 \\ C &= 8.18123 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Pa} \\ I &= 3055775 \text{ Pa s}^2/\text{m}^3 \\ R_{v/Q} &= 6172840 \text{ Pa s}^2/\text{m}^6 \end{aligned}$$

No 20-SIM conforme mencionado no Capítulo 4, existem dois tipos de variáveis de estado segundo estejam relacionadas às inertâncias ou capacitâncias. Numa inertância a variável de estado é a integral do esforço, que se calcula como o produto da inertância pelo fluxo, e numa capacitância é a integral do fluxo que se calcula como o produto da capacitância pelo esforço. Estas variáveis devem ser “inicializadas”, portanto é necessário calcular previamente a vazão **Q₀** em regime permanente usando a seguinte expressão:

$$Q_0 = \sqrt{\frac{P}{R_{/Q} + R_{v/Q}}} = \sqrt{\frac{1470900}{280133 + 6172840}} = 0.4774 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para a vazão **Q₀** obtém-se as condições iniciais para as três inertâncias:

$$I_1 = \frac{I}{4} \cdot Q_0 = 364707$$

$$I_2 = \frac{I}{2} \cdot Q_0 = 729413$$

$$I_3 = \frac{I}{4} \cdot Q_0 = 364707$$

Para as duas capacitâncias tem-se as pressões P_1 e P_2 em função da pressão da fonte $P = 1470900$ Pa:

$$P_1 = P - \frac{1}{4} R/Q \cdot Q_0^2 = 1454937$$

$$P_2 = P - \frac{3}{4} R/Q \cdot Q_0^2 = 1423016$$

Com estas duas pressões as condições iniciais ficam:

$$C_1 = \frac{C}{2} \cdot P_1 = 0.059522$$

$$C_2 = \frac{C}{2} \cdot P_2 = 0.058216$$

5.3.2 Grafos de Ligação do Exemplo Proposto

A representação do sistema hidráulico: conduto forçado e válvula com o 20-SIM se mostra na figura 5.5:

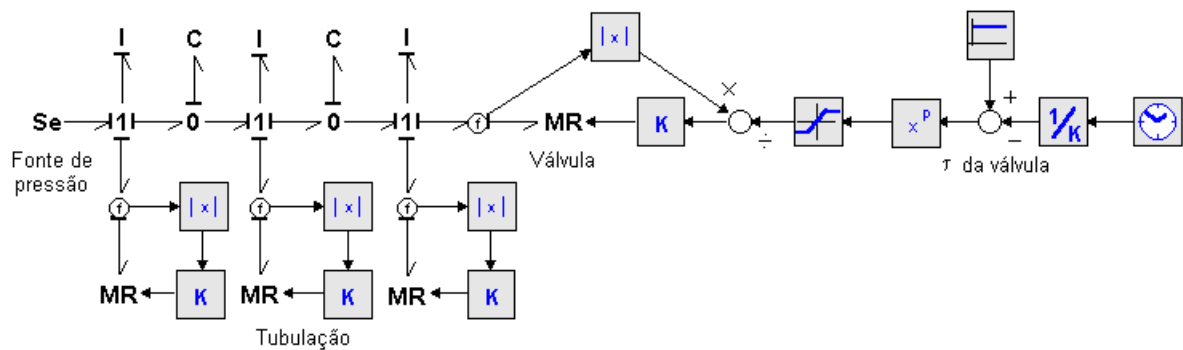


Figura 5.5- Representação do sistema hidráulico usando GL com o 20-SIM e a tubulação discretizada em 2 trechos “T”

5.3.3 Comparação da Simulação Obtida com Grafos de Ligação e com o Método das Características

Na figura 5.6 mostram-se os resultados da simulação para a sobrepressão ou carga na válvula e a vazão no início do conduto obtidos com os Grafos de Ligação e na figura 5.7 as mesmas variáveis calculadas com o método das características:

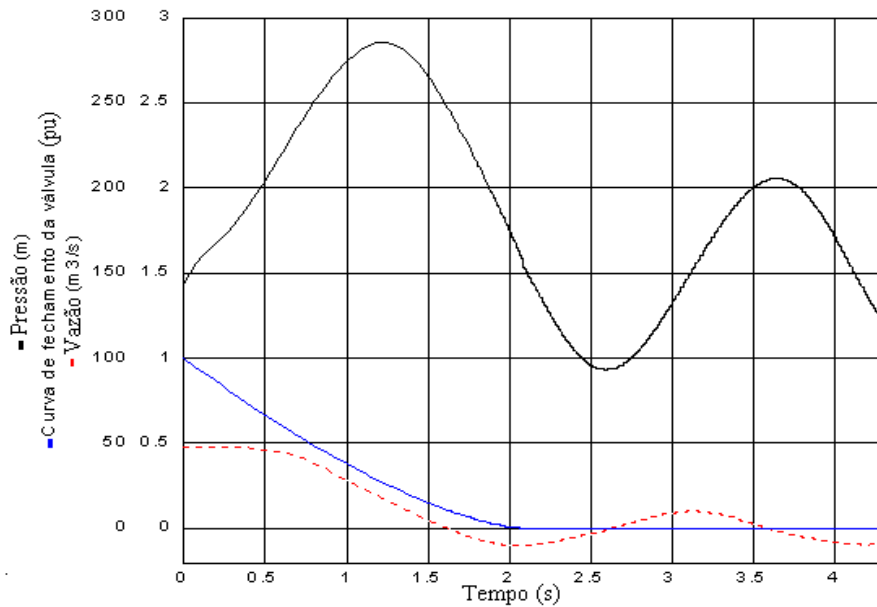


Figura 5.6 - Resultado da simulação com Grafos de Ligação

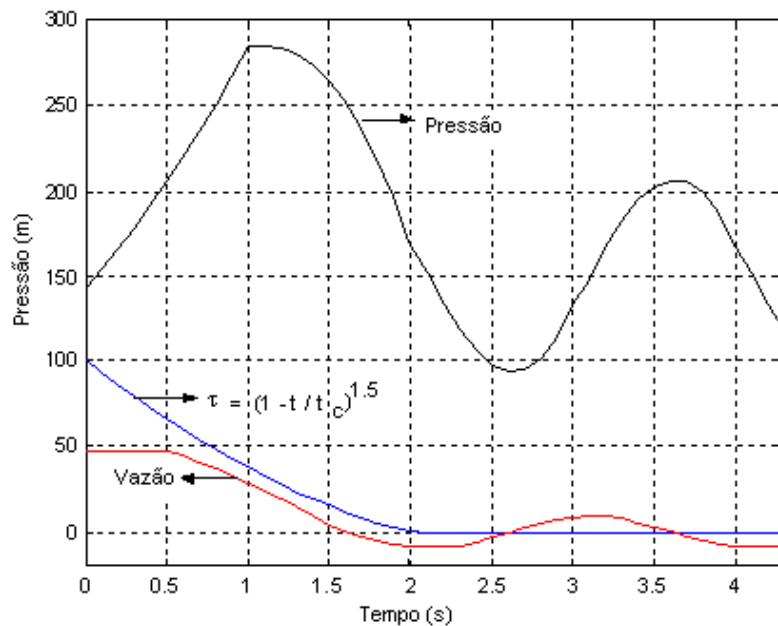


Figura 5.7- Resultado da simulação com o método das características

A figura 5.6 coincide exatamente com os resultados dados por (Wylie e Streeter, 1990), onde se usou um tempo de simulação de 4.3 segundos. Embora a simulação tenha sido realizada com as pressões em [Pa], sendo mais apropriada nos Grafos de Ligação para que o produto do esforço pelo fluxo de 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 pressão com o método das características é de 285 m e ocorre aos 1.1 segundos e com os Grafos de Ligação também é de 285 m e ocorre aos 1.2 segundos. As diferenças são mínimas desde o ponto de vista prático.

Se a simulação continua até 20 segundos, conforme mostra a figura 5.8, observa-se também uma grande semelhança entre os resultados obtidos pelos dois métodos, tanto o amortecimento como a frequência de oscilação são muito parecidos.

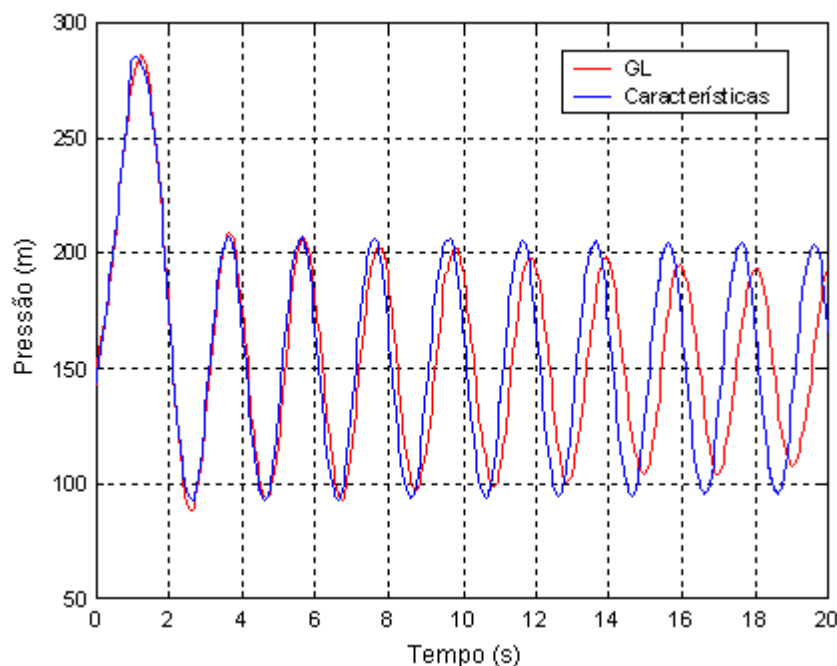


Figura 5.8- Sobrepressão na válvula com Grafos de Ligação e Método das características

5.4 Correção da Capacitância

Uma vez que a válvula fecha a tubulação oscila com a sua frequência natural e seus harmônicos ímpares (Wylie e Streeter, 1990). Geralmente em manobras lentas os harmônicos não são muito importantes e desde o ponto de vista prático pode ser suficiente uma

resposta que somente contenha a frequência fundamental. Um circuito modelado com um único “ π ” oscila com uma frequência natural sem harmônicos dada por:

$$\hat{u} = 2 \pi f = \frac{1}{\sqrt{IC/2}} \tag{5.5}$$

onde: **I** é a inércia total

C é a capacitância total

E a frequência fundamental de oscilação considerando a tubulação com parâmetros distribuídos é:

$$\hat{u} = \frac{\delta a}{2L} \tag{5.6}$$

Igualando as equações (5.5) e (5.6) obtém-se um valor de capacitância concentrada $C/2$ para o qual a frequência de oscilação do circuito com parâmetros concentrados coincide com a do circuito com parâmetros distribuídos:

$$\frac{C}{2} = \frac{4L^2}{I a^2 \pi^2} \tag{5.7}$$

A simulação na figura 5.10 ilustra como a equação (5.7) corrige totalmente a frequência de oscilação e melhora a amplitude da oscilação. Obviamente também é possível obter uma formula similar para um circuito equivalente “**T**”.

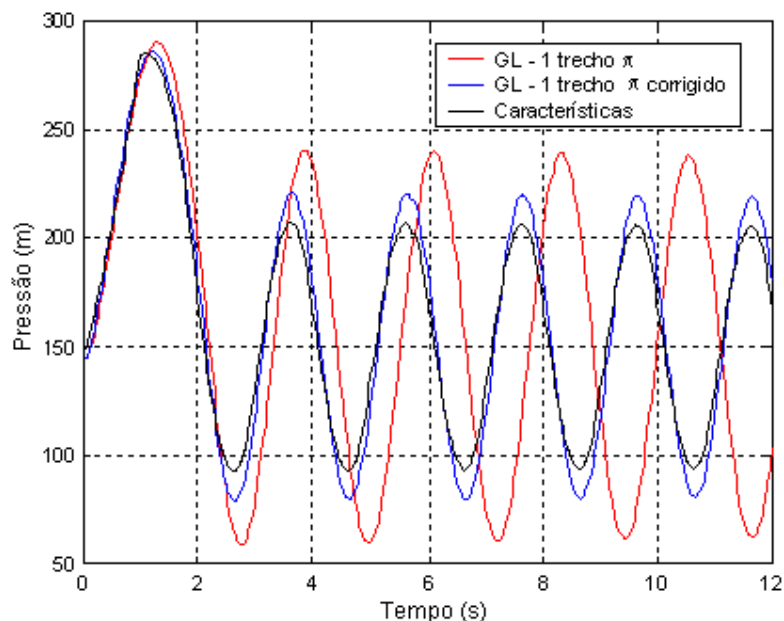


Figura 5.10 - Sobrepressão na válvula com correção da capacitância

5.5 Resistência Não Linear versus Resistência Linear

No caso anterior a modelagem da resistência do conduto forçado com GL foi considerada como não linear (resistência modulada com a vazão) para fazer uma comparação mais rigorosa com o método das características, no qual geralmente modela-se a resistência como não linear. Normalmente a resistência no conduto forçado é muito pequena e influi muito pouco nos transitórios hidráulicos, portanto não é crítica a forma em que se modela. Tiago Filho (1994) e Carvalho (1995) usaram uma resistência linear calculada pelo produto entre a resistência por unidade de vazão e a vazão inicial, ou seja:

$$R = R/Q |Q_0| \quad (5.8)$$

onde: R/Q é a resistência por unidade de vazão (equações (2.31) e (2.32))

O valor desta resistência é maior que o equivalente da representação não linear durante a manobra de fechamento de uma válvula durante a qual a vazão passa de um valor máximo inicial a um valor nulo o quase nulo. Como consequência disto o golpe de ariete é ligeiramente menor, e o amortecimento das oscilações livres no conduto forçado é um pouco maior com a resistência linear como ilustra a figura 5.9.

5.6 Exemplo Proposto por Watt (1980)

C.S. Watt (1980) obteve resultados experimentais em um banco de ensaio para o sistema mostrado na figura 5.11. Os resultados experimentais foram utilizados para comparar as simulações realizadas com o método das características e GL com êxito relativo, Watt (1980), Tiago Filho (1994), Carvalho (1995).

Os dados fornecidos para este exemplo são: $L = 15$ m, $D = 5$ cm, $t_c = 1$ s. Alguns dados como: f , Q_0 e $C_d(\mathbf{0})A_G(\mathbf{0})$ não foram fornecidos por Watt, e alguns deles não concordam com o registro experimental. O registro mostra que o valor da altura H_R é aproximadamente 1.3 m, em vez de 1.5 m conforme indicado na figura 5.11, a perda de carga na válvula aberta é de aproximadamente 0.30 m e na tubulação é de 1 m. A celeridade a foi estimada do período de oscilação livre da tubulação resultando $a = 875$ m/s.

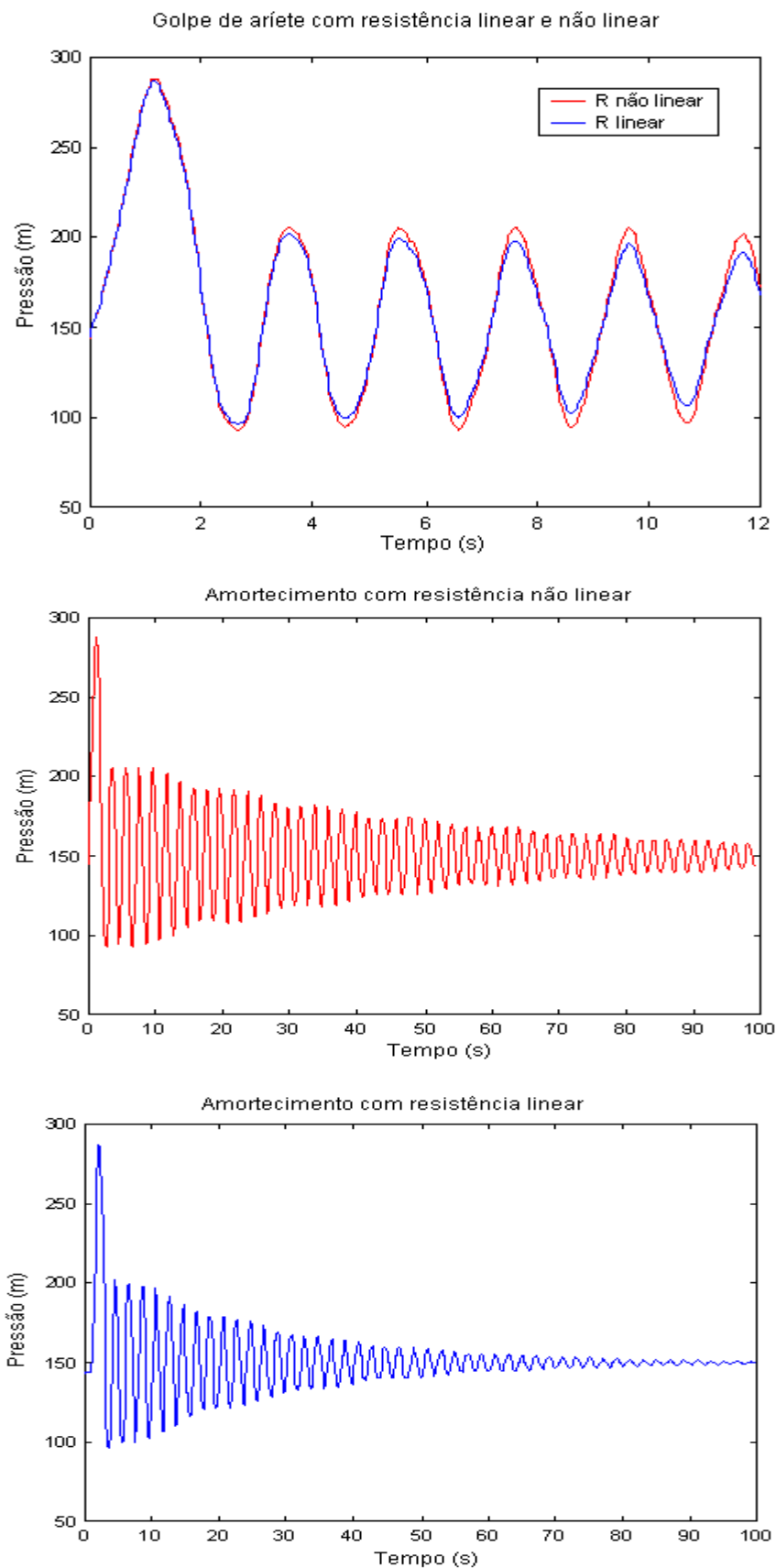


Figura 5.9 - Golpe de aríete e amortecimento com resistência linear e não linear

O fator de fricção f da tubulação, o coeficiente da válvula $C_d(0)A_G(0)$, a vazão Q_0 e a lei de fechamento da válvula τ modelada em vários trechos lineares foram estimados iterativamente, simulando com o programa do método das características adaptado do exemplo do item 5.3, para que a forma e o máximo do transitório de pressão do registro coincidissem o mais possível com a simulação.

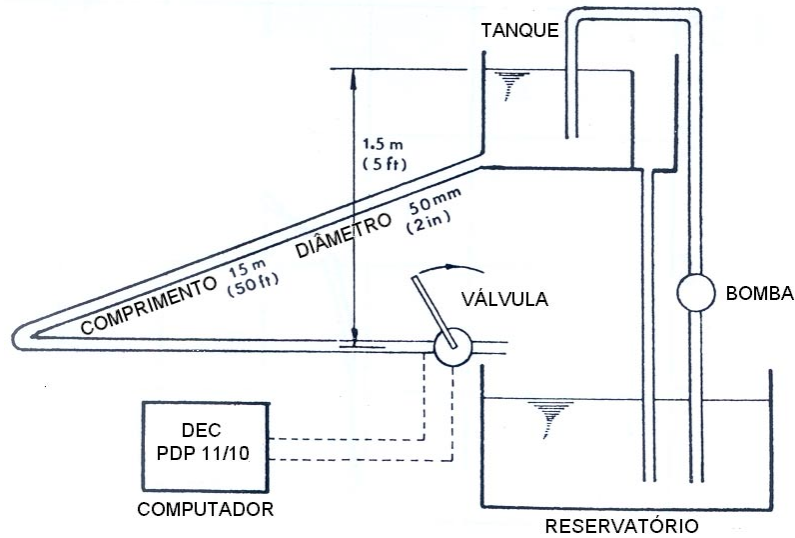


Figura 5.11- Esquema original do artigo de Watt

Os valores estimados são: $f = 0,026$, $H_R = 1,3$ m, $Q_0 = 0,00319$ m³/s, $(C_d A_G)_0 = 0,00144$, e a lei τ mostrada na tabela 5.1 e figura 5.11. Foi necessário modelar a lei com onze trechos lineares para se obter as oscilações de pressão do registro, relacionadas com as oscilações de velocidade no fechamento da válvula, e deixar uma abertura de 0,1 % para obter um amortecimento similar ao do registro quando a tubulação oscila livremente.

Tabela 5.1- Lei de fechamento da válvula

τ	t (s)
1	0
0,900	0,20
0,634	0,40
0,328	0,52
0,201	0,567
0,156	0,628
0,145	0,715
0,0917	0,802
0,0793	0,855
0,0687	0,877
0,0258	0,945
0,001	1

Os valores totais da Inertância **I**, Capacitância **C** e Resistência em por unidade de vazão $R_{/Q}$ para a tubulação e $R_{v/Q}$ para a válvula foram calculados conforme o exemplo desenvolvido no item 5.3.1 e são mostrados a seguir:

$$\begin{aligned} R_{/Q} &= 1,01159 \times 10^9 \text{ Pa s}^2/\text{m}^6 \\ C &= 3,84684 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{Pa} \\ I &= 7639437,3 \text{ Pa s}^2/\text{m}^3 \\ R_{v/Q} &= 2,40391000 \times 10^8 \text{ Pa s}^2/\text{m}^6 \end{aligned}$$

Para a vazão $Q_0 = 0,0031905 \text{ m}^3/\text{s}$ e pressão $P = 12747,8 \text{ Pa}$ obtém-se para a tubulação discretizada em um trecho com circuito “ π ”, as seguintes condições iniciais:

Para a inertância tem-se:

$$I_1 = I \cdot Q_0 = 24374$$

Para a capacitância tem-se:

$$P_1 = P - R_{/Q} \cdot Q_0^2 = 2451$$

$$C_1 = \frac{C}{2} \cdot P_1 = 4.7134 \times 10^{-7}$$

5.6.1 Grafos de Ligação do Exemplo Proposto

Na figura 5.12 mostra-se a representação com 20-SIM de um sistema como o mencionado através de um diagrama híbrido: GL mais diagrama de blocos. À esquerda do esquema observa-se a fonte de pressão **Se** e em seguida a tubulação discretizada com um único circuito equivalente “ π ”. Este circuito está formado pela inertância total **I** em série (junção “**1**”) com a resistência modulada total **MR** e a metade da capacitância total **C** em paralelo (junção “**0**”) no extremo direito. A resistência é modulada com o valor absoluto da vazão ($|x|$) para modelar a sua não linearidade, a vazão é medida através do sensor “**f**”.

A metade da capacitância que corresponderia ao extremo esquerdo foi desprezada por estar em “paralelo” com a fonte de pressão ideal. A válvula está representada com uma resistência **MR** modulada também pela vazão, e pela lei de fechamento da válvula $\tau(t)$, gerada pelos três blocos da direita.

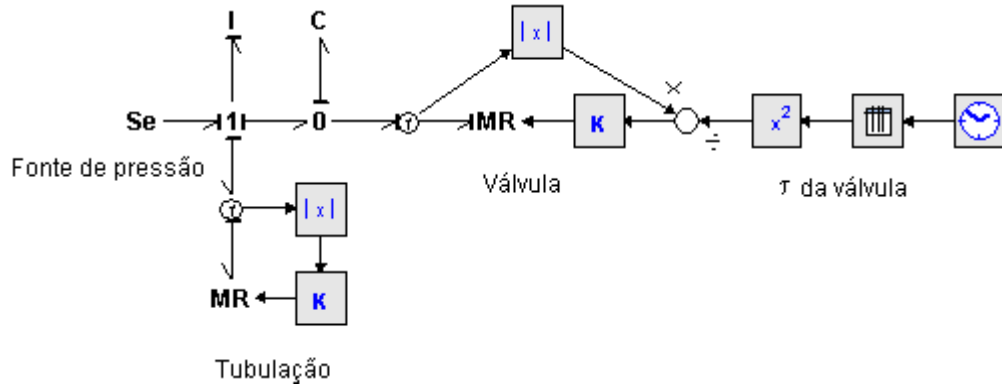


Figura 5.12 - Modelo dos GL para simular golpe de aríete com 20-SIM e tubulação discretizada em 1 trecho “ π ”

Discretizou-se também a tubulação em 4 trechos com circuitos “ π ” conforme mostra a figura 5.13 para comparar os resultados com o método das características.

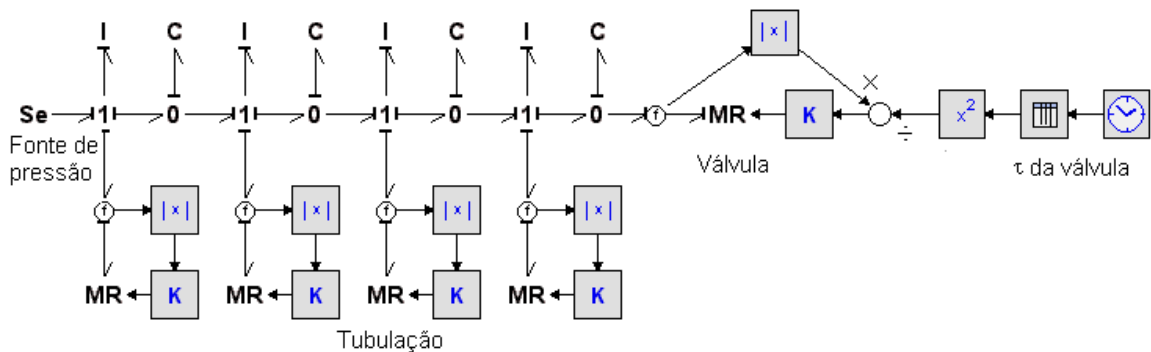


Figura 5.13- Modelo dos GL para simular golpe de aríete com 20-SIM e tubulação discretizada em 4 trechos “ π ”

5.6.2 Comparação da Simulação Obtida com Grafos de Ligação e com o Método das Características

Na figura 5.14 comparam-se os resultados da simulação com GL e a tubulação modelada com quatro circuitos “ π ” com os registros experimentais, observando-se uma diferença mínima desde o ponto de vista prático. A simulação mostra uma grande correlação durante o segundo que dura o fechamento da válvula e apresenta alguma diferença quando a tubulação oscila livremente depois de culminada a manobra. A similitude da primeira parte se deve a que o fechamento da válvula é lento em relação ao tempo de viagem das ondas de

pressão na tubulação (Souza,1999), portanto o processo está dominado pela inércia, tendo pouca importância a forma como é modelada a capacitância (concentrada ou distribuída). Uma vez que a válvula fecha a tubulação oscila com a sua frequência natural e seus harmônicos ímpares (Wylie e Streeter,1990), processo no qual é importante a capacitância e como está distribuída. Estes conceitos são de aplicação bastante geral nas centrais hidrelétricas onde os processos de fechamento se recomendam que sejam lentos.

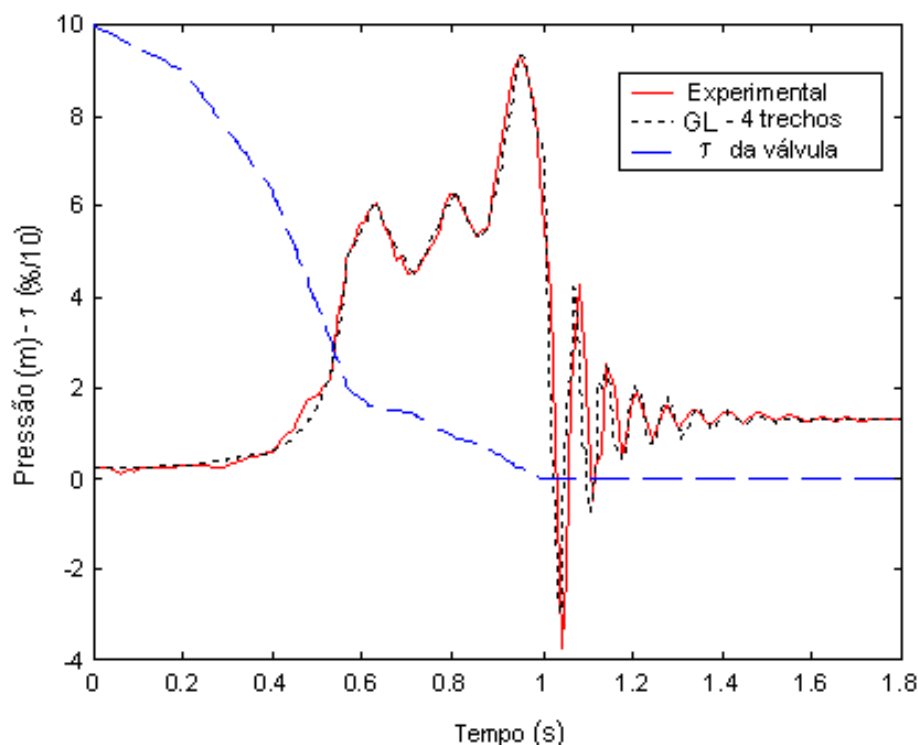


Figura 5.14- Transitório de pressão medido e simulado com GL

A figura 5.15 mostra as simulações com GL e o método das características fazendo um “zoom” entre 0,9 e 1,1 segundos, quando se produzem os picos de sobre pressão positiva e negativa e os maiores erros pela discretização do modelo da tubulação com GL. Comparam-se os resultados com a tubulação modelada com um trecho, com quatro trechos e com o método das características. Observa-se que os resultados são praticamente coincidentes ao redor da sobre pressão máxima, com alguma diferença no resto, mais importante na forma das ondas que nos valores. Com um só trecho oscila muito “senoidalmente” e com uma frequência um pouco menor, mas com quatro trechos a solução se aproxima ao aspecto “triangular” e à frequência fundamental da solução com o método das características.

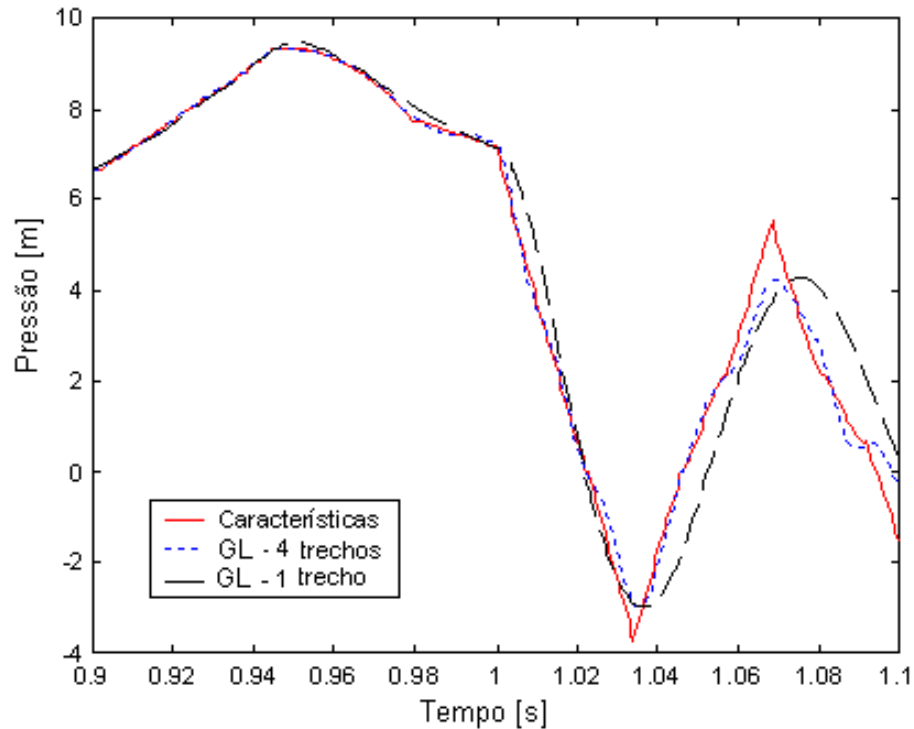


Figura 5.15 – Golpe de aríete simulado com o método das características e GL

5.7 Conclusões

Foi apresentada a simulação do golpe de aríete com os Grafos de Ligação e com o método das Características para um exemplo clássico do livro de Wylie e Streeter, onde a tubulação foi discretizada em dois trechos em circuitos “T”, e a simulação para um caso de referência proposto por Watt com a tubulação discretizada em um trecho e quatro em circuitos “ π ”.

Para o exemplo de Wylie e Streeter a simulação 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 ocorreu e na forma geral das oscilações no transitório.

Para o caso de Watt se observou que as simulações com Grafos de Ligação estão muito próximas das simulações com o método das características e com o registro das medições do banco de ensaio.

Analisou-se o efeito de considerar a resistência linear e não linear. A análise mostrou que com a resistência linear somente se tem um amortecimento um pouco maior, mais isto não tem em geral importância prática.

CAPÍTULO 6

INTERAÇÃO ENTRE TURBINA, REGULADOR DE VELOCIDADE E CARGA ELÉTRICA

6.1 Considerações Gerais

A dinâmica dos Sistemas de Potência é um assunto de considerável complexidade que segundo o conhecido especialista F. P. De Mello (1979) pode ser geralmente tipificada em três fenômenos:

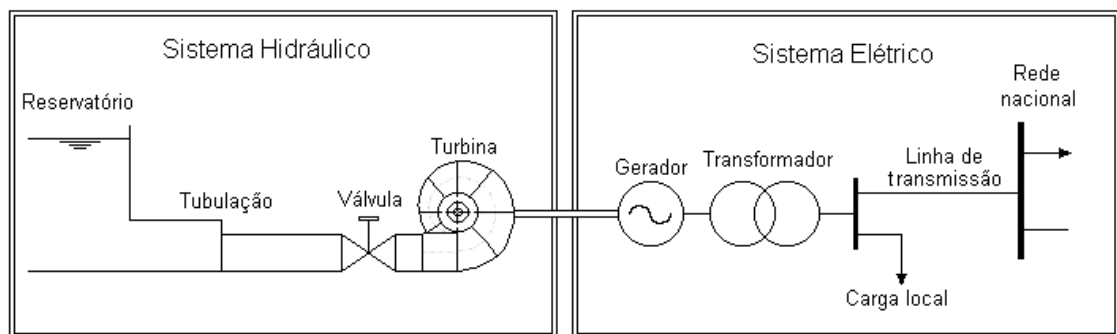
- Dinâmica da Turbina, onde interessa o controle da resposta de variáveis como potência no eixo e pressão no conduto forçado.
- Dinâmica da Geração (controle da Regulação de Velocidade e da Carga-Frequência do sistema), diz respeito ao comportamento de todo o Sistema de Potência em relação à frequência e potência nas linhas de interligação.
- Dinâmica das Máquinas Elétricas e da Excitação, que envolve o estudo de condições da rede e o comportamento do fluxo de potência elétrica, tensões, correntes, etc. Estes fenômenos são normalmente estudados na área de Estabilidade de Sistemas de Potência.

Felizmente, raramente é necessário considerar, simultaneamente, todos os fenômenos em minúcias e, dependendo do fenômeno particular em interesse, várias simplificações podem ser realizadas nos modelos dos efeitos menos importantes e menos relevantes. Isto leva a necessidade de modelos especiais de sistemas de potência “talhados” para o problema específico, no lugar de modelos gerais que considerem todos os efeitos, tanto os relevantes como os irrelevantes. Por exemplo, os transitórios eletromagnéticos numa linha de transmissão têm durações da ordem de milisegundos enquanto os transitórios hidráulicos e mecânicos têm durações de segundos e até minutos. Então, para o estudo de transitórios eletromagnéticos pode-se considerar o sistema hidromecânico em regime permanente (variáveis constantes) e

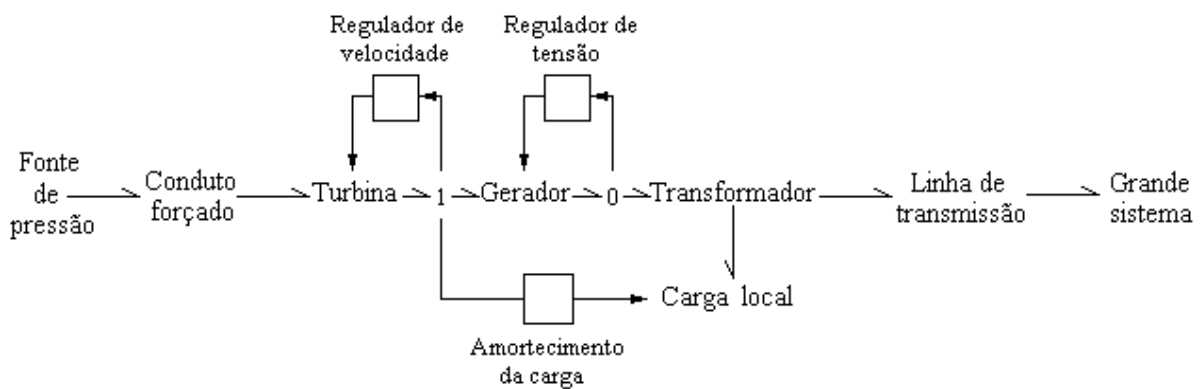
para os estudos de transitórios hidromecânicos pode-se considerar os transitórios eletromagnéticos como instantâneos, ou seja, a modelagem do sistema elétrico pode fazer-se em forma muito simplificada.

Existem exceções, fenômenos de interação entre o sistema hidráulico e elétrico onde é importante uma modelagem mais detalhada do sistema elétrico. Por exemplo, na operação de turbinas Francis em condições de baixa queda podem ocorrer oscilações de pressão que causam oscilações de potência, e se esta é usada como sinal estabilizador, *Power System Stabilizer* (PSS), ocorrerão oscilações de potência reativa e tensão nos terminais do gerador. Tem-se pesquisado esquemas de controle *feedforward* para reduzir estes efeitos em PSS sintonizados para amortecimento local e inter-área (Bollinger et al., 1992). Outros exemplos são alguns estudos especiais de falhas a terra e de sincronização fora de fase (Nicolet et al., 2003).

A modelagem de uma hidrelétrica, particularmente de uma PCH, responde quase sempre a um esquema simbólico como o da figura 6.1(a), adaptado de um artigo de H. Ramos (1999), o qual pode ser representado convenientemente com o denominado GL em “palavras” da figura 6.1(b).



(a)



(b)

Figura 6.1 - Interação entre sistema hidráulico e elétrico:
 (a) Esquema simbólico, (b) Grafo de Ligação em “palavras”

Neste trabalho considera-se o caso particular de um sistema hidrelétrico isolado, ou seja, sem a linha de interligação. Para a maioria dos estudos de um sistema isolado basta com considerar a resposta instantânea das linhas de distribuição locais e do gerador com seu sistema de excitação. Com estas simplificações justificadas a carga elétrica pode considerar-se como uma carga mecânica conectada diretamente no eixo da turbina. Do gerador somente é necessário levar em conta o seu momento de inércia agrupado com o da turbina e do volante de inércia, se existe. O esquema de GL em “palavras” da figura 6.2 ilustra o caso.

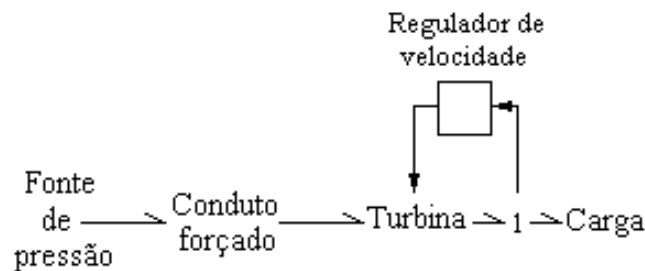


Figura 6.2 - GL em “palavras” de um sistema hidrelétrico isolado

Com esta modelagem simplificada é possível fazer vários estudos:

- Determinação de limites de velocidades para o fechamento ou abertura de válvulas, distribuidor da turbina, etc., quando ocorrem rejeições ou aceitações de carga.
- Cálculo da pressão mínima/máxima em máquinas ou tubulações.
- Cálculo de mínimo/máximo nível em chaminés e canais.
- Determinação de parâmetros de reguladores de velocidade
- Otimização de modos de operação e transições.
- Simulação de condições e/ou transições.
- Estudo de novas estratégias.

A modelagem desenvolvida neste capítulo está orientada fundamentalmente a solução dos dois primeiros pontos. Na próxima seção se analisa o modelo de turbina ideal não linear com GL, a análise é uma resposta à pergunta: o melhor modelo da turbina é um girador, como afirma o Professor H. Paynter do M.I.T. (2000), criador da metodologia de GL, ou é um transformador? A seguir discute-se a modelagem com GL das perdas internas da turbina e a inclusão da inércia mecânica junto com a carga equivalente. Logo, apresenta-se um modelo simplificado de regulador de velocidade com diagrama de blocos e o modelo integral de um sistema hidrelétrico isolado. Valida-se a modelagem proposta com dois casos práticos

estudados com outras metodologias, um caso clássico do conhecido livro de Wylie e Streeter (1993), e um estudo recente fornecido pela VOITH SIEMENS (2002) sobre a usina Santa Clara, localizada em Minas Gerais na divisa com os estados do Espírito Santo e Bahia. Finalmente resumem-se as principais conclusões.

6.2 Modelagem da Turbina com Grafos de Ligação: Girador ou Transformador?

Na metodologia dos GL uma turbina hidráulica é um transdutor, ou conversor, de potência entre dois domínios de energia, entre o hidráulico e o mecânico. Como foi visto no Capítulo 3 os transdutores podem ser de dois tipos: girador ou transformador, e se caracterizam por ser ideais, ou seja, seu rendimento é 100 % e não armazenam energia. O rendimento (perdas) e os efeitos de armazenagem de energia podem ser modelados de diferentes maneiras externamente. As equações para o girador e transformador se repetem para maior clareza:

$$\text{Girador:} \quad e_1 = r f_2, \quad r f_1 = e_2 \quad (6.1)$$

$$\text{Transformador:} \quad e_1 = m e_2, \quad m f_1 = f_2 \quad (6.2)$$

Verificando-se para ambos a conservação da potência em todo instante de tempo, ou seja:

$$e_1 f_1 = e_2 f_2 \quad (6.3)$$

A equação da potência no eixo de uma turbina hidráulica no sistema técnico de unidades é a conhecida expressão (Wylie e Streeter, 1993):

$$P_e \propto y Q H \eta, \quad \text{com } Q \propto y \sqrt{H} \quad (6.4)$$

onde: P_e é a potência no eixo [W]

η é o rendimento [pu]

y é a abertura do distribuidor [pu]

Q é a vazão [m^3/s]

H é a carga ou altura de coluna de água [m]

Para a modelagem com GL como foi discutido no Capítulo 2, é conveniente que as equações sejam expressas no Sistema Internacional de Unidades devido a que os módulos “**m**” ou “**r**” têm que ser numericamente os mesmos para o par de equações (6.1) e (6.2). A equação da turbina ideal, correspondente a equação 6.4, fica então:

$$T \omega = P Q \quad \text{e} \quad Q = K y \sqrt{P} \quad \text{ou} \quad P = \frac{Q^2}{(K y)^2} \quad (6.5)$$

onde: **T** é o torque [N.m]

ω é a velocidade angular [rd/s]

P é a pressão [Pa]

K é uma constante de proporcionalidade

Das equações 6.1, 6.2 e 6.5 os módulos dos transdutores ficam:

$$r = \frac{Q^2}{(K y)^2 \omega} \quad \text{e} \quad m = \frac{\omega}{K y P^{1/2}} \quad (6.6)$$

Observa-se que ambas representações da turbina são possíveis, um girador modulado não linear ou um transformador modulado não linear. No girador a modulação depende inversamente do quadrado da posição do distribuidor e da velocidade angular e diretamente do quadrado da vazão, enquanto no transformador depende inversamente da posição do distribuidor e da raiz quadrada da pressão e diretamente da velocidade angular. É evidente que o módulo “**m**” do transformador é muito mais linear, já que a velocidade e a pressão são essencialmente constantes, e quando variam num transitório geralmente aumentos de velocidade estão acompanhados de aumentos de pressão e vice-versa, com o qual o módulo “**m**” varia relativamente pouco. Para validar este conceito mostra-se na figura 6.3 a evolução dos módulos “**r**” e “**m**” adimensionais, excluindo o efeito da posição do distribuidor, durante uma rejeição total de carga. Está claro que um transformador linear modulado com a abertura é uma representação razoável da turbina para perturbações de relativa importância, mas que um girador linear não seria adequado nem sequer para pequenas perturbações. Considerando que a relação entre vazão e abertura é muito linear, e assumindo velocidade constante (regulador em regime permanente) o módulo “**r**” do girador (equação 6.6) fica constante, então um girador é uma muito boa representação do sistema turbina-regulador em regime permanente, mas não em regime transitório.

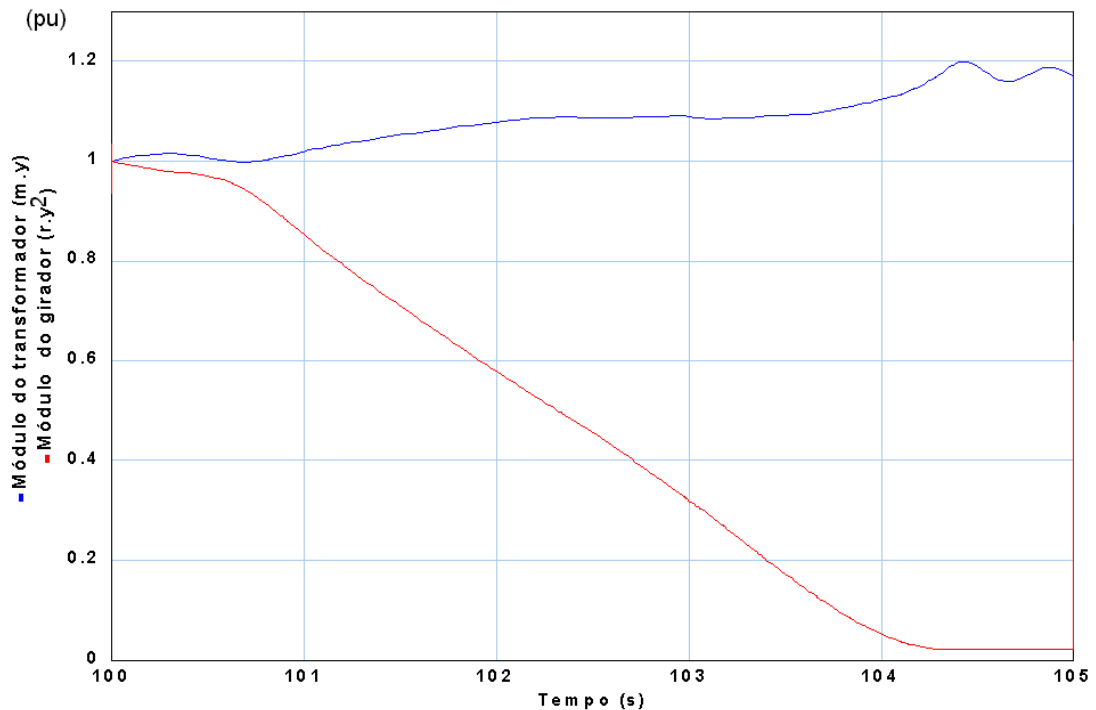


Figura 6.3 - Variação dos módulos do transformador e girador durante uma rejeição total de carga, excluindo o efeito da abertura do distribuidor

O modelo básico da turbina como transformador modulado não linear para estudos de transitórios mostra-se na figura 6.4. Na figura, o sensor “e” cumpre a mesma função para os efeitos de medição que uma junção “0”, ou seja, mede esforço que no caso é pressão.

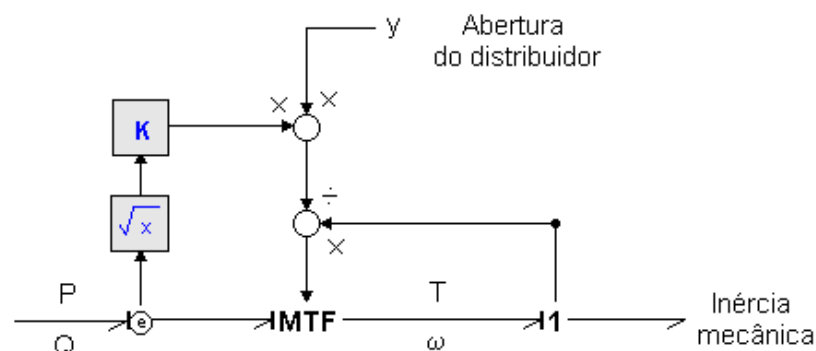


Figura 6.4 - Modelagem da turbina como transformador modulado não linear com 20-SIM

6.3 Representação com Grafos de Ligação da Inércia Mecânica e da Carga Elétrica

A carga do sistema elétrico é geralmente modelada como uma potência que depende da frequência, a qual é proporcional à velocidade do gerador, ou simplesmente como uma

potência constante. Com GL a representação natural é como torque, que eventualmente pode-se modular para levar em conta a dependência da frequência. Neste trabalho somente consideram-se cargas na forma de fontes inversas moduladas por combinações de degraus para aproximar rejeições ou aceitações.

Quando ocorre uma variação na carga do sistema elétrico, é absorvido um nível de potência diferente no gerador e aparece um torque desbalanceado na turbina, pelo que a velocidade começa a variar. A equação básica para a mudança de velocidade é:

$$T - T_G = J \frac{d\omega}{dt} \quad (6.7)$$

onde: T é o torque produzido pela turbina

T_G é o torque correspondente à potência absorvida pelo gerador (carga elétrica equivalente)

J é o momento total de inércia (turbina, gerador e volante de inércia)

$\frac{d\omega}{dt}$ é a aceleração angular

Na figura 6.5 mostra-se uma vista de uma turbina, volante de inércia e gerador e na figura 6.6 a representação da inércia e da carga combinando GL com diagrama de blocos.

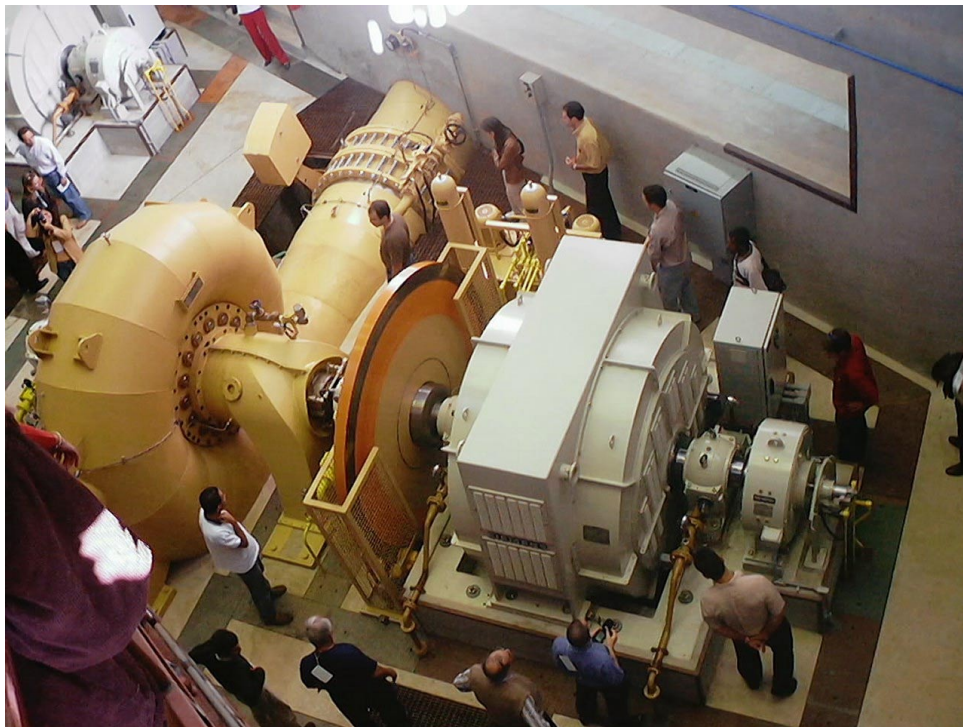


Figura 6.5 - Turbina, gerador e volante de inércia da Usina Antas II de Poços de Caldas

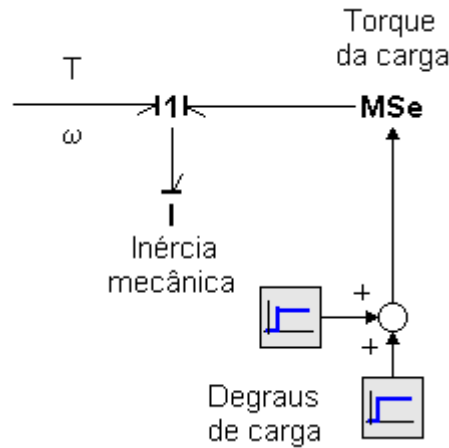


Figura 6.6 - Representação com 20-SIM da inércia e da carga como fonte inversa modulada.

6.4 Perdas e Rendimento

O modelo apresentado da turbina como um transformador modulado está livre de perdas, as perdas reais de uma máquina podem ser representadas por resistências **R** ou por fontes negativas (Thoma, 1975). É conveniente dividir as perdas das máquinas hidráulicas em duas classes: perdas de esforço e perdas de fluxo. As perdas de esforço, pressão e torque, podem ser modeladas por resistências conectadas à máquina com junções “1” e as perdas de fluxo, vazão e velocidade (escorregamento), por resistências conectadas com junções “0”, conforme mostra-se na figura 6.7.

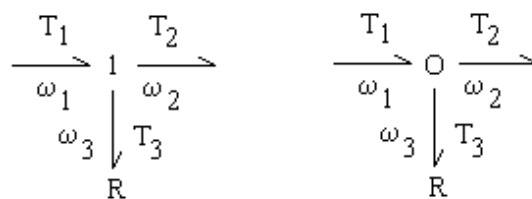


Figura 6.7 - Perdas de torque (esquerda) e por escorregamento (direita) modeladas com resistências.

As resistências somente podem ser consideradas lineares com o denominado atrito viscoso (com viscosidade constante que é uma pobre aproximação da realidade), resultando numa perda de torque proporcional a velocidade. Geralmente, as perdas devem ser representadas por resistências não lineares e têm que ser modeladas com resistências moduladas de bastante complexidade.

O uso de elementos resistivos é desejável porque representam bem a física das perdas devido a que eles correspondem a efeitos simples e reconhecíveis, mais em engenharia mecânica prefere-se geralmente o conceito de rendimento ou eficiência. O rendimento é definido como a relação da saída de potencia e a entrada de potencia resultando numa grandeza adimensional menor que 1. É um multiplicador que atua sobre as variáveis ideais livres de perdas para determinar os valores reais de saída. Como com as resistências é conveniente diferenciar entre rendimentos de esforços e de fluxos. Como exemplo, o rendimento de esforço causado pela perda de torque, para o caso viscoso, está dado por:

$$\eta_T = \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{R \omega_1}{T_1} \quad (6.8)$$

O produto dos diferentes rendimentos é o rendimento total, ou seja, a relação entre a potência de entrada e de saída dado pela expressão:

$$\eta = \eta_P \eta_Q \eta_T \eta_\omega \quad (6.9)$$

onde: η_P é o rendimento de pressão

η_Q é o rendimento de vazão ou volumétrico

η_T é o rendimento de torque

η_ω é o rendimento de velocidade ou de escorregamento

Muitas vezes as perdas podem considerar-se proporcionais as variáveis de trabalho. Por exemplo, a perda de torque é frequentemente independente da velocidade de rotação e proporcional ao torque de trabalho. Neste caso o GL da figura 6.8 é mais útil, contém uma fonte de esforço para a perda de torque controlado pelo torque de entrada T_1 :

$$T_2 = T_1 - \varepsilon T_1, \quad \eta_T = 1 - \varepsilon, \quad \omega_2 = \omega_1 \quad (6.9)$$

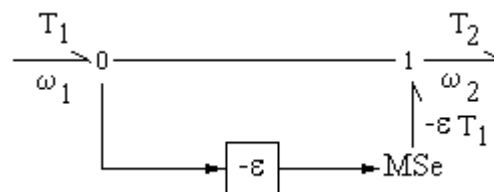


Figura 6.8 - Perda de torque modelada com uma fonte inversa modulada.

Uma modelagem similar pode ser feita com as demais variáveis.

O rendimento total de uma turbina é relativamente constante, varia menos de 10 % para um intervalo de variação da vazão (ou potência) entre 30 e 110 % nas Pelton e Kaplan, e entre 60 e 110 % nas Francis (Carvalho Vianna, 1999; Souza, 1995). Então, um “ ϵ ” constante é bastante apropriado para simular pequenas perturbações, como rejeições parciais e aceitações de carga, enquanto que para grandes perturbações, como rejeições totais de carga, é necessário levar em conta a variação de “ ϵ ” com a vazão e a velocidade.

Não é muito importante a diferenciação dos rendimentos na simulação do comportamento global de uma turbina, o que realmente importa é o rendimento total. Propõe-se então a modelagem das perdas com um $\epsilon(Q, \omega)$, ou seja, modulado com a vazão e a velocidade, e o agrupamento de todas as perdas como perdas de torque conforme é mostrado na figura 6.9. Onde, o sensor “f” cumpre a mesma função para os efeitos de medição que uma junção “1”, ou seja mede fluxo que no sensor da esquerda e vazão e no da direita velocidade, e o sensor “e” mede o torque. Este agrupamento das perdas pode fazer-se numa outra variável, por exemplo, na vazão, ou seja, como perdas volumétricas (De Mello, 1992).

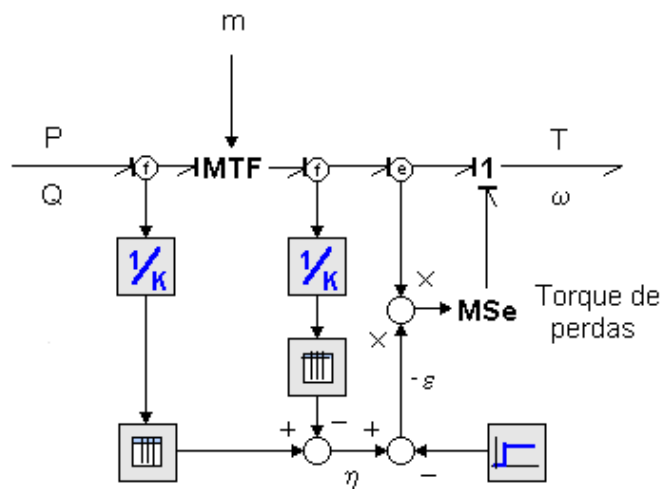


Figura 6.9 - Perdas de torque moduladas com a vazão e a velocidade

O esquema da figura 6.9 é bastante prático porque a curva de rendimento em função da vazão é geralmente conhecida e a diminuição de rendimento com a variação da velocidade em relação a nominal, pode ser adotada de dados típicos quando não é conhecida. Existem no esquema algumas simplificações, fundamentalmente o efeito da pressão e a abertura do distribuidor não estão incluídos explicitamente, somente em forma implícita através da vazão, e a diminuição do rendimento com a velocidade é considerada independente da vazão.

6.5 Diagrama de Blocos do Regulador de Velocidade

O propósito do regulador de velocidade é fornecer a retroalimentação que relaciona a potência requerida pelo sistema elétrico com a potência do sistema hidráulico, ou mais diretamente, que relaciona a velocidade da turbina e a posição do distribuidor, injetor ou pás, dependendo do tipo de máquina. Destacam-se dois conceitos fundamentais: (1) a variação de velocidade da turbina e gerador é controlada somente pelo torque resultante na unidade, e (2) a variação de velocidade que atua através do regulador controla o servomotor principal. O servomotor principal é o componente do sistema de regulação que controla a entrada de potência hidráulica na turbina, na figura 6.10 mostra-se uma vista de um servomotor.



Figura 6.10 - Vista do servomotor principal do regulador da Usina Santa Clara (M.G.)

Os reguladores de velocidade são de diferentes tipos, os quais usualmente possuem a capacidade de combinar controle proporcional, diferencial e integral. Normalmente se mede a velocidade ou aceleração, embora sistemas mecânicos e elétricos têm sido muito utilizados

em centrais hidrelétricas, atualmente os reguladores digitais e controle por computadores *on-line* fornecem mais versatilidade e sofisticação.

Uma equação de regulador que relaciona as variações de velocidade com a posição do mecanismo principal de controle, pode ser expressa como (Wylie e Streeter, 1993):

$$T_d T_\alpha \frac{d^2 y}{dt^2} + T'_\alpha \frac{dy}{dt} + \sigma(y-1) = -(\alpha-1) - T_d \frac{d\alpha}{dt} \quad (6.10)$$

Onde: T_d é a constante de tempo do amortecedor

T_α é a constante de tempo de prontidão

$$T'_\alpha = T_\alpha + \delta T_d$$

δ é o estatismo transitório

σ é o estatismo permanente

α é a velocidade adimensional

y é a posição adimensional do servomotor principal

A equação se aplica para reguladores mecânicos ou digitais. A vantagem do sistema digital é que o valor dos parâmetros do regulador podem ser modificados em resposta a mudanças na carga de tal forma que além de garantir estabilidade é possível a operação ótima com relação à eficiência de todo o sistema. Para simulação a equação diferencial (6.10) deve ser expressa na forma de função de transferência aplicando a transformada de Laplace.

Uma rejeição total de carga significa abrir o interruptor principal do gerador, o qual separa o gerador da rede e a potência mecânica da turbina resulta num aumento de velocidade da unidade. O regulador neste caso deve fechar o distribuidor controlando o aumento de velocidade da unidade no nível garantido e de ajuste das proteções, mas a velocidade de fechamento deve estar limitada para evitar que o aumento de pressão (golpe de aríete) ultrapasse também o nível garantido. Por esta razão os reguladores incluem um limitador ajustável da velocidade de fechamento e abertura. Considerando que o intervalo de variação da posição do servomotor principal está entre 0 e 1 [pu], e que o tempo de resposta do servomotor é T_g , o limite de velocidade resultante é $1/T_g$.

Uma prática comum dos fabricantes de turbinas e reguladores é organizar os sensores de posição do servomotor para indicar a posição como uma fração do curso desde completamente fechado até completamente aberto. Embora na condição sem carga o

distribuidor não está completamente fechado e na condição nominal não está completamente aberto. A suposição usual de relação linear entre vazão e posição está perto da verdade na maioria das turbinas para um intervalo grande de carga, mas não é muito rigorosa perto da abertura mínima ou máxima do distribuidor. Estes detalhes podem ser bastante importantes na simulação de rejeições totais de carga e aceitação de carga onde o servomotor satura. Este fato pode ser levado em conta através de uma função (Undrill et al., 1967; De Mello et al. 1992) que relacione a saída ideal do regulador com a abertura real, que no 20-SIM pode-se simular com uma tabela.

No caso particular de um sistema isolado com um gerador único o regulador pode ser isócrona, ou seja, o estatismo permanente pode ser nulo. Na figura 6.11 mostra-se o diagrama de blocos para esta condição realizado com o 20-SIM a partir da equação (6.10) e incluindo os limitadores de velocidade e posição, e a tabela mencionada. O limitador de posição deve incluir por razões matemáticas o efeito anti-disparo (“anti reset windup”) para evitar sinais fora dos limites, já que o servomotor é modelado como um integrador.

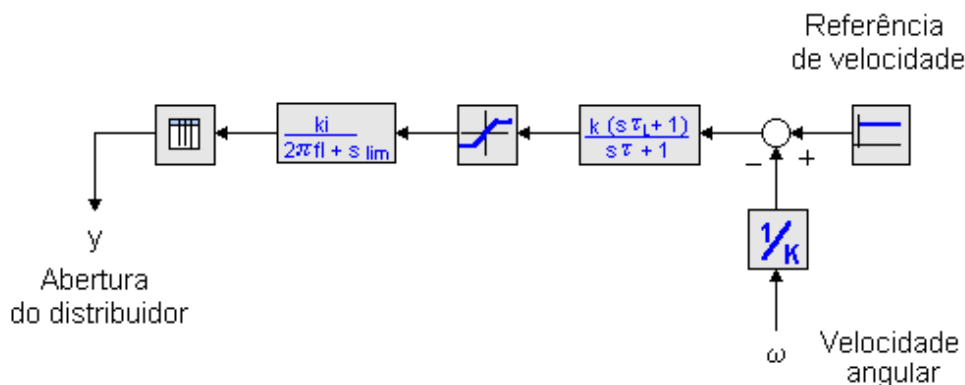


Figura 6.11 - Diagrama de blocos de um regulador com estatismo nulo, limitadores de velocidade e posição, e tabela de correção da abertura

6.6 Modelo de um Sistema Hidrelétrico Isolado

Integrando num único esquema os modelos apresentados nas seções anteriores (turbina, inércia, carga elétrica, rendimento e regulador de velocidade) e agregando o conduto forçado discutido nos capítulos anteriores obtém-se a modelagem de um sistema hidrelétrico isolado mostrado na figura 6.12. Adicionou-se no esquema fatores de escala “1/K” para colocar em por unidade as variáveis de interesse e armazená-las nos “registradores” para traçar o gráfico posteriormente.

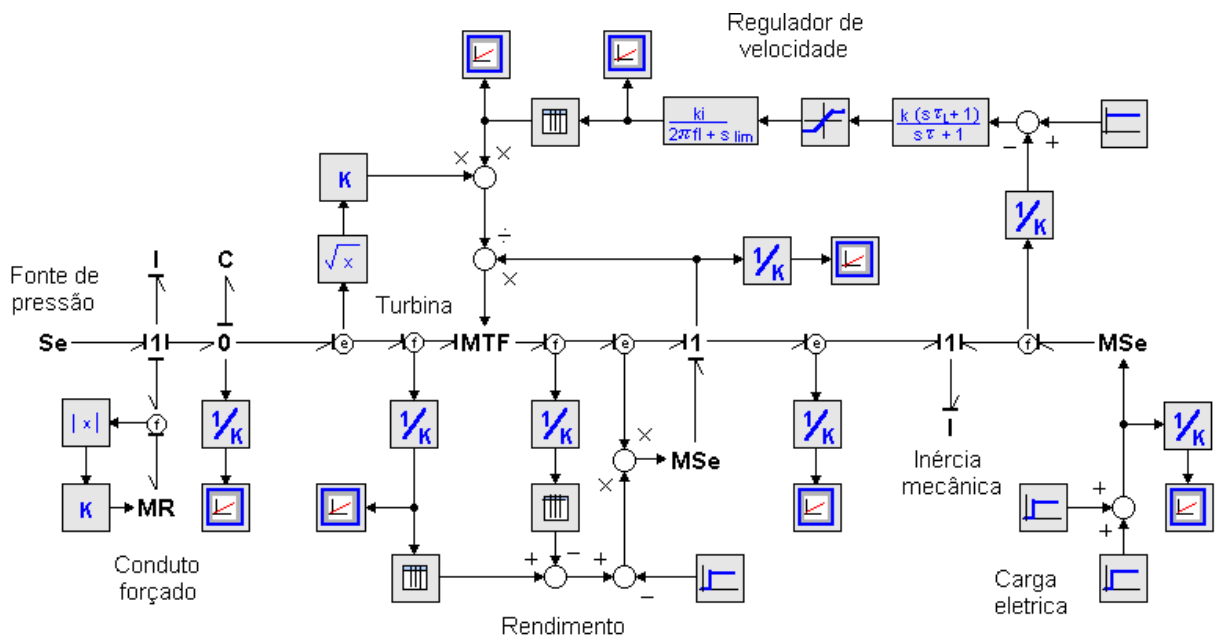


Figura 6.12 - GL de um sistema hidrelétrico isolado modelado com 20-SIM

6.7 Simulação com Grafos de Ligação de Casos de Rejeição e Aceitação de Carga Propostos por Wylie e Streeter (1993)

Wylie e Streeter (1993) propõem no seu conhecido livro um estudo de simulação de transitórios que inclui várias das não linearidades da turbina e do regulador de velocidade, discutidas nas secções anteriores. São simulados três casos provocados por uma variação de carga num sistema isolado com uma unidade hidrelétrica simples que se encontra gerando inicialmente 61,7 MW. O modelo da turbina se baseia na informação contida no diagrama de colina, uma porção do diagrama do caso estudado mostra-se na figura 6.13. A curva de colina completa foi armazenada na forma das matrizes $W_h(i,j)$ e $W_\beta(i,j)$ tratadas no livro usando “748” pontos, com o objetivo de obter pontos intermédios por interpolação. Os autores põem ênfase na necessidade de contar com informação completa e detalhada para se obter resultados confiáveis.

O programa computacional de simulação TURB.FOR e o arquivo TURB.DAT com as curvas características e demais dados acompanham o livro. No programa as equações diferenciais do conduto forçado (método das características), efeito inercial e regulador, junto com equações linearizadas em cada ponto de operação da turbina são convertidas num conjunto de equações não lineares algébricas que são resolvidas em cada passo de integração com o método de Newton. O programa pode realizar rejeições e aceitações de carga, incluindo falhas no regulador.

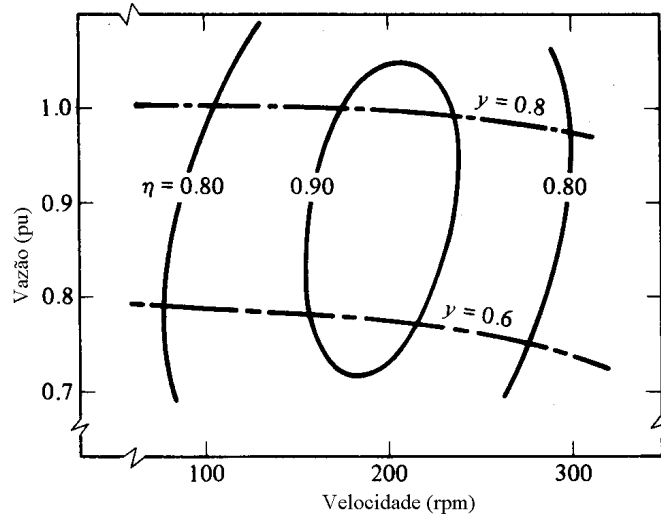


Figura 6.13 - Porção do diagrama de colina da turbina estudada

Os principais dados tirados do exemplo do livro e do arquivo TURB.DAT são os seguintes:

Conduto forçado	Turbina	Regulador de velocidade
$L = 125,3 \text{ m}$	$H_R = 82 \text{ m}$	$T_d = 3,7 \text{ s}$
$A = 23,6 \text{ m}^2$	$N_R = 20,94 \text{ rad/s}$	$T_\alpha = 0,325 \text{ s}$
$a = 1250 \text{ m/s}$	$Q_R = 114 \text{ m}^3/\text{s}$	$T_g = 6,5 \text{ s}$
$f = 0,013$	$T_R = 4,108 \times 10^3 \text{ kN.m}$	$\delta = 0,18$
	$J = 1,496 \times 10^6 \text{ kgm}^2$	$\sigma = 0$

As variáveis no livro de Wylie e Streeter (1993) são tratadas em forma adimensional, em por unidade, correspondendo a seguinte notação:

- α é a velocidade
- h é a pressão
- v é a vazão
- y é a abertura do distribuidor
- β é o torque na turbina
- β_G é o torque na carga

Para a modelagem com GL foi necessário obter as curvas de rendimento em função da vazão e velocidade, e da relação entre abertura teórica e real do distribuidor do diagrama de colina e das curvas W mostradas na figura 6.14. Para a simulação da rejeição total de carga teve-se que representar uma porção importante do rendimento negativo bem maior que a

mostrada na figura, para conseguir isto se extrapolou a curva considerando que com vazão quase nula as perdas podem ser assumidas como somente mecânicas. Para “inicializar” o caso se adotaram condições iniciais aproximadas e se simulou o sistema até que todas as variáveis se estabilizaram aplicando-se a perturbação aos 100 s como mostra a figura 6.15:

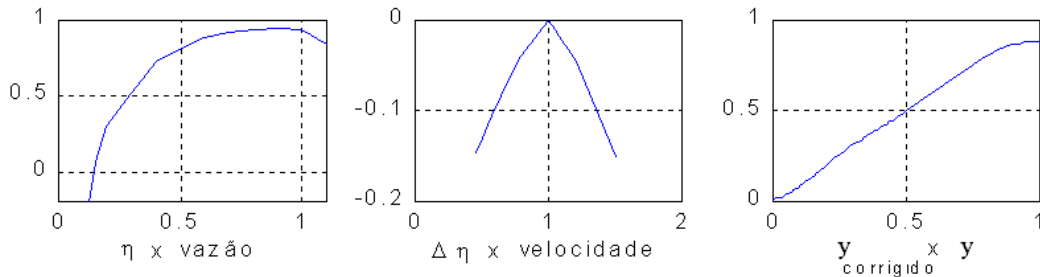


Figura 6.14 - Curvas correspondentes às tabelas da figura 6.12 para o caso proposto por Wylie e Streeter

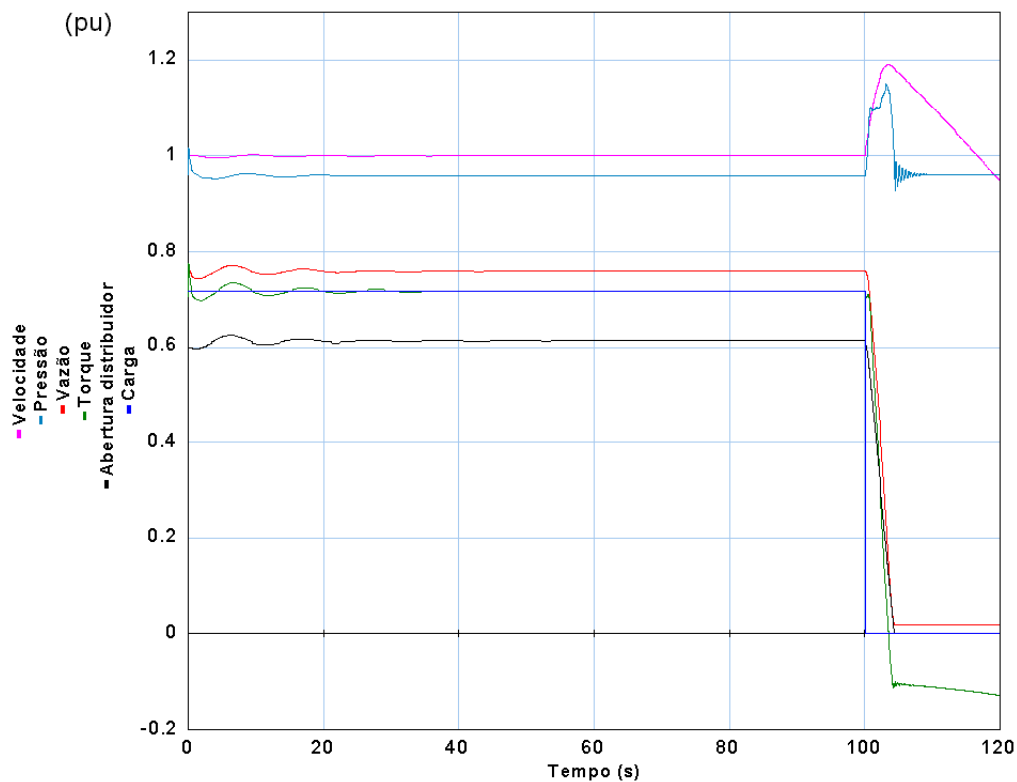


Figura 6.15 - Obtenção das condições iniciais automaticamente

Foram analisados três casos:

1. No primeiro a unidade está gerando 61.7 MW e a carga é reduzida (rejeição parcial de carga) a 44,8 MW em 0,1 s. Nas figuras 6.16 e 6.17 se mostram as simulações com o programa TURB.FOR e GL respectivamente, se observa uma grande similitude entre elas.

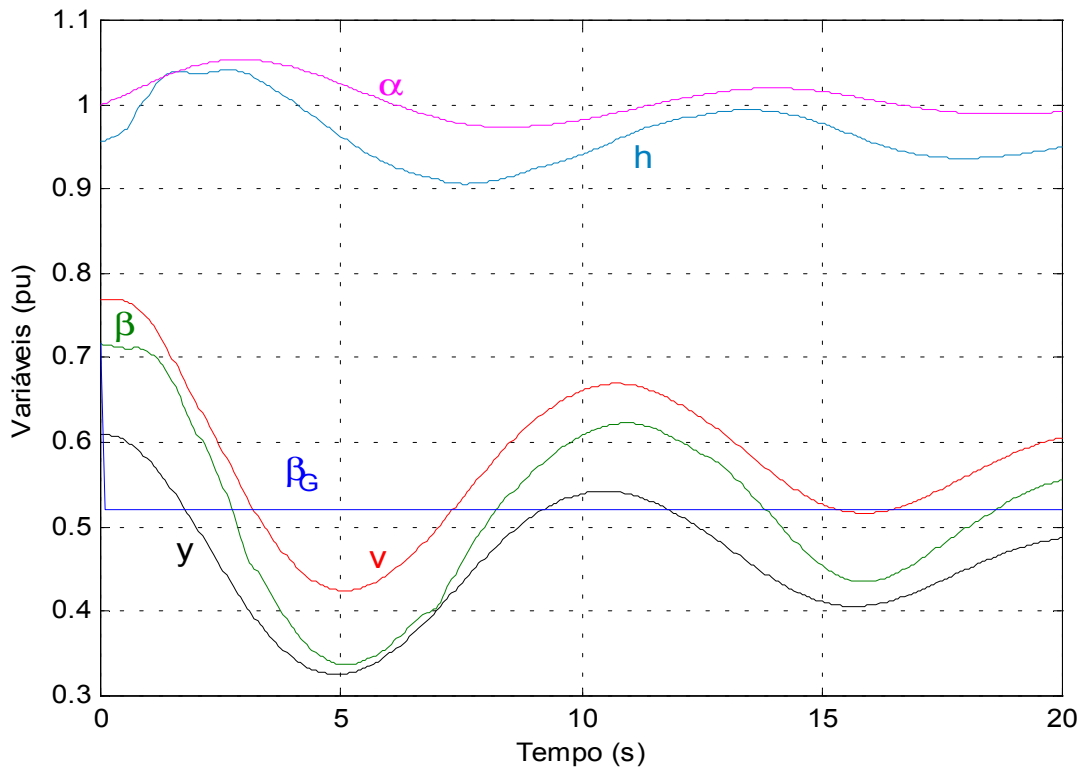


Figura 6.16 - Simulação da rejeição parcial de carga com TURB.FOR

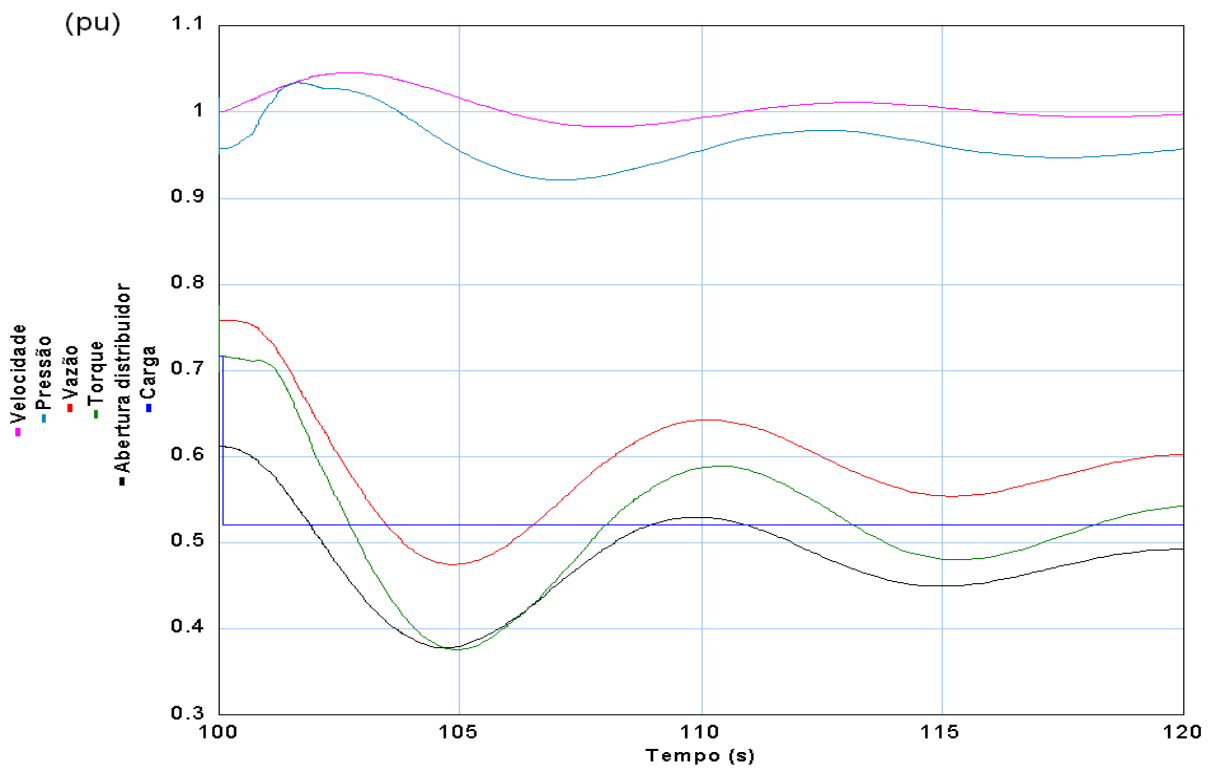


Figura 6.17 - Simulação da rejeição parcial de carga com 20-SIM

- No segundo caso as condições iniciais são as mesmas, 61,7 MW, mas a carga é rejeitada totalmente em 0,1 s. Os resultados mostram-se nas figuras 6.18, 6.19 e 6.20.

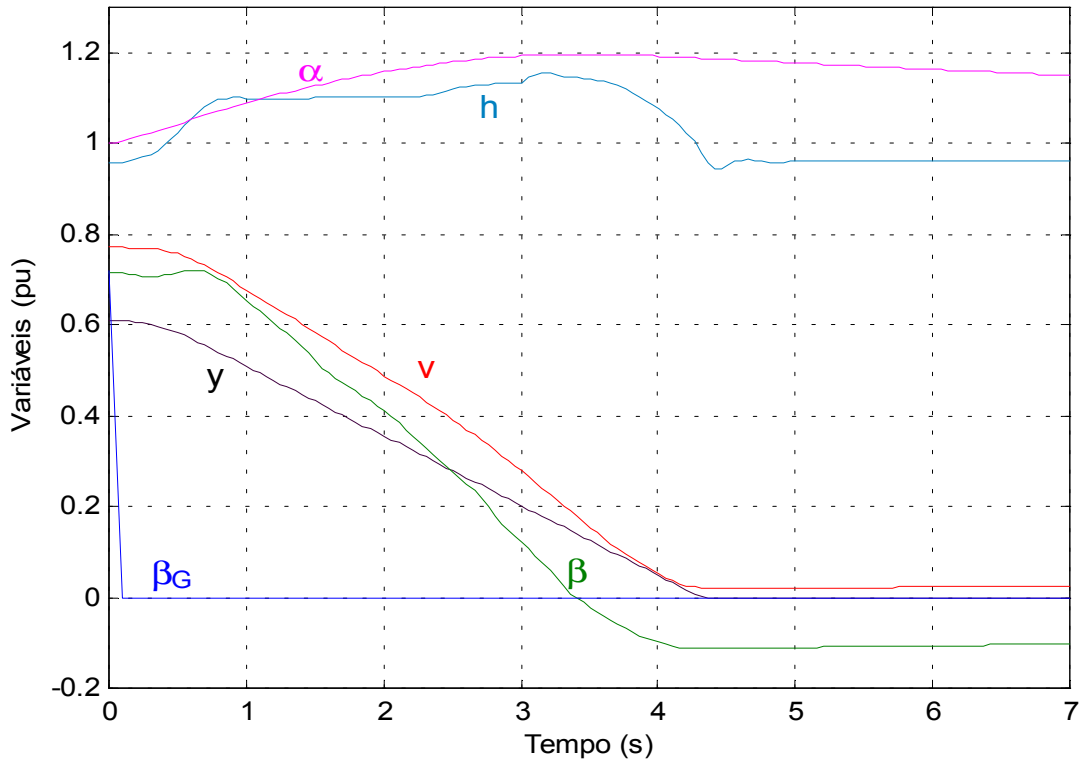


Figura 6.18 - Simulação de rejeição total de carga com TURB.FOR

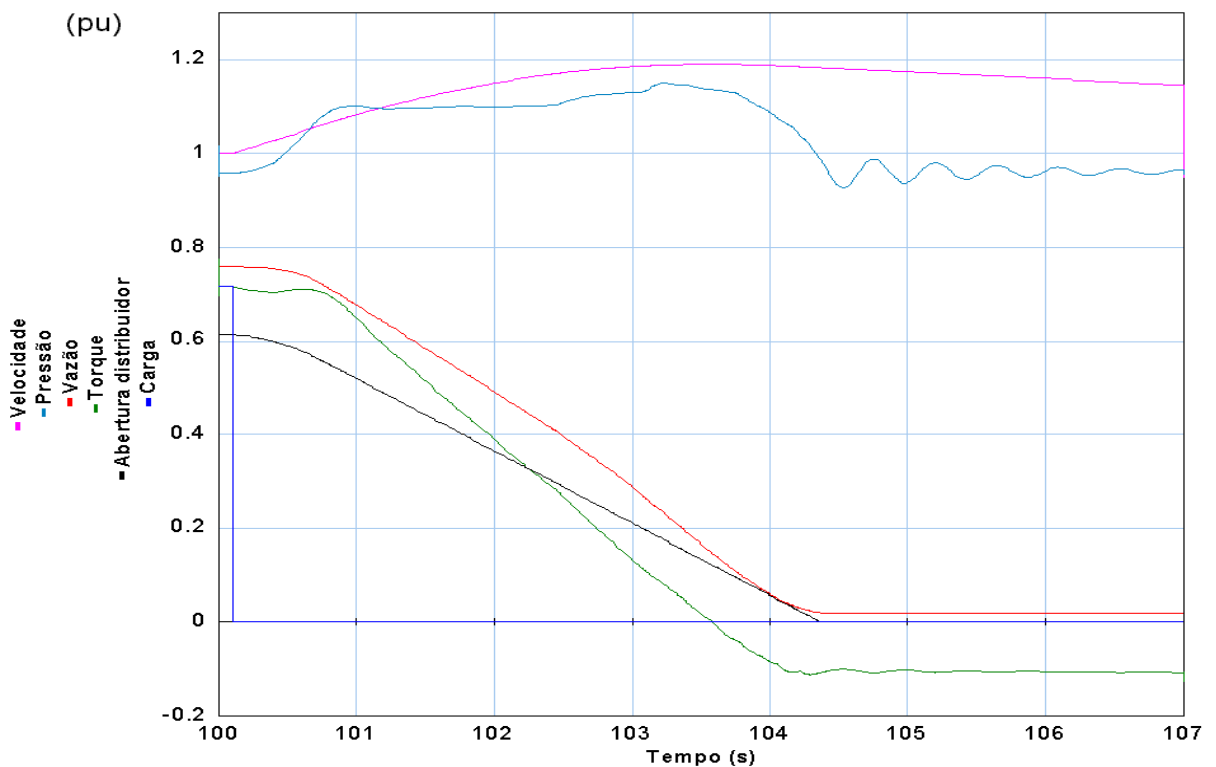


Figura 6.19 - Simulação de rejeição total de carga com 20 - SIM e distribuidor não linear

Em relação à figura 6.18 Wylie e Streeter comentam: “Algumas das flutuações em **h** que aparecem são o resultado do método aproximado de manejar os dados

característicos no programa. Considera-se que esta não é uma deficiência séria neste exemplo”. Efetivamente, quando se considera a relação um “pouco” não linear da abertura do distribuidor da figura 6.14, reconstruída das curvas **W** e da saída do programa, a simulação com GL, figura 6.19, praticamente coincide com a do TURB.FOR, mais com uma relação linear não aparecem as pequenas flutuações de pressão durante o fechamento e as oscilações são maiores uma vez fechado o distribuidor, conforme mostrado na figura 6.20, devido a que neste caso o fechamento se produz com velocidade máxima até o final. A relação não linear da abertura do distribuidor se deve em parte ao processo de interpolação linear no TURB.FOR e em parte a razões físicas, principalmente são físicas as não linearidades no começo e no final da curva.

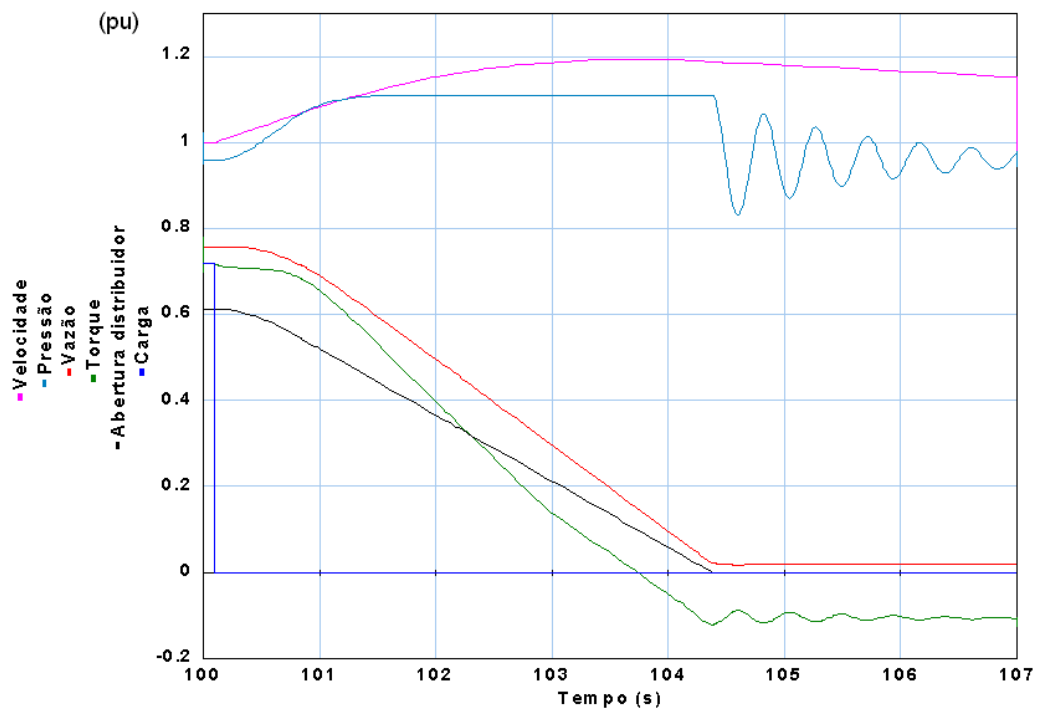


Figura 6.20 - Simulação de rejeição total de carga com 20-SIM e distribuidor linear

3. O último caso consiste numa aceitação de carga que causa a saturação do servomotor, a carga é incrementada desde as mesmas condições iniciais dos casos anteriores até 81 MW em 0,1 s, as simulações mostram-se nas figuras 6.21 e 6.22. Nas primeiras tentativas de simular o caso com GL se encontraram algumas dificuldades. Uma análise profunda da saída do TURB.FOR indicou que algumas oscilações das curvas (pressão e abertura) se deviam a problemas de exatidão no processo de interpolação, a reconstrução do rendimento em função da vazão resultou na curva mostrada na figura

6.23 que obviamente não é muito realista, nem qualitativamente, nem quantitativamente, o que explica as pequenas diferenças observadas.

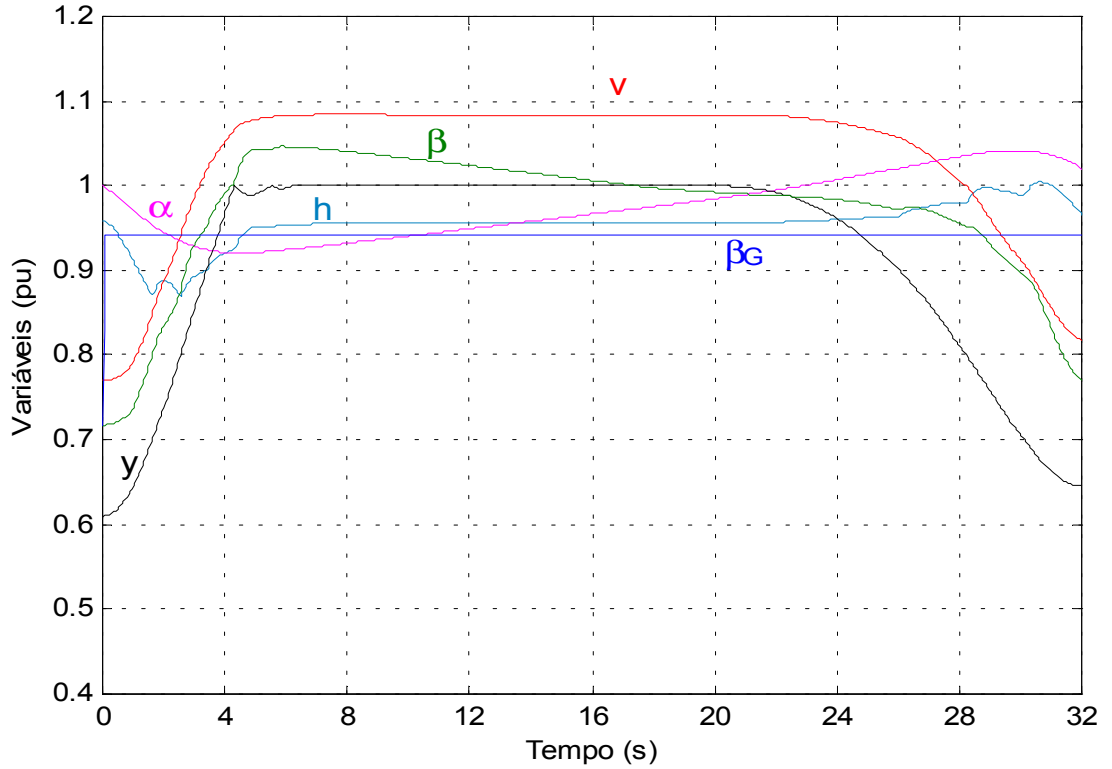


Figura 6.21 - Simulação de aceitação de carga com TURB.FOR

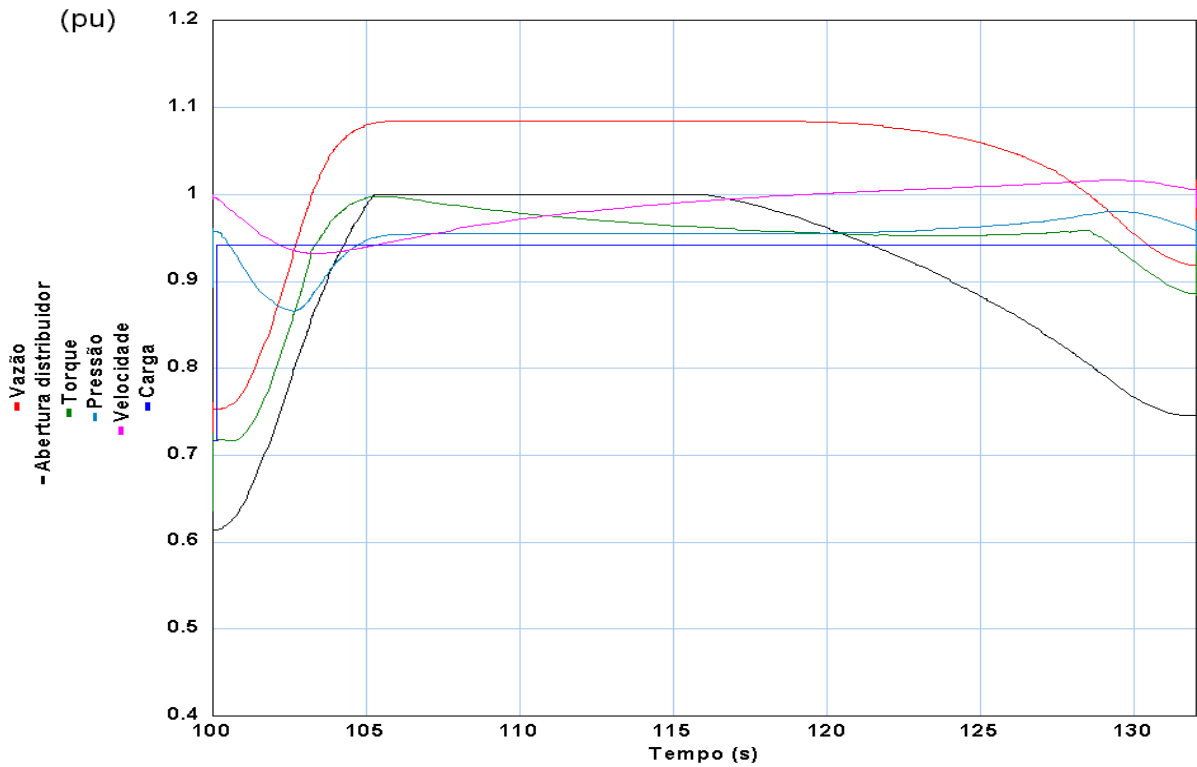


Figura 6.22 - Simulação da aceitação de carga com 20-SIM

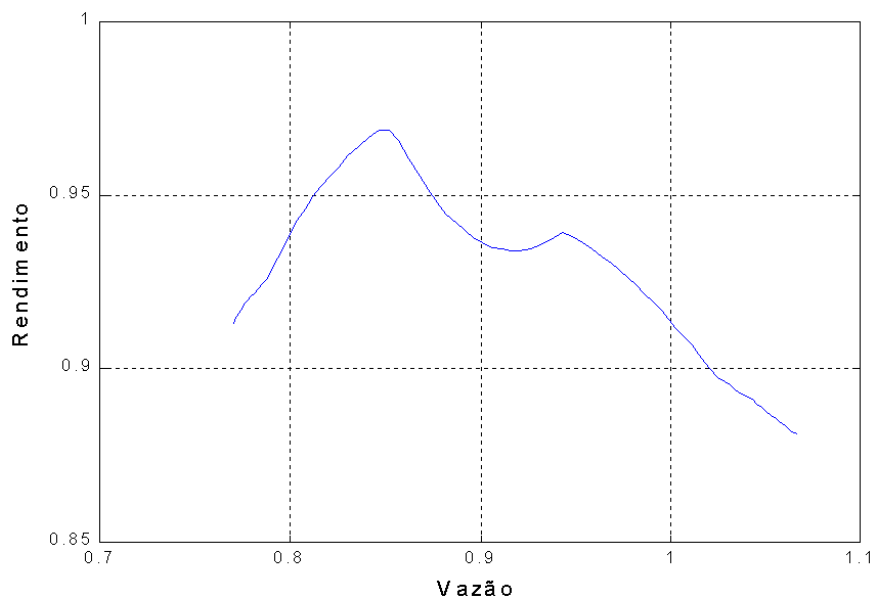


Figura 6.23 - Rendimento pouco realista em função da vazão segundo o TURB.FOR

6.8 Análise de Rejeição Total de Carga na Hidrelétrica Santa Clara

As três unidades da Usina Hidrelétrica Santa Clara totalizando uma capacidade instalada de 60 MW entraram em operação durante o ano 2002. A hidrelétrica está localizada no rio Mucuri, nos limites dos municípios de Mucuri (Bahia), Nanuque (Minas Gerais) e Serra dos Aimorés (Minas Gerais). Na figura 6.24 mostra-se uma vista da Usina Hidrelétrica.



Figura 6.24 - Vista panorâmica da Usina Hidrelétrica Santa Clara (M.G - Brasil)

A VOITH SIEMENS forneceu o equipamento eletromecânico da hidrelétrica e realizou estudos de ajuste do regulador e de rejeições e aceitações de carga para otimizar o seu desempenho com o programa de simulação de sistemas hidráulicos SIPROHS desenvolvido pela Voith Heidenheim. A empresa cedeu gentilmente parte da informação de estes estudos para ser usados para verificar os modelos desenvolvidos com GL nesta pesquisa. O programa SIPROHS é um esquema modular que permite simular transitórios de sistemas hidráulicos com estrutura aleatória. O programa tem uma biblioteca de módulos com o qual podem ser descritos todos os componentes típicos, uma turbina, por exemplo, pode ser modelada separando seus componentes: caixa espiral, tubo de sucção etc. Uma central hidrelétrica pode ser conectada a um grande sistema elétrico, ou a um sistema isolado com características especiais. Além dos estudos típicos indicados na introdução o programa pode ser usado como um simulador de tempo real. Por exemplo, uma turbina simulada, pode ser controlada por um regulador de velocidade externo real para ajustar seus parâmetros.

Os principais dados fornecidos foram os seguintes:

- Queda bruta nominal: 52,10 m
- Conduto forçado (equivalente de oito trechos):

Diâmetro (m)	3,37
Comprimento (m)	105,05

- Caixa espiral (conduto equivalente de diâmetro constante):

Diâmetro (m)	2,97
Comprimento (m)	16,41

- Turbina:

Vazão nominal (m ³ /s)	45,059
Potência nominal (MW)	20,60
Queda líquida (m)	50,70
Rotação nominal (rpm)	257,14
Rotação de disparo (rpm)	463

- Gerador:

Potencia (MVA)	21,0
GD ² do rotor do gerador (t.m ²)	600
Numero de pólos	28
Fator de potência (cos(φ))	0,95
Frequência da rede (hz)	60

- Tubo de sucção (conduto equivalente de diâmetro constante):

Diâmetro (m)	3,19
Comprimento (m)	14,69

- Perda de carga: fator de atrito (resistência) selecionado para se ter à condição nominal da máquina.

Na simulação com GL se utilizou basicamente a mesma modelagem da seção anterior adicionando as inertâncias da caixa espiral e o do tubo de sucção. Por não estarem disponíveis, se adotou dados típicos para o rendimento da turbina em função da vazão e velocidade. Para modelar o efeito da velocidade nas perdas se experimentou com uma fricção viscosa para quantificar melhor o fenômeno com rendimentos negativos. Como também não foram fornecidos dados completos do regulador somente se simulou o caso de rejeição de carga total que não requer do mesmo ativo, bastando fechar o distribuidor à velocidade máxima.

Na simulação da rejeição de carga total a máquina permanece durante os 5 primeiros segundos na condição de potencia nominal, desliga-se o gerador da rede, iniciando-se o fechamento do distribuidor. O tempo de fechamento do distribuidor e de 5,0 segundos, tempo determinado de forma de atender as condições garantidas de sobrevelocidade e sobrepressão.

Os resultados das simulações para comparação podem ser visualizados nas figuras 6.25 e 6.26, a figura 6.26 não inclui a pressão no tubo de sucção devido a que seu efeito está incluído na modelagem com GL da turbina. Observa-se uma boa correlação entre eles, a sobrevelocidade com GL é praticamente a mesma que com o SIPROHS, 370,7 rpm (44,2 %) versus 382 rpm (48,6 %), e a sobrepressão um pouco menor, 69,0 m (36,1 %) versus 70,1 m (38,3 %).

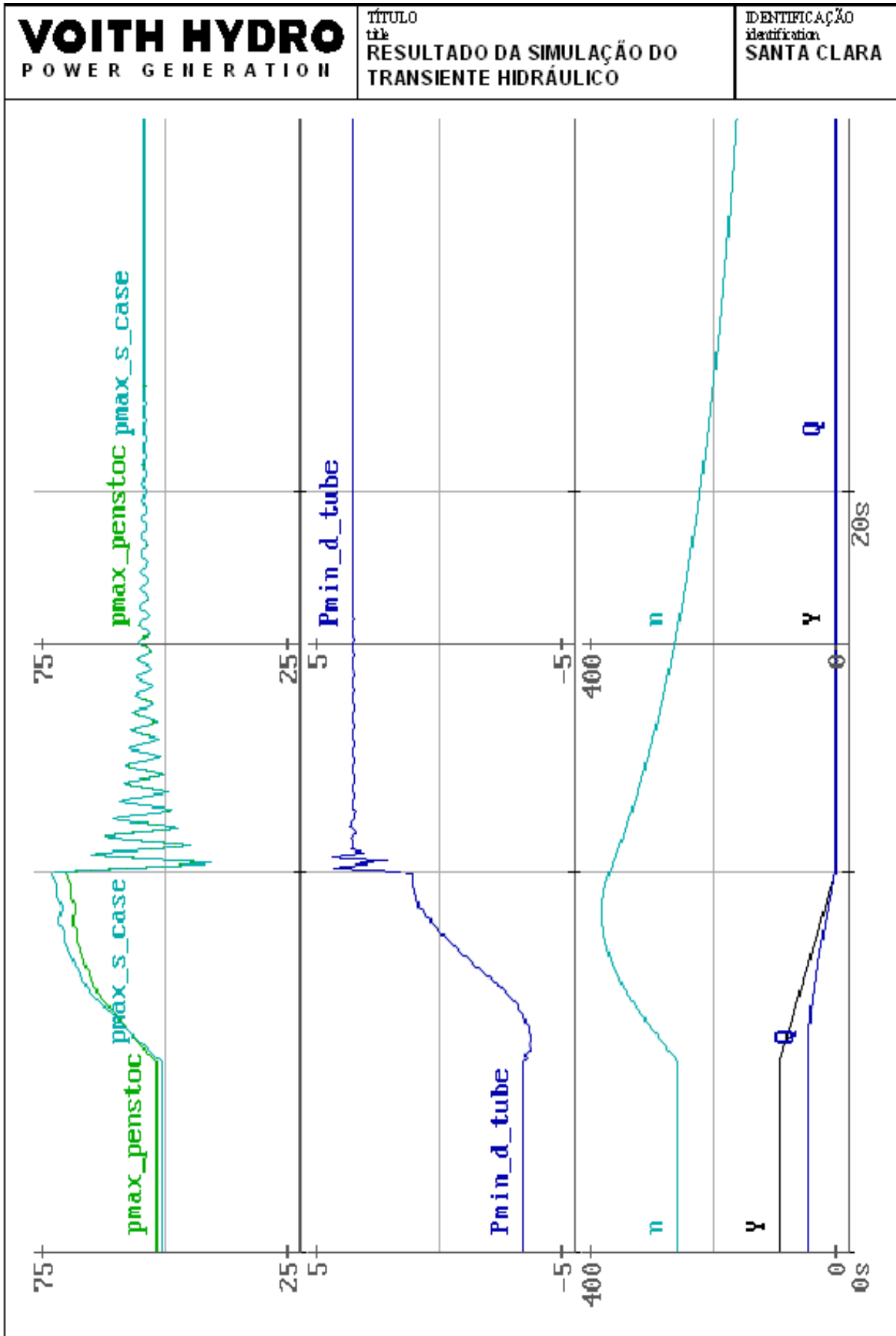


figura 6.25- Simulação da rejeição total de carga com o programa SIPROHS da Voith Hydro

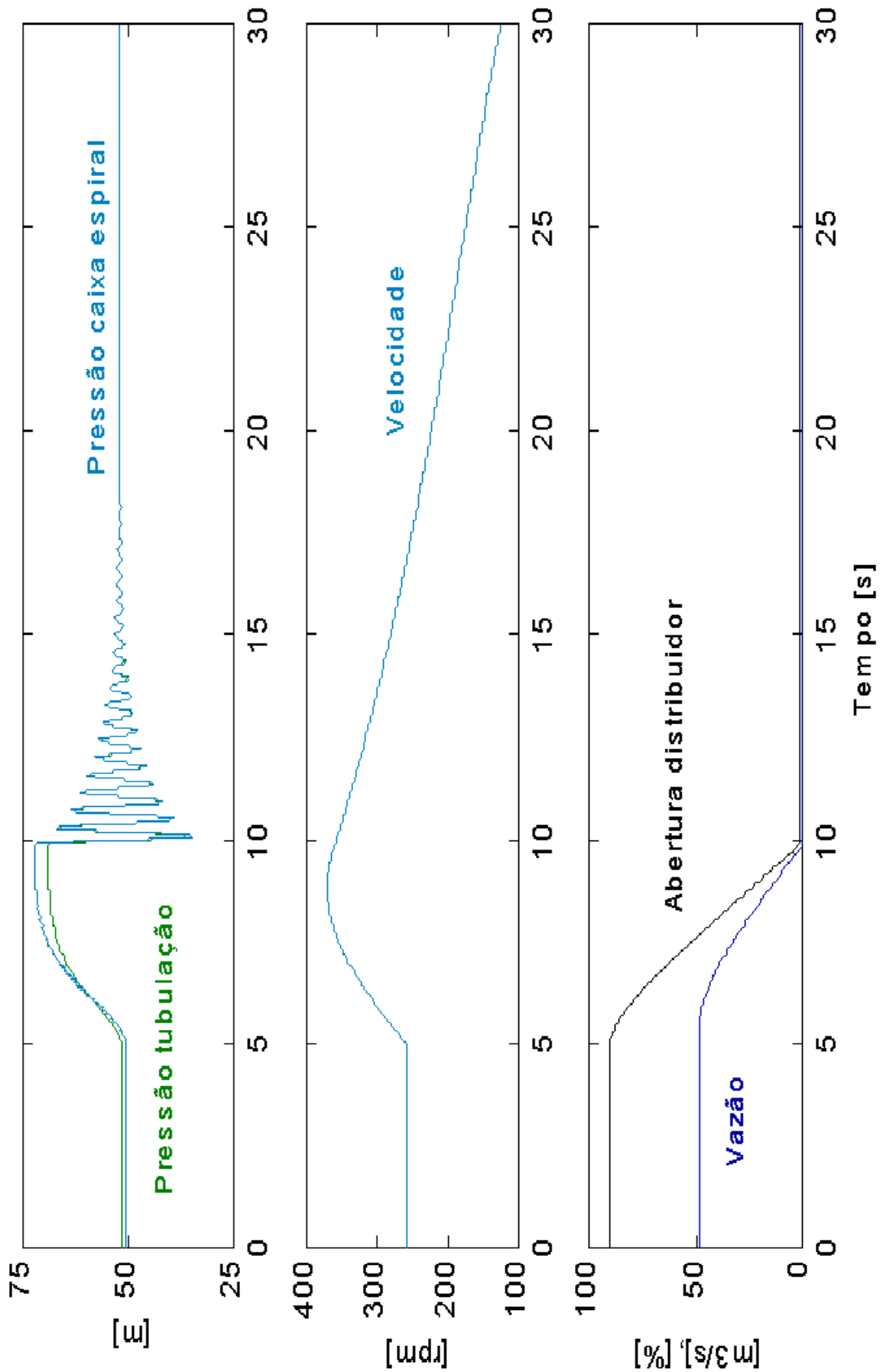


Figura 6.26 - Rejeição total de carga na Usina Hidrelétrica Santa Clara

6.9 Conclusões

O objetivo mais importante deste capítulo foi o desenvolvimento de um modelo de turbina hidráulica com o método dos Grafos de Ligação. Demonstrou-se que as turbinas hidráulicas respondem muito melhor a uma modelagem com um transformador que com um girador, contrariamente ao indicado na escassa bibliografia que menciona o tema. O modelo resultante foi um transformador não linear modulado com a abertura do distribuidor. Para a modelagem do rendimento se propôs o agrupamento de todas as perdas da turbina num rendimento do torque em função da vazão e da velocidade, e indicaram-se também outras possíveis alternativas.

Ao modelo da turbina adicionou-se a inércia mecânica, carga elétrica, regulador de velocidade e conduto forçado para representar um sistema hidrelétrico isolado. A modelagem foi validada com simulações de rejeição total e parcial de carga e aceitação de carga de casos propostos no livro clássico de Wylie e Streeter e de um estudo fornecido pela VOITH SIEMENS sobre a Usina Santa Clara simulados com outros programas e metodologias.

Na comparação das simulações com Grafos de Ligação com outros métodos se obtiveram resultados bastante coincidentes desde o ponto de vista prático, tanto nos valores de sobrepressões, sobrevelocidade e outras variáveis. Descobriu-se que algumas pequenas diferenças com os casos do livro de Wylie e Streeter se deviam principalmente às inexatidões no processo de interpolação que o programa TURB.FOR do livro realiza.

A metodologia dos Grafos de Ligação mostrou-se muito flexível na análise de alternativas e na modelagem de diversos detalhes não lineares dos componentes dos diferentes casos.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O objetivo deste trabalho foi reavaliar a aplicabilidade do método dos Grafos de Ligação na simulação de escoamentos transitórios em condutos forçados e tentar desenvolver um modelo de turbina e outros componentes para simular interações entre os subsistemas hidráulico, mecânico e elétrico em centrais hidrelétricas. O trabalho partiu das pesquisas pioneiras realizadas por Tiago Filho em 1994 e continuadas logo por Carvalho em 1995 que deixaram algumas dúvidas sobre a exatidão do método. Pode-se concluir que os objetivos propostos foram alcançados, as limitações aparentes do método superadas, e que os Grafos de Ligação têm o grande potencial vislumbrado nos trabalhos precursores, na atualidade amplificado pela interatividade dos programas computacionais de última geração.

A evolução nos últimos anos 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 permite sugerir que para uso acadêmico, levando em conta a sua facilidade de utilização, 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. Para o desenvolvimento desta dissertação o Centro Nacional de Referências em Pequenos Aproveitamentos Hidroenergéticos (CERPCH) adquiriu a versão 3.3 do 20-SIM.

As simulações do golpe de aríete em dois casos de referência, um exemplo do livro clássico de Wylie e Streeter e um teste de laboratório de um artigo de Watt, mostraram resultados com uma grande correlação com as medições de laboratório e simulações com o método das características, como assim também melhoras significativas com respeito a validações realizadas anteriormente.

A necessidade de discretizar a tubulação não significou uma restrição de importância mostrando que bastam uns poucos trechos quando a manobra da válvula é lenta. Com vários trechos os modelos baseados em equivalentes concentrados “T” e “ π ” deram resultados equivalentes. Geralmente, para manobras lentas, é suficiente desde o ponto de vista prático

um único circuito “T” ou “ π ”; neste caso os modelos com um “ π ” produzem oscilações livres de pressão com amplitude um pouco maior, ou seja, do lado da segurança. Além disto implicam menos variáveis de estado para inicializar e não produzem problemas de inicialização quando a tubulação é conectada a um transformador modulado para representar uma turbina. Em síntese existem alguns motivos para dar a preferência a modelos com circuitos “ π ”. A capacitância do circuito pode ainda ser “sintonizada” para obter-se exatamente a frequência do modo fundamental de oscilação.

Os diferentes casos estudados indicam que quando o fechamento da válvula ou distribuidor é lento em relação ao tempo de viagem das ondas de pressão na tubulação o processo esta dominado pela inércia, tendo pouca importância a forma como é modelada a capacitância, concentrada ou distribuída. A capacitância somente tem importância nas oscilações livres depois de finalizado o fechamento, mas é importante levar em conta que a amplitude das oscilações depende em grande medida da forma da curva de fechamento nos últimos instantes. As perdas na tubulação têm pouca importância em todo o processo, o amortecimento das oscilações livres depende muito mais da abertura residual do distribuidor. Na modelagem com Grafos de Ligação é imprescindível deixar sempre uma abertura residual por uma questão matemática: evitar uma resistência infinita e divisão por zero.

É importante ressaltar um conceito importante não observado anteriormente: a solução de modelos de tubulações com parâmetros concentrados utilizando Grafos de Ligação tende à solução com parâmetros distribuídos utilizando o método das características com o aumento do número de trechos, devido simplesmente ao fato de que ambos modelos matemáticos tendem a coincidir.

Pode-se concluir que as inexatidões encontradas nos trabalhos precursores se deviam somente ao modelo da válvula, baseado em linearização, e não na modelagem linear das perdas ou no número de trechos como se especulou. A modelagem das válvulas como uma resistência não linear modulada com a vazão e o quadrado da posição do obturador permitiu obter resultados equivalentes aos obtidos com o método das características e testes de laboratório nos casos de referência. Para o caso de Watt foi necessário “identificar” a curva de fechamento da válvula do registro de campo em uns dez trechos lineares para obter as oscilações de pressão do registro durante o fechamento. A simulação com Grafos de Ligação resultou mais exata que a realizada com o método das características por Watt com um modelo da curva de fechamento baseado em quarenta pontos.

O requerimento de conservação (numérica) da potência nos transdutores, transformadores e giradores para representar turbinas, geradores, transformadores elétricos etc., implica a impossibilidade prática de utilizar unidades técnicas, como rpm ou metros de coluna de água, e também, que não faça sentido utilizar o método por unidade devido a que não se tem liberdade para escolher como bases as grandezas nominais de todos os equipamentos. As grandezas de saída podem ser sempre convertidas nas unidades de interesse, incluindo por unidade, mas a simulação é melhor fazê-la sempre no consistente Sistema Internacional de Unidades. Uma alternativa interessante é usar uma das grandezas num domínio de energia, esforço ou fluxo, em “kilo”, por exemplo: kPa, kNm e kV para pressão, torque e tensão respectivamente.

Foi desenvolvido um modelo de turbina hidráulica com o método de Grafos de Ligação e demonstrou-se que este responde muito melhor a uma modelagem com um transformador que com um girador, contrariamente ao indicado pelo Professor H. Paynter do Instituto Tecnológico de Massachusetts, criador da metodologia, na escassa bibliografia que menciona o tema. O modelo resultante foi um transformador modulado com a abertura do distribuidor e a pressão e velocidade para modelar a não linearidade. Para a modelagem do rendimento se propôs o agrupamento de todas as perdas da turbina num rendimento do torque em função da vazão e da velocidade, indicaram-se também outras alternativas possíveis.

Modelou-se um sistema hidrelétrico isolado adicionando ao modelo da turbina a inércia mecânica, carga elétrica, regulador de velocidade e conduto forçado. A modelagem foi validada com simulações de rejeição total e parcial de carga e aceitação de carga de casos propostos no livro clássico de Wylie e Streeter e de um estudo fornecido pela VOITH SIEMENS sobre a Usina Santa Clara simulados com outros programas e metodologias. Obtiveram-se resultados bastante coincidentes desde o ponto de vista prático, tanto nos valores de sobrepressões, sobrevelocidade e outras variáveis. Descobriu-se que algumas pequenas diferenças com os casos do livro de Wylie e Streeter se deviam principalmente a inexatidões no processo de interpolação nas curvas de colina que o programa TURB.FOR do livro realiza. É para destacar o fato de que para representar as não linearidades com Grafos de Ligação se utilizaram somente algumas dezenas de pontos enquanto que Wylie e Streeter usaram próximo de oitocentos.

A metodologia dos Grafos de Ligação mostrou-se muito flexível e eficiente na modelagem dos diversos componentes e dos detalhes não lineares dos mesmos nos diferentes casos estudados. Está claro que possui uma grande potencialidade para modelar máquinas de

conversão de energia (turbina, gerador, transformador etc.) e para a simulação dos diversos transitórios que podem ocorrer em centrais hidrelétricas. Neste trabalho não foi utilizado, mas os aplicativos baseados em programação orientada a objeto, contam com a possibilidade de construir modelos e armazená-los em forma de módulos que podem ser manipulados posteriormente através de ícones, simplificando a modelagem de sistemas complexos.

Ficaram sem respostas algumas perguntas: Existirá algum jeito possível de modelar componentes com parâmetros realmente distribuídos em forma exata? Será possível separar as perdas nas turbinas em várias resistências não lineares?

Mas agora o desafio principal para dar continuidade a este trabalho é a modelagem dos componentes elétricos: gerador, regulador de tensão, transformador e linhas de transmissão; com as complicações que implica o fato das grandezas elétricas serem trifásicas e a tensão e corrente serem alternadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, J. M.; GUARGA, R.; IZQUIERDO, J., **Transitorios y Oscilaciones**, Unidad Docente Mecánica de Fluidos (U.P.V.), Espanha, 1995.
- BOLLINGER, K. E.; NETTLETON, L. D.; GURNEY, B. C., **Reducing the Effect of Penstock Pressure Pulsations on Hydro Electric Plant Power System Stabilizer Signals**, IEEE/PES Winter Meeting, Columbus, 1993. 4p.
- CARVALHO, I. L., **Avaliação da Aplicabilidade do Método dos Gráficos de Ligações no estudo de escoamentos transitórios em condutos forçados**, Itajubá, Dissertação (Mestrado), EFEI, 1995.
- CARVALHO VIANNA, A. N.; SOUZA ALENCAR, H., **Análise Experimental de Turbinas Hidráulicas operando com rotação variável**, Grupo de Trabajo sobre Hidromecánica, 5ª reunião, Montevideo, Uruguai, 1999. 10p.
- DE MELLO, F. P.; KOESSLER, R. J. (Working Group "Hydraulic on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies), **Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies**, IEEE Trans. PAS, v.7, p. 167-179, February 1992.
- DE MELLO, F. P., **Dinâmica e Controle da Geração**, Curso de Engenharia em Sistemas Elétricos de Potência, serie P.T.I, Centrais Elétricas Brasileiras S.A., 1979.
- RAMOS, H.; ALMEIDA, A. B., **Caracterização Dinâmica Global do Funcionamento de Aproveitamentos Hidroelétricos**, Lisboa, Portugal, 1993, 13p.
- KARNOPP, D. C.; MARGOLIS, D. L.; ROSENBERG, R.C., **System Dynamics Modeling and Simulation of Mechatronic Systems**, New York, USA, John Wiley & Sons, Inc, 2000.
- KARNOPP, D. C.; ROSENBERG, R. C., **System Dynamics: A Unified Approach**, New York, USA, John Wiley, 1975.
- KOFMAN, E.; JUNCO, S., **Un Ambiente Computacional para la Modelización de Sistemas Dinámicos no Lineales con Bond Graphs**. RPIC, Mar del Plata, Argentina, 1999. 15p.
- MONTBRUM-DI FILIPO, J.; DELGADO, M.; PAYNTER, H. et al., **A Survey of Bond Graphs: Theory, Applications and Programs**, *Journal of the Franklin Institute*, p.565-606, 1991.
- NICOLET, C.; AVELLAN, F.; ALLENBACH, P.; SAPIN, A.; SIMOND, J. J., KVICINSKY, S. CRAHAN, M., **Simulation of Transient Phenomena in Francis Turbine Power Plants: Hydroelectric Interaction**, Waterpower XIII, Buffalo, New York, USA, 2003. 12p.

NICOLET, C.; ALLENBACH, P.; SAPIN, A., **New tool for the Simulation of Transient Phenomena in Francis Turbine Power Plants**, Proceedings of the Hydraulic Machinery and Systems 21st IAHR Symposium, Lausanne, Switzerland, 2002. 8p.

NICOLET, C.; SAPIN, A.; PRENAT, J. E. A. et al., **A New Tool for the Simulation of Dynamic Behaviour of Hydroelectric Power Plants**, 10th International Meeting of the Work Group on the Behaviour of Hydraulic Machinery under Steady Oscillatory conditions, Norway, 2001. 11p.

PAYNTER, H. M., **The Gestation and Birth of Bond Graphs**, <http://www.me.utexas.edu/lotario/paynter/hmp/Bondgraphs.html>, 2000. 9p.

ROSENBERG, R.; KARNOPP, E. D., **Introduction to Physical System Dynamics**, New York, USA, McGraw - Hill, 1983.

SOUZA, Z.; SANTOS, A.; BORTONI, E., **Centrais Hidrelétricas - Estudos para Implantação**, Rio de Janeiro, Eletrobrás, 1999.

SOUZA, Z.; FUCHS, R. D.; MOREIRA SANTOS, A. H., **Centrais Hidro e Termelétricas**, São Paulo, Edgard Blücher, , 1983.

SOUZA Jr., O. H., **Estudos de Transitórios Hidráulicos através de Simulação Analógica Digital de Modelos não Lineares**, Itajubá, Dissertação (mestrado), EFEI, Itajubá, 1994.

STREETER, V.; WYLIE, E.; BEDFORD, K., **Mecânica de Fluidos**, Bogotá, Colômbia, McGraw-Hill, 2001.

SPERANZA NETO; M., SCOFANO NETO F.; DA SILVA, F.R., **O Tratamento da Dinâmica de Sistemas Térmicos e Fluidos através da Técnica Generalizada dos Grafos de Ligação**, Rio de Janeiro, ENCIT, p. 681-684, 1992.

SPERANZA NETO, Curso de Especialização em Engenharia Mecatrônica: **Modelagem e Análise de Sistemas Dinâmicos**, Resende, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 1995. 117p.

TIAGO FILHO, G. L., **Aplicação do Método dos Gráficos de Ligações na Simulação de uma Válvula de Alívio, Anti-Golpe de Ariete, Auto Operada**, São Paulo, Tese (Doutorado), EPUSP, 1994.

THOMA, J. U., **Introduction to Bond Graphs and their Applications**, Oxford, Great Britain, Pergamon Press, 1975.

UNDRILL, J. M.; WOODWARD, J. J., **Nonlinear Hydro Governing Model and Improved Calculation for Determining Temporary Droop**, IEEE Trans. v.4, PAS-86, p. 443-453, April 1967.

VOITH SIEMENS - Hydro Power Generation, **AHE: Análise dos Transientes Hidráulicos Simulações Analíticas**, São Paulo, 2003.

WATT, C.S; BOLDY, A.P.; HOBBS, J. M., **Combination of Finite Difference and Finite Element Techniques in Hydraulic Problems**”, 3ª International conference on Pressure Surges, Canterbury, England, p. 43-62, 1980.

WYLIE, E.B.; STREETER, V.L; SUO, L., **Fluids Transients in Systems**, New York, USA, McGraw- Hill, 1993.

WYLIE, E.B.; STREETER, V.L , **Fluids Transients**, New York, USA, McGraw-Hill, 1990.

WYLIE, E.B.; STREETER, V.L , **Fluids Transients**, New York, USA, McGraw-Hill, 1978.

ANEXO A

PREÇOS DOS APLICATIVOS

PREÇOS DOS APLICATIVOS

O preço da versão 3.3 do programa 20-SIM com fins acadêmicos é de US\$500 para a versão *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 em: <http://www.rt.el.utwente.nl>, esta versão tem a restrição de não poder salvar o modelo.

A versão completa do programa SYMBOLS2000 com fins acadêmicos custa US\$2530, também está disponível uma versão reduzida de 50 ou 100 estados por US\$1350. Uma versão demo encontra-se no endereço: <http://www.symbols2000.com>.

Uma versão gratuita do programa PowerDynamo está disponível no endereço: <http://www.fceia.unr.edu.ar/lsd/powerdynamo.html>

O preço da versão acadêmica do programa CAMPG 4.9 com interface MATLAB/SIMULINK é de US\$1500 para um usuário e de US\$3500 para dez usuários. Não está disponível uma versão demo na página *web*. Informação sobre o programa pode ser encontrada no endereço: <http://www.bondgraph.com>.

Para o programa AMESIM não há uma versão demo na *web*. As informações sobre o programa pode ser acessada em: <http://www.amesim.com>.

ANEXO B

PUBLICAÇÕES DERIVADAS DESTA DISSERTAÇÃO

***BOND GRAPHS* VERSUS MEDICIONES DE LABORATORIO
Y EL MÉTODO DE LAS CARACTERÍSTICAS
EN LA SIMULACIÓN DEL GOLPE DE ARIETE**

Adair Martins

UNCo, Argentina - UNIFEI, Brasil

Geraldo L. Tiago Filho

UNIFEI, Brasil

Roberto Laurent

UNCo, Argentina

Apresentado no X Encontro Latino-Americano e do Caribe em Pequenos Aproveitamentos Hidroenergéticos (X ELPAH) , Maio de 2003 , Poços de Caldas, Brasil.

BOND GRAPHS VERSUS MEDICIONES DE LABORATORIO Y EL MÉTODO DE LAS CARACTERÍSTICAS EN LA SIMULACIÓN DEL GOLPE DE ARIETE

Adair Martins

UNCo, Argentina - UNIFEI, Brasil
amartins@uncoma.edu.ar

Geraldo L. Tiago Filho

UNIFEI, Brasil
tiago@iem.efei.br

Roberto Laurent

UNCo, Argentina
rlaurent@uncoma.edu.ar

Palabras clave: *Bond Graphs*, Transitorios Hidráulicos, Golpe de Ariete, Método de las Características.

Resumen - Este artículo describe brevemente la metodología de *Bond Graphs*, da un panorama del estado actual de los programas de simulación basados en la misma y discute su potencialidad para simular el golpe de ariete y otros transitorios en PCHs. Se presenta la revisión de un caso de referencia basado en resultados experimentales de laboratorio. Los resultados obtenidos con *Bond Graphs* son comparados con las mediciones y las simulaciones realizadas con el método de las características, y se discute el efecto de la utilización de parámetros concentrados en la modelización de la tubería.

1. INTRODUCCIÓN

El golpe de ariete es el fenómeno transitorio de elevación (golpe de ariete positivo) o disminución (golpe de ariete negativo) de la presión provocado por el cierre o apertura rápida del mecanismo de control (válvula, inyector, distribuidor, etc.) de caudal en un conducto forzado. Un caso de interés es el cierre del distribuidor que el regulador de velocidad ejecuta cuando ocurre un rechazo de carga parcial o total en una pequeña central hidroeléctrica para limitar la sobrevelocidad del generador y la turbina. El conocimiento de este fenómeno transitorio es fundamental para el dimensionamiento técnico y económicamente adecuado de los sistemas hidráulicos¹.

El método más utilizado para la simulación de transitorios hidráulicos es el denominado método de las características, introducido en la década de 1960 por Streeter². Las ecuaciones diferenciales parciales fundamentales: de la cantidad de movimiento y de la continuidad que modelan una tubería, son expresadas en forma de diferencias finitas e integradas numéricamente en el plano (x,t) con intervalos Δt y Δx , constantes. Lamentablemente, los programas computacionales basados en este método resultan pocos flexibles y tienen la desventaja de estar limitados a casos particulares y de presentar dificultades para modelar la interacción entre los diferentes dominios de energía: hidráulico, mecánico, eléctrico, etc., en una pequeña central hidroeléctrica.

Un método que no tiene estas limitaciones y que ha comenzado a ser utilizado en los últimos años para este fin es la técnica de *Bond Graphs* (BG). Curiosamente, la técnica fue creada por el profesor Henry Paynter³ del Departamento de Ingeniería Mecánica del Instituto de Tecnología de Massachussets (1959) para modelar justamente la interacción entre los subsistemas hidráulico, mecánico y eléctrico en el proceso de generación

hidroeléctrica. El objetivo fue superar las limitaciones de los modelos clásicos basados en funciones de transferencia y diagramas de bloques que sólo manejan una entrada y una salida. Desde entonces no ha sido muy utilizada para este fin, aunque su uso es creciente y muy popular en otras aplicaciones⁴⁻⁹.

Se distinguen en los últimos años los trabajos de G. L. Tiago Filho¹⁰ (1994) que utilizó en su tesis de doctorado para la simulación de una válvula de alivio anti golpe de ariete, y de I. L. De Carvalho¹¹ (1995) que analizó en su tesis de maestría su aplicabilidad en la simulación de transitorios hidráulicos. Los programas utilizados en estos trabajos requerían algunas aproximaciones en el modelado que hacían que los resultados no tuviesen toda la exactitud deseable. Pero su evolución ha sido formidable y estas restricciones han sido superadas completamente, ganando en flexibilidad y facilidad de uso.

Previa descripción del método de BG y de los programas actuales de simulación se muestra en este artículo una revisión de un caso de referencia basado en resultados experimentales de laboratorio publicados por C.S. Watt¹².

2. BREVE DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE *BOND GRAPHS*

Esta técnica se basa en el flujo de potencia entre los componentes del sistema, consiste en señales, líneas y símbolos propios que permiten representar gráficamente el modelo físico. Proporciona una visualización de las interacciones entre sus distintos componentes y suministra implícita y sistemáticamente la modelización matemática del sistema en forma de variables de estado, facilitando el uso de recursos computacionales para la simulación, que se realiza directamente de esta representación grafica. Es especialmente apta para modelar los elementos de un sistema entre los que hay flujo de potencia, por ejemplo: tubería, turbina, generador y transformador en una pequeña central hidroeléctrica, y se puede combinar con diagramas de bloques y otras técnicas para modelar los componentes donde interesa solamente el flujo de señales, por ejemplo: regulador de velocidad y de tensión.

Se basa en las analogías de los sistemas mecánicos con los eléctricos, lo que permite la construcción de modelos complejos con unos pocos elementos básicos. Estos elementos son los siguientes:

- Fuentes de potencia: fuentes de esfuerzo **Se** (tensión, presión, torque, fuerza etc.) y fuentes de flujo **Sf** (corriente, caudal, velocidad angular, velocidad lineal etc). Nótese que el producto del esfuerzo y del flujo respectivo en cualquier sistema físico resulta en potencia.
- Disipadores de potencia: resistores **R** (resistencia eléctrica, resistencia de fluido, fricción viscosa etc.).
- Acumuladores de energía: capacitancia **C** (capacitancia eléctrica, capacitancia de fluido, momento de inercia, masa etc.) e inertancia **I** (inductancia eléctrica, inertancia de fluido, rigidez recíproca de rotación o translación etc.).
- Acopladores: transformadores **TF** (transformador, pistón hidráulico, caja de engranajes, poleas) y giradores **GY** (generador y motor eléctrico, turbina y bomba hidráulica etc.).
- Vínculos: vínculo “**1**” (generalización de la Ley de Kirchhoff de tensiones) y vínculo “**0**” (generalización de la ley de Kirchhoff de corrientes)

Los elementos pueden ser no lineales, en cuyo caso se denominan modulados porque sus parámetros se “modulan” por funciones externas. Los componentes de un sistema

con elementos distribuidos sólo pueden ser representados con elementos básicos concentrados. El modelo de una tubería, por ejemplo, se puede modelar con resistencias, inertancias y capacitancias concentradas formando un número adecuado de circuitos en serie " π " o "T".

Un modelo de BG está formado por componentes o subsistemas conectados por enlaces (*bonds*) que representan el flujo de potencia entre ellos. Con una media flecha se indica el sentido de la potencia que fluye y con una barra vertical (barra causal) la relación entre causa y efecto entre dos elementos.

La evolución de los programas computacionales basados en esta técnica permite actualmente editar, parametrizar, asignar la causalidad automáticamente y simular un sistema en forma interactiva directamente de la representación gráfica. Generalmente permiten la modelización híbrida posibilitando combinar BG con diagramas de bloques, diagramas de íconos y ecuaciones. Los principales se ofrecen en la *web*: 20-SIM, SYMBOLS 2000, CAMP-G, PowerDynaMo, AMESIM, MS1, BONDLAB, etc. Un análisis preliminar permite sugerir que para uso académico y de pequeñas instituciones, teniendo en cuenta su facilidad de uso, precios relativamente bajos o nulos y la disponibilidad de versiones demo en la *web*, los tres programas probablemente más recomendables son:

20-SIM: *Twente Sim*. Fue desarrollado en el *Control Laboratory University of Twente* como sucesor del programa TUTSIM. Sobresale por su facilidad de uso, interfase con el usuario muy intuitiva y amigable, y una gran variedad de recursos. Posee una interfase con el programa MATLAB para posprocesamiento. Una de sus ventajas principales es no necesitar un programa externo para ser ejecutado. El precio de la versión académica estándar 3.3 es de US\$500. Una versión demo se encuentra disponible en: <http://www.rt.el.utwente.nl>, esta versión tiene la restricción de no permitir guardar el modelo.

SYMBOLS2000: *System Modeling by Bondgraph Language and Simulation*. Fue desarrollado en el *Indian Institute of Technology, Kharagpur*. Se distingue por su notable interfase con el usuario y la modelización híbrida jerárquica orientada a objeto. Dispone de un gran número de submodelos avanzados llamados cápsulas para aplicación en diferentes dominios de la ingeniería. Requiere una versión 5 o superior de *Microsoft Developer Studio* preinstalado. La compilación directa en C++ permite una fácil integración de código externo si el usuario posee alguna experiencia. El precio de la versión académica reducida de 50 o 100 estados es de US\$ 1350. Una versión demo para 9 estados se encuentra en: <http://www.symbols2000.com>.

PowerDynaMo: Fue desarrollado por el Prof. Ernesto Kofman de la *Universidad Nacional de Rosario, Argentina*. Es un programa de fácil utilización, con un ambiente simple y bastante amigable. Se caracteriza por requerir necesariamente de SIMULINK para poder simular, previa conversión del modelo a diagramas de bloques mediante una interfase automática. Puede obtenerse gratuitamente en la dirección: <http://www.eie.fceia.unr.edu.ar>.

En una primera aproximación el golpe de ariete en una pequeña central hidroeléctrica puede estimarse simulando el cierre automático de una válvula inmediatamente antes de la entrada de la turbina al detectarse un rechazo de carga. En esta aproximación se desprecia cualquier influencia de la turbina y del regulador de velocidad. El sistema a simular se limita a una fuente de presión ideal, una tubería forzada y una válvula. En la Figura 1 se muestra la representación con 20-SIM de un sistema como el mencionado mediante un diagrama híbrido: BG más diagrama de bloques. A la izquierda del esquema se observa la fuente de presión S_e y a continuación la tubería discretizada con un único circuito equivalente " π ". Este circuito consiste en la inertancia total I en serie

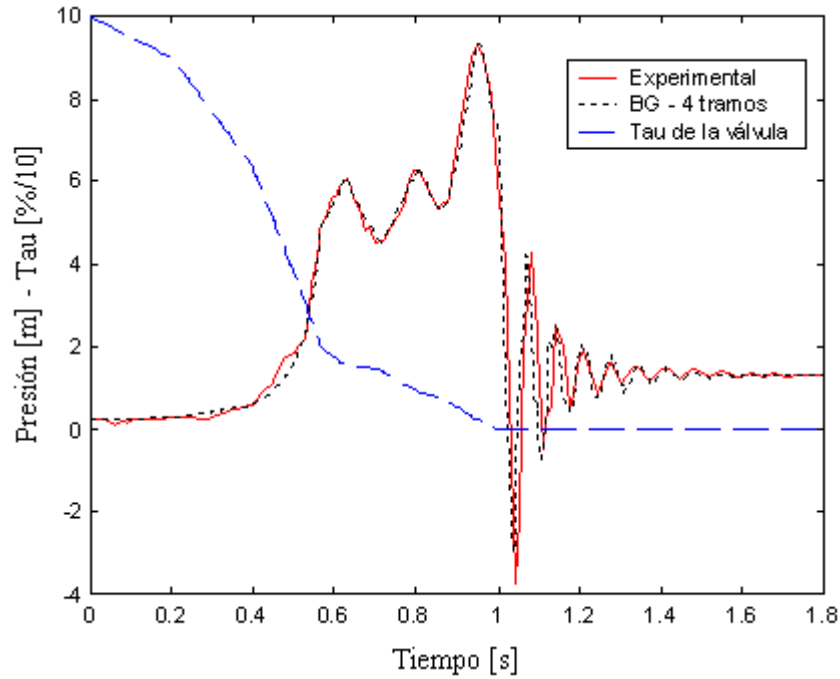


Figura 2. Transitorio de presión medido y simulado con BG

Con un solo tramo la tubería oscila muy “senoidalmente” y con una frecuencia algo menor, pero ya con cuatro tramos la solución se acerca al aspecto “triangular” y a la frecuencia fundamental de la solución con el método de las características. Estos comentarios ilustran sobre un aspecto conceptual muy importante no observado anteriormente: la solución con modelos de tuberías con parámetros concentrados obtenida con BG tiende a la solución con parámetros distribuidos obtenida con el método de las características al aumentar el número de tramos, debido simplemente al hecho de que ambos modelos matemáticos tienden a coincidir.

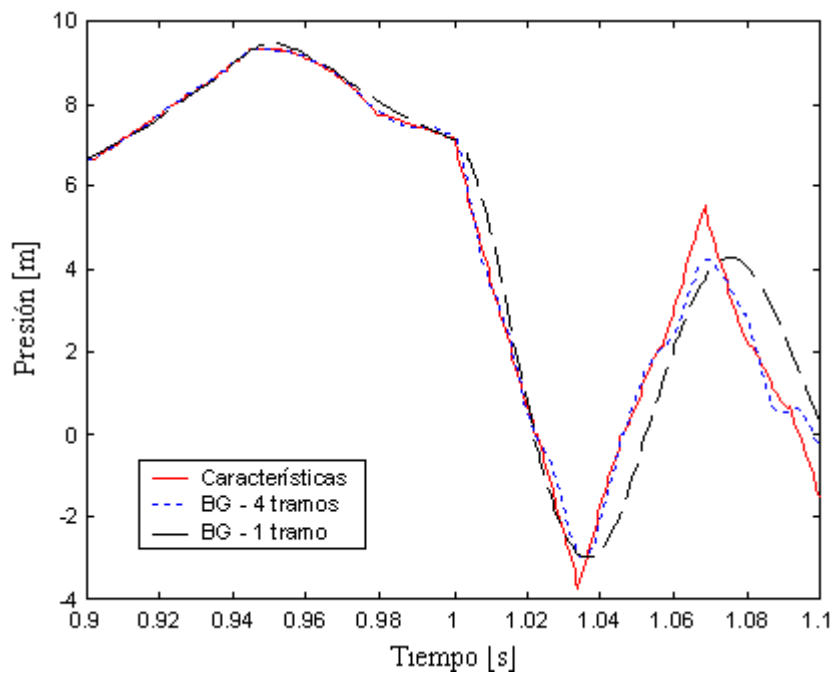


Figura 3. Golpe de ariete simulado con el método de las características y BG

4. CONCLUSIONES

El entorno gráfico de los simuladores basados en la metodología de BG ha evolucionado notablemente en los últimos años tornándola una herramienta muy eficiente y de carácter universal para simular sistemas donde ocurren intercambios de energía entre componentes de naturaleza física distinta. La disponibilidad de versiones demo o inclusive gratuitas en la *web* la hacen muy atractiva para uso académico.

La simulación del golpe de ariete de un caso de referencia mostró resultados con una gran correlación con mediciones de laboratorio y simulaciones con el método de las características. La necesidad de discretizar la tubería no significó una restricción de importancia mostrándose que bastan unos pocos tramos cuando la maniobra de la válvula es lenta. Los resultados obtenidos indicaron mejoras significativas con respecto a validaciones realizadas anteriormente.

El método de BG posee un gran potencial para la simulación de los diversos transitorios que pueden ocurrir en PCHs.

5. REFERENCIAS

- [1] Z. Souza, A. Santos y E. Bortoni, *Centrais Hidrelétricas – Estudos para Implantação*, Eletrobrás, 1999.
- [2] E.B.Wylie y V.L Streeter, *Fluids Transients*, McGraw-Hill, 1990.
- [3] J. Montbrum-Di Filippo, M. Delgado, C. Brie e H. Paynter, "A Survey of Bond Graphs: Theory, Applications and Programs", *Journal of the Franklin Institute*, 565- 606, 1991.
- [4] D. C. Karnopp, D. L. Margolis, R.C. Rosenberg, *System Dynamics Modeling and Simulation of Mechatronic Systems*, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [5] R. Rosenberg e D. Karnopp, *Introduction to Physical System Dynamics*, McGraw- Hill, New York, 1983.
- [6] D. C. Karnopp e R. C. Rosenberg, *System Dynamics: A Unified Approach*, John Willey, 1975.
- [7] J. L. Baliño, A.E. Larreteguy e E. F. Gandolfo, "A General Bond Graph Approach for Computational Fluid Dynamics", *Mathematics and Computers*, 2001.
- [8] E. Kofman e S. Junco, "Un Ambiente Computacional para la Modelización de Sistemas Dinámicos no Lineales con Bond Graphs", *RPIC*, 1999.
- [9] M. Speranza Neto, F. Scofano Neto y F.R. Da Silva, "O Tratamento da Dinâmica de Sistemas Térmicos e Fluidos através da Técnica Generalizada dos Grafos de Ligação", *ENCIT*, 1992.
- [10] G. L.Tiago Filho, "Aplicação do Método dos Gráficos deLigações na Simulação de uma Válvula de Alivio, Anti-Golpe de Ariete, Auto Operada", Tese de Doutorado, EPUSP, 1994.
- [11] 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.
- [12] C.S Watt, A.P. Boldy y J. M. Hobbs, "Combination of Finite Difference and Finite Element Techniques in Hydraulic Problems", *3ª International conference on Pressure Surges*, 1980.
- [13] C.A.Santana Bordón, "Análise de Transitórios Hidráulicos em Pequenas Centrais Hidrelétricas através do Método das Características", *Dissertação de Mestrado*, EFEI, 1992.

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 ariete proposto por Streeter e comparam-se os resultados com os obtidos pelo método das características.*

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

Geraldo Lúcio Tiago Filho,
UNIFEI, Brasil

Adair Martins,
UNCo, Argentina - UNIFEI, Brasil

Roberto Laurent
UNCo, Argentina

Apresentado no First South - American Congress on Computational Mechanics (MECOM 2002), Outubro de 2002, Santa Fé - Paraná, Argentina.

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.

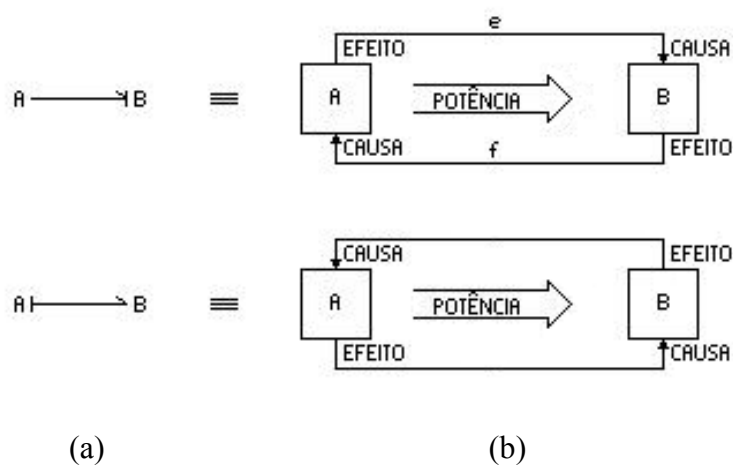


Figura1: Símbolo de causalidade (a) Grafos de Ligação. (b) Diagrama de blocos.

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.


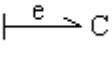
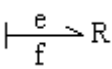
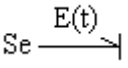
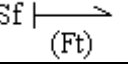
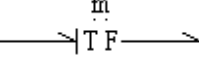
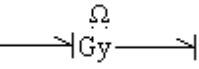
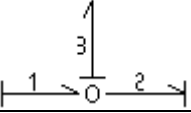
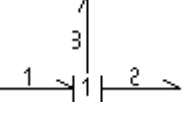
Elementos		Relação Constitutiva	Símbolo Convencional	Sistema Elétrico	Sistema Hidráulico
Variáveis de Potência	Esforço	e	e	Tensão, U [V]	Pressão, p [Pa]
	Fluxo	f	f	Corrente elétrica, i [A]	Vazão, Q [m ³ /s]
Variáveis Integrais	Momentum	$P_p = \int e dt$	Pp	Fluxo elétrico, λ [V.s]	Quantidade Movimento de pressão, Pp, [Pa.s]
	Deslocamento	$q = \int f dt$	q	Carga elétrica, q [C]	Volume, \forall [m ³]
Inertância	Indutância de energia ao sistema	$f(t) = \frac{1}{L} \int_0^t e(t).dt$		Indutância Elétrica [H]	Indutância Fluida [Pa.s ² /m ³]
Capacitância	Capacidade de acumular energia	$e(t) = \frac{1}{C} \int_0^t f(t).dt$		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 *professional*, 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 *professional*. 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 PowerDynaMo⁶*, 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, Ingenieria y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Argentina*. É um *software* que encontra-se disponível no endereço: <http://www.eie.fceia.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, CAMBAS, 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 3.1, 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.

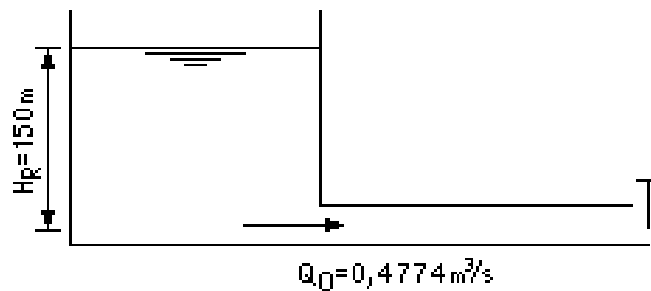


Figura 2: Exemplo proposto por Streeter

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

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

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.

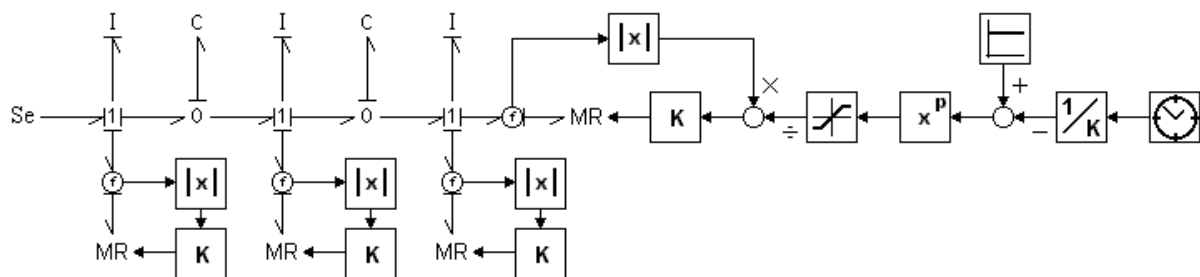


Figura 3: Representação do sistema hidráulico usando Grafos de Ligação com o 20 - SIM

5.1 Resultado da Simulação

Na Figura 4 mostram-se os resultados da simulação para a sobrepressão 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.

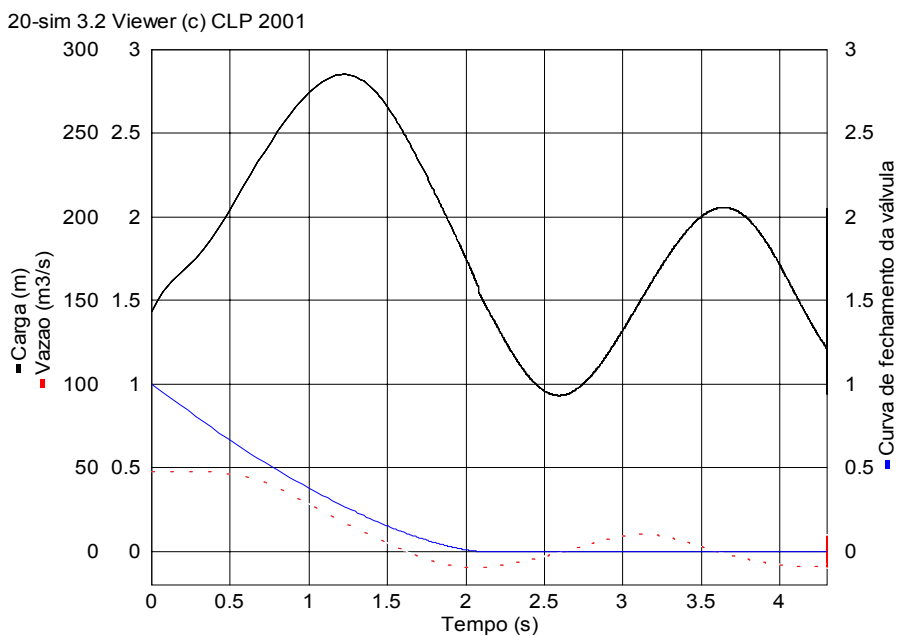


Figura 4: Resultado da simulação com Grafos de Ligação

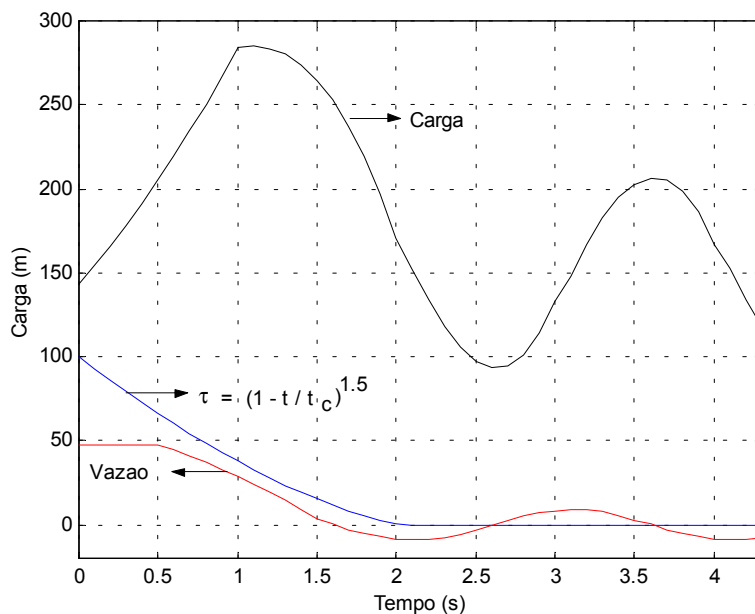


Figura 5: Resultado da simulação com o método das características

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.

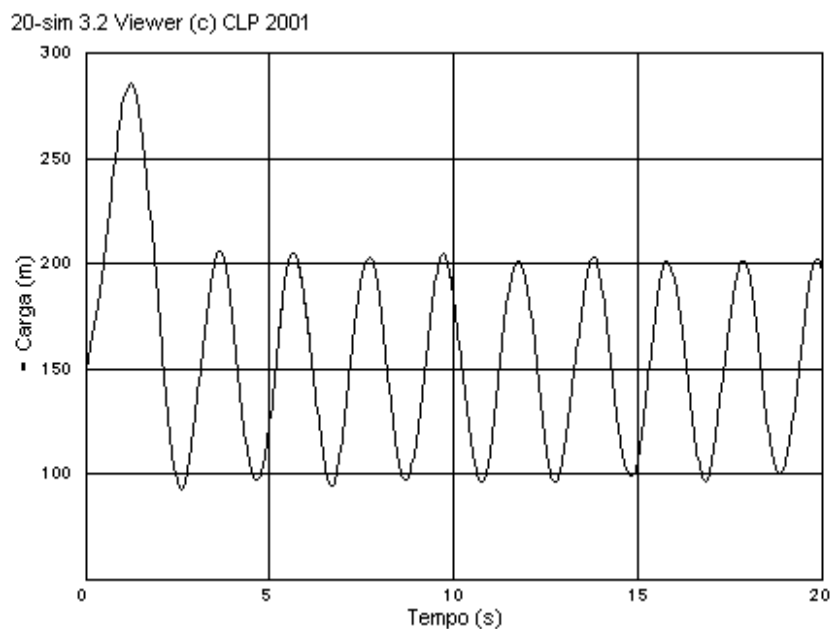


Figura 6: Sobrepresão na válvula com Grafos de Ligação

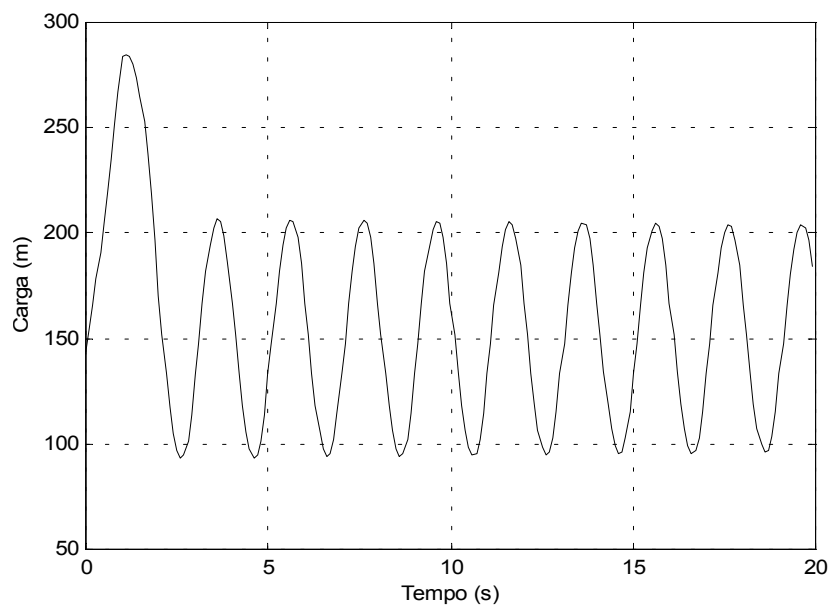


Figura 7: Sobrepresão na válvula com o método das características

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 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 Filippo, 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. Larreteguy 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).