

PEDRO LUIS ANGEL RESTREPO

**MODELAGEM ORIENTADA A OBJETOS DE  
SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS: ESTUDO DE  
CASO NA SÍNTESE DE CONTROLE DE SISTEMAS  
PREDIAIS**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia

SÃO PAULO

2004

PEDRO LUIS ANGEL RESTREPO

**MODELAGEM ORIENTADA A OBJETOS DE  
SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS: ESTUDO DE  
CASO NA SÍNTESE DE CONTROLE DE SISTEMAS  
PREDIAIS**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia

Area de Concentração:  
Engenharia Mecatrônica

Orientador:  
Prof. Dr. Jose Reinaldo Silva

SÃO PAULO

2004

*A mi viejo  
In Memoriam*

# RESUMO

Neste trabalho se apresenta a definição da rede *GHENeSys* (*General Hierarchical Enhanced Net System*), sua equação de estado, os algoritmos computacionais para um jogador de marcas baseado na sua equação de estado, a ferramenta computacional que os implementa e uma aplicação na síntese de controle.

A *GHENeSys* é uma rede estendida orientada a Objetos que permite o tratamento hierárquico do processo de projeto, o tema base é uma proposta na direção da fusão do *Petri Net Inside Objects* e do *Object Inside Petri Nets*, mantendo a representação algébrica e a análise de propriedades clássica.

Apresenta-se um estudo de caso no campo da automação predial, consistindo de um prédio com uma política de utilização definida mediante regras heurísticas. Estas regras são utilizadas para a síntese de um sistema supervisorio para o Prédio, mediante o conceito de objetos de controle.

# ABSTRACT

This work presents a formal definition of a Petri Net named *GHENeSys* (*General Hierarchical Enhanced Net System*), We show its state equation, algorithms for a computational tool based on classic state equation, the software that make it useful and an application on control synthesis.

*GHENeSys* is an Extended Object Oriented Net than allow hierarchical design of systems, the principal interest of this work is an intent of melting *Petri Net Inside Objects* and *Object Inside Petri Nets*, but keeping the classic algebraic representation and properties analysis.

Is presented an case study on Building Automation, where the use politics represented by heuristic rules, are used to make the synthesis of an supervisory system using the concept of *Control Object*.

# Sumário

<b>RESUMO</b>	<b>4</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>5</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVO</b>	<b>5</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>6</b>
3.1 Redes de Petri . . . . .	6
3.1.1 Princípios de Representação Algébrica . . . . .	8
3.1.1.1 Vetor de Capacidades . . . . .	9
3.1.1.2 Vetor de Marcação . . . . .	10
3.1.1.3 Transições Habilitadas . . . . .	10
3.1.1.4 Vetor de Habilitação . . . . .	11
3.1.1.5 Equação de Estado . . . . .	11
3.1.1.6 Detecção de Conflitos . . . . .	12
3.1.2 Dinâmica da Rede . . . . .	13
3.1.3 Redes Estendidas e de Alto Nivel . . . . .	14
3.1.4 Linguagens . . . . .	14
3.2 Orientação a Objetos . . . . .	15
3.2.1 Conceitos Básicos . . . . .	15
3.2.2 Análise Orientada a Objetos . . . . .	17
3.3 Orientação a Objetos e Redes de Petri . . . . .	17
3.3.1 Objetos Dentro de Redes de Petri . . . . .	17
3.3.2 Redes de Petri Dentro de Objetos . . . . .	18
3.3.3 Mútua Integração das Técnicas de Orientação a Objetos e Redes de Petri . . . . .	18
3.4 Hierarquia em Redes de Petri . . . . .	22
3.4.1 Composição Hierarquica . . . . .	22
3.4.2 Refinamento Hierarquico . . . . .	23
3.5 Controle de Sistemas a Eventos Discretos com Redes de Petri . .	23
3.5.1 Controle . . . . .	23
3.5.2 Controle de Sistemas de Eventos Discretos . . . . .	25

3.6	Prédios Inteligentes . . . . .	26
3.6.1	Inteligencia nos Prédios . . . . .	26
3.6.2	Diferença entre um Prédio Inteligente e um Prédio Auto- matizado . . . . .	27
3.6.2.1	Prédio Automatizado . . . . .	27
3.6.2.2	Prédio Inteligente . . . . .	28
3.6.3	Sistemas do Prédio Inteligente . . . . .	28
3.7	Realidade Virtual . . . . .	28
3.7.1	Conceitos Fundamentais . . . . .	30
3.7.2	Programação de Ambientes Virtuais . . . . .	31
<b>4</b>	<b>REDE <i>GHENeSys</i></b>	<b>32</b>
4.1	Conceitos Básicos . . . . .	32
4.2	Diagrama de Classes . . . . .	34
4.3	Regras de Compatibilidade entre Redes e MacroElementos . . . . .	35
4.4	Efeito da Marcação dos PseudoBox sobre os Elementos Ativos . . . . .	35
4.5	Efeito do Fluxo de mensagens na Marcação dos PseudoBox . . . . .	35
4.6	Definição Formal . . . . .	37
4.7	Representação Algébrica . . . . .	37
4.7.1	Matriz de Incidência . . . . .	39
4.7.2	Efeito da Marcação dos PseudoBox no Fluxo de Marcas . . . . .	40
4.7.3	Vetor de Capacidades . . . . .	41
4.7.4	Vetor de Marcação . . . . .	41
4.7.5	Vetor de Habilitação . . . . .	42
4.7.5.1	Habilitação por Marcação . . . . .	42
4.7.5.2	Efeito dos arcos Habilitadores e Inibidores . . . . .	43
4.7.6	Equação de Estado . . . . .	45
4.7.7	Deteção de Conflitos . . . . .	45
4.7.8	Cálculo de Efeito de Mensagens nos PseudoBox . . . . .	46
4.7.9	Dinâmica da Rede . . . . .	47
4.8	Exemplo de Abstração . . . . .	48
4.9	Modelagem e Projeto de Sistemas com a Rede <i>GHENeSys</i> . . . . .	54
<b>5</b>	<b><i>GHENESYS</i>: O SISTEMA COMPUTACIONAL</b>	<b>55</b>
5.1	Caraterísticas Gerais . . . . .	55
5.2	Caraterísticas Específicas . . . . .	66

5.3	Caraterísticas Adicionais . . . . .	66
5.4	Critérios para a Seleção do Compilador . . . . .	67
5.5	Aspectos Computacionais . . . . .	67
5.5.1	Algoritmo de Hierarquização . . . . .	67
5.5.2	Algoritmo de Execução da Rede <i>GHENeSys</i> . . . . .	69
5.6	Exemplo da Dinâmica da Rede <i>GHENeSys</i> . . . . .	69
5.6.1	Geração da Árvore Hierarquica . . . . .	71
5.6.2	Matrizes do Sistema . . . . .	73
5.6.3	Vetores de Capacidade . . . . .	74
5.6.4	Vetores de Marcação . . . . .	74
5.6.5	Cálculo das Transições Habilitadas . . . . .	74
5.6.6	Cálculo do Efeito da Presença de Arcos Habilitadores e Inibidores . . . . .	76
5.6.7	Cálculo de Conflitos . . . . .	77
5.6.8	Aplicação da Equação de Estado . . . . .	80
5.7	Descrição Geral da <i>GHENESYS</i> . . . . .	81
5.7.1	Interface Gráfica da <i>GHENESYS</i> . . . . .	85
5.7.1.1	Módulo de Sistema Operacional . . . . .	85
5.7.1.2	Módulo de Desenho . . . . .	86
5.7.1.3	Módulo de Administração do Projeto . . . . .	88
5.7.1.4	Módulo de Execução . . . . .	90
5.7.1.5	Módulo de Ajuda . . . . .	92
<b>6</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b>	<b>93</b>
6.1	Controle de Sistemas a Eventos Discretos com a Rede <i>GHENeSys</i>	93
6.2	Identificação do Sistema . . . . .	93
6.2.1	Descrição do Prédio . . . . .	93
6.2.2	Políticas de Utilização do Prédio . . . . .	93
6.3	Decomposição do Sistema . . . . .	94
6.3.1	Objetos do Prédio . . . . .	94
6.3.2	Dispositivos de Automação do Prédio . . . . .	95
6.3.3	Objetos de Controle . . . . .	95
6.4	Modelos dos Objetos . . . . .	97
6.4.1	Modelos dos Objetos com o Sistema de Mensagens . . . . .	97
6.4.2	Modelos dos Objetos de Controle . . . . .	100
6.5	Encapsulamento dos Objetos em MacroElementos . . . . .	113



6.6	Árvore de Hierarquia . . . . .	122
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO</b>	<b>128</b>
7.1	Conclusões . . . . .	128
7.2	Trabalho Futuro . . . . .	129
	<b>PLANTAS</b>	<b>130</b>
A4-01	. . . . .	131
A4-02	. . . . .	132
A4-03	. . . . .	133
A4-04	. . . . .	134
A4-05	. . . . .	135
A4-06	. . . . .	136
A4-07	. . . . .	137
A4-08	. . . . .	138
A4-09	. . . . .	139
A4-10	. . . . .	140
A4-11	. . . . .	141
A4-12	. . . . .	142
A4-13	. . . . .	143
A2-01	. . . . .	144
	<b>APÊNDICES</b>	<b>145</b>
A.1	Crítérios para a Selecção do Compilador . . . . .	145
	<b>REFERÊNCIAS BIBLOGRÁFICAS</b>	<b>147</b>

# Lista de Figuras

3.1	Elementos de uma Rede de Petri . . . . .	7
3.2	Conflito em Redes de Petri . . . . .	12
3.3	Algoritmo da Dinâmica de uma Rede de Petri . . . . .	13
3.4	Conceito de Objetos Dentro de Redes de Petri . . . . .	18
3.5	Conceito de Redes de Petri Dentro de Objetos . . . . .	20
3.6	Mutua Integração das Técnicas de <b>OO</b> e Redes de Petri . . . . .	21
3.7	Transformações Preservando Vivacidade, Segurança, e Limitação . . . . .	24
3.8	Representação dos Sistemas de Controle de Malha Aberta e Fechada . . . . .	25
3.9	Controle Supervisório de Sistemas a Eventos Discretos . . . . .	26
4.1	Elementos Estendidos da Rede <i>GHENeSys</i> . . . . .	32
4.2	Representação dos Elementos Marcados na Rede <i>GHENeSys</i> . . . . .	32
4.3	Exemplo de um modelo em Rede <i>GHENeSys</i> . . . . .	34
4.4	Diagrama de Classes da Rede <i>GHENeSys</i> . . . . .	34
4.5	Efeito da Marcação dos PseudoBox sobre os Elementos Ativos . . . . .	36
4.6	Algoritmo da Dinâmica de uma Rede <i>GHENeSys</i> . . . . .	47
4.7	Exemplo de Abstração e Encapsulamento . . . . .	49
4.8	Subrede Encapsulada em uma MacroAtividade . . . . .	51
4.9	Abstração na Rede sem Marcação Consistente . . . . .	53
4.10	Método de Projeto de Sistemas com a Rede <i>GHENeSys</i> . . . . .	54
5.1	Algoritmo de Hierarquização da Rede <i>GHENeSys</i> . . . . .	68
5.2	Sintaxe para Fazer Referência aos Nós da Rede <i>GHENeSys</i> . . . . .	69
5.3	Algoritmo de Execução da Rede <i>GHENeSys</i> (a) . . . . .	70
5.4	Algoritmo de Execução da Rede <i>GHENeSys</i> (b) . . . . .	71
5.5	Exemplo de Dinâmica da Rede <i>GHENeSys</i> . . . . .	72
5.6	Árvore de Hierarquia para o Exemplo da figura 5.5 . . . . .	72
5.7	Resultado Exemplo da Dinâmica da Rede <i>GHENeSys</i> . . . . .	82
5.8	Estrutura interna de um Arquivo de Projeto na <i>GHENESYS</i> . . . . .	83
5.9	Estrutura de um Arquivo de Rede na <i>GHENESYS</i> . . . . .	84
5.10	Janela Principal da <i>GHENESYS</i> . . . . .	85
5.11	Ícones correspondentes aos Módulos da <i>GHENESYS</i> . . . . .	86
5.12	Menus e Barra de Ícones do Módulo Sistema Operacional . . . . .	86
5.13	Menus e Barra de Ícones do Módulo Desenho . . . . .	87

5.14	Movimentação de elementos na <i>GHENESYS</i> . . . . .	88
5.15	Mudança de Propriedades dos Elementos na <i>GHENESYS</i> . . . . .	88
5.16	Menus e Barra de Ícones do Módulo Administração do Projeto . . . . .	89
5.17	Janela de Opções da <i>GHENESYS</i> . . . . .	89
5.18	Janela de Estrutura da <i>GHENESYS</i> . . . . .	90
5.19	Janela de Gestão de mensagens da <i>GHENESYS</i> . . . . .	90
5.20	Menus e Barra de Ícones do Módulo Administração do Projeto . . . . .	91
5.21	Menu de Seleção das Instâncias de um Projeto <i>GHENESYS</i> . . . . .	91
5.22	Menus e Barra de Ícones do Módulo Administração do Projeto . . . . .	92
5.23	Janela <i>About</i> da <i>GHENESYS</i> . . . . .	92
6.1	Modelos dos Sistemas de Automação do Prédio . . . . .	97
6.2	Modelos dos Sistemas de Automação do Prédio com o Sistema de mensagens . . . . .	99
6.3	Modelo do Objeto Presença Iluminação Interior . . . . .	100
6.4	Modelo do Objeto Presença Iluminação Exterior . . . . .	101
6.5	Modelo do Objeto Presença Acesso Iluminação . . . . .	102
6.6	Modelo do Objeto Duplo Acesso Iluminação Presença . . . . .	103
6.7	Modelo do Objeto Detecção de Incêndios . . . . .	104
6.8	Modelo do Objeto Duplo Presença Iluminação Exterior . . . . .	105
6.9	Modelo do Objeto Duplo Presença Iluminação Interior . . . . .	106
6.10	Modelo do Objeto Economia de Energia do HVAC . . . . .	107
6.11	Modelo do Objeto Sistema Acesso . . . . .	108
6.12	Modelo do Objeto Sistema Vigilância . . . . .	108
6.13	Modelo do Objeto Presença Iluminação Vigilância . . . . .	109
6.14	Modelo do Objeto Presença Iluminação Acesso Vigilância . . . . .	110
6.15	Modelo do Objeto Duplo Acesso Iluminação Presença Vigilância . . . . .	111
6.16	Modelo do Objeto Duplo Presença Iluminação Interior Vigilância . . . . .	112
6.17	Modelo do Objeto Acesso Vigilância . . . . .	113
6.18	Encapsulamento do Objeto Presença Iluminação Exterior . . . . .	114
6.19	Encapsulamento do Objeto Presença Iluminação Interior Vigilância . . . . .	115
6.20	Encapsulamento do Objeto Presença Iluminação Acesso Vigilância . . . . .	116
6.21	Encapsulamento do Objeto Duplo Presença Iluminação Vigilância . . . . .	117
6.22	Encapsulamento do Objeto de Detecção de Incêndios . . . . .	118
6.23	Encapsulamento do Objeto Duplo Presença Iluminação Exterior . . . . .	119

6.24 Encapsulamento do Objeto Duplo Acesso Iluminação Presença Vi- gilância . . . . .	120
6.25 Encapsulamento do Objeto Economia de Energia do HVAC . . . .	121
6.26 Encapsulamento do Objeto Acesso . . . . .	122
6.27 Sistema de Comunicação dos Objetos de Controle do Andar Terreo	124
6.28 Sistema de Comunicação dos Objetos de Controle Subsolo 1 . . .	124
6.29 Sistema de Comunicação dos Objetos de Controle Subsolo 2 . . .	125
6.30 Árvore de Hierarquia do Estudo de Caso . . . . .	126
6.31 Nó Inicial do Modelo de Controle . . . . .	127

# Lista de Tabelas

3.1	Trabalhos na Têndencia de Objetos Dentro de Redes de Petri . . .	19
3.2	Trabalhos na Têndencia de Redes de Petri Dentro de Objetos . . .	20
3.3	Mutua Integração de Técnicas de Orientação a Objetos e Redes de Petri . . . . .	21
3.4	Sistemas requeridos em um Prédio Inteligente . . . . .	29
4.1	Descrição dos Elementos da Rede Ghenesys . . . . .	33
4.2	Efeito do Fluxo de mensagens nos PseudoBox . . . . .	47
5.1	Carateristicas das Ferramentas de Redes de Petri . . . . .	65
5.2	Carateristicas dos Sistemas de Desenvolvimento Disponíveis . . . .	66
6.1	Descrição dos Elementos de Controle . . . . .	96
6.2	Objetos de Controle do Andar Terreo . . . . .	123
6.3	Objetos de Controle do Subsolo 1 . . . . .	123
6.4	Objetos de Controle do Subsolo 2 . . . . .	125
A.1	Critérios e Escala de Avaliação . . . . .	145
A.2	Escolha do Ambiente de desenvolvimento para a Construção da Ferramenta Computacional <i>GHENESYS</i> . . . . .	146

# Lista de Símbolos

$L$	Conjunto finito de lugares.
$T$	Conjunto finito de transições.
$F$	Conjunto finito de arcos.
$W$	Função de peso.
$M_0$	Marcação inicial de uma rede de Petri.
$N$	Rede de Petri sem marcação inicial.
$(N, M_0)$	Rede de Petri com uma marcação inicial.
$G$	Grafo de uma rede de Petri.
$V$	Conjunto dos vértices do grafo de uma rede de Petri.
$F$	Conjunto de arcos orientados do grafo de uma rede de Petri.
$m$	Número de transições.
$n$	Número de lugares.
$A^+$	Matriz que indica a quantidade de <i>tokens</i> adicionadas aos lugares após o disparo de uma transição.
$A^-$	Matriz que indica a quantidade de <i>tokens</i> subtraídos dos lugares após o disparo de uma transição.
$C$	Vetor que representa a capacidade dos lugares de uma rede de Petri.
$H$	Vetor que representa as transições habilitadas para disparar em uma rede de Petri.
$U_k$	Vetor que representa a marcação dos lugares de uma rede de Petri no $k$ -ésimo instante de execução.
$X^T$	Inversa da matriz $X$ .
$H_k$	Vetor que representa as transições habilitadas de uma rede de Petri no $k$ -ésimo instante de execução.
$U_k^S$	Vetor que representa a marcação dos lugares de uma rede de Petri simulando o disparo no $k$ -ésimo instante de execução.
$U_k^c$	Vetor de marcação do conflito
$\Sigma$	Alfabeto
$\Sigma^*$	Conjunto das palavras de um Alfabeto $\Sigma$
$\lambda$	Alfabeto vazio
$P$	Conjunto de elementos passivos da rede <i>GHENeSys</i> .
$Mb$	Conjunto finito de Macro elementos do tipo passivo de uma

	rede <i>GHENeSys</i> .
$Pb$	Conjunto finito de elementos do tipo PseudoBox de uma rede <i>GHENeSys</i> .
$A$	Conjunto finito de elementos ativos de uma rede <i>GHENeSys</i>
$Ma$	Conjunto finito de Macro elementos do tipo ativo de uma rede <i>GHENeSys</i> .
$H^e$	Matriz que representa a conexão entre os elementos PseudoBox e os elementos ativos por arcos habilitadores em uma rede <i>GHENeSys</i> .
$H^d$	Matriz que representa a conexão entre os elementos PseudoBox e os elementos ativos por arcos inibidores em uma rede <i>GHENeSys</i> .
$A_g$	Matriz de incidência da rede <i>GHENeSys</i> .
$D$	Matriz Diagonal unitária.
$U'$	Vetor de Marcação dos elementos passivos não-PseudoBox
$U^{pb}$	Marcação dos PseudoBox
$H^-$	Vetor que representa o efeito dos arcos inibidores e a marcação dos PseudoBox em as transições em uma rede <i>GHENeSys</i> .
$H^+$	Vetor que representa o efeito dos arcos habilitadores e a marcação dos PseudoBox em as transições em uma rede <i>GHENeSys</i> .
$T$	Matriz diagonal unitária.
$M_k$	Vetor que representa o fluxo de mensagens.
$F_m$	fator do efeito dos mensagens na marcação dos PseudoBoxes.

# 1. INTRODUÇÃO

As Redes de Petri são uma ferramenta adequada para a modelagem de sistemas a eventos discretos [Murata, 1989], [Valette, 1979], [Cassandras, 1993], em grande parte devido ao fato da representação gráfica das Redes de Petri facilitar o projeto conceitual.

Há um problema ainda em aberto no que concerne à geração de um modelo em Redes de Petri, a saber a forma simples da rede clássica leva a redes muito grandes que só podem ser analisadas através de sua representação algébrica. Além disso, a construção de modelos de sistemas de maior complexidade requer algum tipo de modularização para romper a complexidade [Lakos, 1991].

Múltiplos tentos de resolver esta questão, são apresentados na literatura: Em primeiro lugar há a tentativa de dobramento da rede, [Jensen, 1997] e [Genrich, 1981], que em princípio seria um paliativo para a explosão de estados, mas que também aumenta o nível de abstração com que se trata os elementos da rede. Além disso, a rede colorida hierárquica [Jensen, 1997] apresenta a possibilidade de expressar a hierarquia e o conceito de estruturação. Do mesmo modo na rede Predicado/Transição (Pr/T) clássica a abstração é introduzida pela utilização da lógica de primeira ordem associada à rede.

Mais recentemente, a discussão foi ampliada com a introdução das Redes Orientadas a Objeto, que seriam mais uma possibilidade de solução para o problema, quer seja pela introdução do conceito de objetos e seus respectivos métodos de modelagem e projeto na síntese da rede (*Objects Inside Petri Nets*), ou pela utilização do conceito de herança para ampliar o nível de encapsulamento no processo de modelagem, onde os *tokens* da rede são objetos e possuem além de atributos, métodos, eventualmente representados como subredes (*Petri Nets Inside Objects*) [Lakos, 1995].

No entanto, qualquer que seja a possibilidade, o problema persiste, seja com redes de alto nível ou com redes Orientadas a Objetos (incluindo-se aí a fusão do *Petri Net inside objects* e *Object inside Petri Nets*). O ganho que se tem no processo de síntese da rede é perdido pela impossibilidade de se usar os métodos



clássicos de análise de propriedades.

A prometida compensação com as redes de alto nível na verdade é reduzida aos teoremas que garantem que toda rede de alto nível pode ser reduzida a uma rede *Basic High Level BHL*. A cada BHL corresponde uma rede elementar à qual pode ser aplicada a análise clássica de propriedades. Todavia, transformações realizadas em redes complexas são, em geral, difíceis de provar.

Alem disso, os esforços para Integrar Redes de Petri com Orientação a Objetos têm a grande desvantagem de serem essencialmente *flat* enquanto que o desenvolvimento de sistemas de maior complexidade necessitam de um abordagem hierarquico (*Top down* ou *botton up*) [Schiel, 1990]. A técnica de refinamento hierarquico consiste em substituir uma transição ou um lugar por uma rede. deste modo, a descrição da rede pode ser representada como um conjunto hierarquicamente organizado de redes [Anisimov, 1994]

Portanto, para a representação eficiente de sistemas de grande porte requer-se um mecanismo de composição hierarquica que permita que os modelos possam ser construídos de maneira estruturada, composto a partir de unidades simples e facilmente compreensíveis em cada nível de abstração. O modelo hierarquico permite uma representação do sistema no qual as subredes que o integram são suficientemente simples para serem modificadas de forma rápida e eficiente [Brauer, 1990].

Assim, continua sendo muito atraente a hipótese de combinar uma Rede de Petri com um processo de síntese onde se utiliza o paradigma de objetos, o modelo hierarquico e os métodos de análise algébrica das redes já consagrados, elemento importante no sucesso desta representação de modelos de sistemas.

Neste contexto, o presente trabalho tem como tema base uma proposta na direção da fusão do *Petri Net Inside Objects* e do *Object Inside Petri Nets*, mantendo a representação algébrica e a análise de propriedades clássica. A rede proposta é também hierarquica uma vez que não é possível dispensar a hierarquia como forma de abstração [Lakos, 1995]; esta abordagem tem ainda a vantagem de produzir componentes reutilizáveis, que reduzem em muito o trabalho de modelagem [Fabian, 1995].

Neste trabalho é apresentada a definição da rede *GHENeSys* (*General Hierarchical Enhanced Net System*), sua equação de estado, os algoritmos computáveis para um jogador de marcas estritamente baseado na equação de estado, a ferramenta computacional que os implementa e uma aplicação na síntese de controle supervisão de um sistema de automação predial. A aplicação é uma proposta de tratamento do *Intelligent building* como descrito em [Finley, 1991], com as considerações das propostas para a formalização do processo de modelagem de sistemas de controle [Silva, 1996] e dos sistemas baseados em agentes [Silva, 1998].

Além da questão prática da geração da rede há um problema mais geral de se obter uma estrutura para o projeto de sistemas inteligentes que sirva de base composicional para sistemas de controle. Ao lado das perspectivas que apontam estes sistemas como um desafio para o futuro próximo [Lind, 1996], há também as dificuldades e limitações da lógica de primeira ordem para expressar a estrutura de funcionamento de uma planta inteligente.

Diferentes metodologias para a construção de sistemas supervisórios baseados em Redes de Petri podem ser encontradas em [Brandin, 1992], [Brandin, 1992a], [Zhou, 1995], [Giua, 1991], [Giua, 1994], [Moody, 2000], [Bourdon, 2002]. Em geral, Redes de Petri de Controle são uma classe de Redes de Petri com condições de habilitação externas chamadas *lugares de controle* que permitem a um controlador externo influenciar a progressão de *tokens* na rede [Holloway, 1994].

Neste contexto o processo de síntese apresentado neste trabalho baseia-se na heurística de uso do Prédio e apóia-se na Teoria de Sistemas Supervisórios de Ramadge and Wonham [Ramadge, 1989]. Note-se que a *GHENeSys* possui um tratamento especial para os eventos observáveis mas não-controláveis através de elementos estendidos chamados *PseudoBoxes*, que representam os elementos de conexão com o contexto e permitem inibir e/ou habilitar a ocorrência de eventos sem a introdução de desigualdades algébricas (as quais implicam o aumento da complexidade das equações de estado [Moody, 2000]).

As limitações do trabalho estão basicamente ligadas à unificação de classes referida em [Lakos, 1995], isto é, na *GHENeSys* (que ainda está em fase de desenvolvimento), as marcas não são consideradas objetos por enquanto, mas uma simples seleção de um conjunto de elementos. Portanto, passamos ao largo da

discussão sobre a existência de um único sistema de classes recursivo no qual uma marca poderia ter como elemento de composição qualquer outra classe (seja um outro elemento passivo ou ativo ou uma subrede).

## 2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é desenvolver um método para o projeto de sistemas procurando a integração do formalismo de Redes de Petri com o paradigma de objetos, sem no entanto perder a possibilidade de fazer análise algébrica de propriedades da maneira clássica. Assim, é apresentada uma rede estendida orientada a objetos que permite o tratamento hierárquico do processo de projeto, na rede *GHENeSys* (*General Hierarchical Enhanced Net System*), onde é possível a utilização de Redes de Petri como Objetos.

O trabalho abrange o projeto e desenvolvimento de uma ferramenta computacional para a construção e execução de modelos formais. é apresentado um estudo de caso no campo da automação predial, consistindo de um prédio com uma política de utilização definida mediante regras heurísticas. Estas regras são utilizadas na síntese de *Objetos de Controle* baseados em Redes de Petri do tipo *GHENeSys*. Para a validação do modelo e do jogador de marcas, utiliza-se uma maquete em realidade virtual do prédio modelado.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Redes de Petri

As Redes de Petri são uma ferramenta que permite a representação de sistemas através de modelos na forma de estruturas matemáticas. Mediante a análise destas estruturas pode-se obter informação importante acerca do comportamento, propriedades, morfologia e dinâmica do sistema objeto de estudo [Peterson, 1981].

Uma Rede de Petri clássica é uma estrutura matemática composta por três tipos de elementos: *lugares*, *transições*, e *arcos*. Convencionalmente os lugares simbolizam os aspectos passivos do sistema, as transições associam-se aos aspectos dinâmicos, e os arcos representam a relação entre os elementos passivos e ativos. A definição formal de uma Rede de Petri se apresenta a continuação:

#### Definição 3.1 Rede de Petri

Uma Rede de Petri é uma 5-Tupla,  $N = (L, T, F, W, M_0)$  onde:

$L = \{l_1, l_2, \dots, l_m\}$  é um conjunto finito de lugares

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  é um conjunto finito de transições

$F \subseteq (L \times T) \cup (T \times L)$  é um conjunto finito de arcos (Relação de fluxo)

$W : F \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$  é uma função que associa um peso a cada relação de fluxo

$M_0 : L \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$  é a marcação inicial

$L \cap T = \phi$  e  $L \cup T \neq \phi$ .

A relação de peso, pode ser entendida como a quantidade de arcos unitário existentes entre dois elementos.

Ao conjunto dos *tokens* presentes nos lugares da rede num dado instante denomina-se a 'marcação da rede'. Uma estrutura de Rede de Petri  $N = (L, T, F)$  sem uma marcação inicial é denotada por  $N$ . uma Rede de Petri com uma marcação inicial denota-se por  $(N, M_0)$ .

Uma Rede de Petri possui um grafo subjacente com dois tipos de nós: os lugares e as transições. Este grafo é bipartido, ponderado (*weight*) e direcionado. A definição formal do grafo inerente à Rede de Petri se mostra a seguir.

### Definição 3.2 Grafo Subjacente de uma Rede de Petri

O grafo de uma Rede de Petri  $G$  é um grafo Bipartido e direcionado,  $G = (V, F)$  onde  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_s\}$  é o conjunto dos vértices e  $F = f_1, f_2, \dots, f_r$  é um conjunto de arcos orientados,  $f_i = (v_j, v_k)$ , com  $v_j, v_k \in V$ . O conjunto  $V$  pode ser partido em dois conjuntos disjuntos  $L$  e  $T$  tal que  $V = L \cup T$ , onde  $L \cap T = \phi$ . A partição de  $V$  em dois conjuntos é a base do Princípio de dualidade [Girauld, 2003], que por sua vez é a base da formalização algébrica das Redes de Petri. O princípio de representação gráfica atribui a cada sistema um grafo composto de arcos, lugares e transições descritos por elementos gráficos.

Na representação gráfica as transições são representadas por barras e/ou retângulos, os lugares por círculos, os arcos se desenham rotulando com um número natural a função de peso, e os *tokens* se desenham no interior dos lugares. Quando a quantidade de *tokens* não permite representá-los explicitamente, a representação é feita com um número. Os elementos gráficos da Rede são apresentados na Figura. 6.2

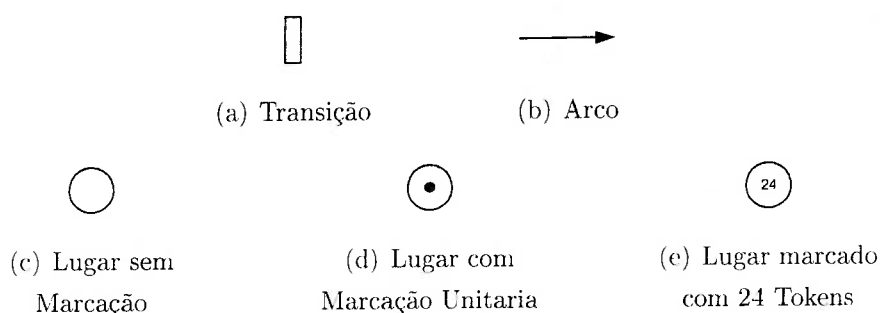


Figura 3.1: Elementos de uma Rede de Petri

A representação gráfica das Redes de Petri facilita o projeto conceitual e portanto é bem aceita para a modelagem de sistemas discretos. Entretanto a forma simples da rede clássica apresentada leva a redes muito grandes que só podem ser analisadas de fato através de sua representação algébrica.

A dinâmica do sistema é representada mediante a movimentação dos *tokens*, através do disparo (*firing*) das transições. As condições de habilitação e disparo das transições são apresentadas a seguir:

1. Diz-se que uma transição está habilitada se cada lugar de entrada  $l$  está marcado com  $m(l)$  *tokens* e  $m(l) \geq w(l, t)$  onde  $w(l, t)$  é a função peso.

2. Uma transição habilitada pode ou não disparar dependendo se o evento que representa ocorre ou não. Uma transição não habilitada não pode disparar.
3. O disparo de uma transição  $t$  remove  $w(l, t)$  *tokens* de cada lugar de entrada  $l$  e adiciona  $w(t, l)$  *tokens* a cada lugar de saída  $l$  de  $t$ .

Uma rede na qual a capacidade dos lugares é limitada se conhece como rede finita, o disparo de uma transição em uma rede finita requer além das condições antes apresentadas, que os lugares de saída tenham uma capacidade livre que permita a alocação dos *tokens*. Esta limitação se conhece como condição de disparo estrita.

Uma transição que não tem lugares de entrada é denominada como transição fonte (*source*) e sempre está habilitada. Uma transição que não tem lugares de saída é denominada como transição sorvedouro (*sink*), e quando dispara remove os *tokens* dos lugares de entrada apagando-os da rede.

A modelagem com Redes de Petri tem como característica inerente o paralelismo e a concorrência, isto é, em uma Rede de Petri, dois eventos que estão habilitados e não interagem entre si podem ocorrer independentemente, sem que seja necessário sincronizá-los, a menos que esta seja uma característica própria do sistema que se deseja modelar.

Uma característica adicional das Redes de Petri é sua natureza assíncrona, pois sua execução não depende de parâmetros de tempo. Assim, a única relação entre os eventos a modelar é sua ordem na seqüência das ocorrências.

### 3.1.1 Princípios de Representação Algébrica

Este princípio propõe uma representação matemática alternativa, baseada em matrizes construídas a partir das relações existentes entre os lugares e as transições. A definição baseada em matrizes é equivalente à forma padrão [Peterson, 1981]. O estudo das propriedades, dinâmica e características do sistema modelado por uma Rede de Petri, baseia-se neste princípio. A representação algébrica supõe uma rede pura, isto é, sem arestas e cujos extremos sejam o mesmo elemento.

**Definição 3.3** *Definição Algébrica de uma Rede de Petri*

Uma Rede de Petri é representada algebricamente por uma 4-tupla:  $(L, T, A^+, A^-)$  onde:

$L$  é um conjunto finito de lugares

$T$  é um conjunto finito de transições

$m$  é o numero das transições

$n$  é o numero dos lugares

A matriz  $A^+$  de ordem  $m \times n$ , representa a quantidade de *tokens* adicionada aos lugares após o disparo de uma transição:

$$A^+ = \begin{array}{c} \\ T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_m \end{array} \begin{array}{cccc} L_1 & L_2 & \dots & L_n \\ \left[ \begin{array}{cccc} a_{1,1}^+ & a_{1,2}^+ & \dots & a_{1,n}^+ \\ a_{2,1}^+ & a_{2,2}^+ & \dots & a_{2,n}^+ \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1}^+ & a_{m,2}^+ & \dots & a_{m,n}^+ \end{array} \right. \end{array}$$

onde:  $a_{i,j}^+ = \begin{cases} w(t_i, l_j) & \text{se existe um arco entre } t_i \text{ e } l_j \\ 0 & \text{de outro modo} \end{cases}$

A matriz  $A^-$ , de ordem  $m \times n$ , representa a quantidade de *tokens* subtraída dos lugares após o disparo de uma transição:

$$A^- = \begin{array}{c} \\ T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_m \end{array} \begin{array}{cccc} L_1 & L_2 & \dots & L_n \\ \left[ \begin{array}{cccc} a_{1,1}^- & a_{1,2}^- & \dots & a_{1,n}^- \\ a_{2,1}^- & a_{2,2}^- & \dots & a_{2,n}^- \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1}^- & a_{m,2}^- & \dots & a_{m,n}^- \end{array} \right. \end{array}$$

onde:  $a_{i,j}^- = \begin{cases} w(l_j, t_i) & \text{se existe um arco entre } l_j \text{ e } t_i \\ 0 & \text{de outro modo} \end{cases}$

### 3.1.1.1 Vetor de Capacidades

A capacidade é o número máximo de *tokens* que um lugar pode armazenar, o vetor de Capacidades  $C$ , de ordem  $n$ , representa a capacidade dos lugares da rede:



$$C = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} \quad \text{onde: } c_j = \text{Capacidade do } j\text{-ésimo lugar} \quad (3.1)$$

### 3.1.1.2 Vetor de Marcação

É um vetor  $U_k$  de ordem  $n$ , que representa a distribuição dos *tokens* nos lugares no estado  $k$ . Armazena o valor de cada um dos lugares da rede no  $k$ -ésimo ciclo de avaliação:

$$U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} \quad \text{onde: } u_j = \text{Quantidade de } \textit{tokens} \text{ presentes no } j\text{-ésimo lugar} \quad (3.2)$$

### 3.1.1.3 Transições Habilitadas

Utilizando o enfoque matricial para determinar se uma transição está habilitada por uma marcação aplica-se a seguinte equação:

$$U \geq (e[j] \cdot A^-)^T \quad (3.3)$$

Onde:  $U$  é o vetor de marcação e  $e[j]$  representa um vetor de ordem  $m$  que é zero em todas as entradas exceto na componente  $j$ . Assim é possível comparar a  $j$ -ésima entrada da matriz  $A^-$  com o vetor da marcação  $U$ , e determinar se cada lugar tem os *tokens* que precisariam ser removidos caso a  $j$ -ésima transição fosse disparada. Na forma estendida:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} \geq \left( [e_1, e_2, \dots, e_m] \begin{bmatrix} a_{1,1}^- & a_{1,2}^- & \dots & a_{1,n}^- \\ a_{2,1}^- & a_{2,2}^- & \dots & a_{2,n}^- \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1}^- & a_{m,2}^- & \dots & a_{m,n}^- \end{bmatrix} \right)^T = \begin{bmatrix} a_{j,1}^- \\ a_{j,2}^- \\ \vdots \\ a_{j,n}^- \end{bmatrix}$$

No caso das redes finitas, onde a capacidade dos lugares tem limite, é preciso estabelecer se os elementos de saída podem receber os *tokens* que o disparo das transições irão aportar. Assim:

$$C - U \geq (e[j] \cdot A^+)^T \quad (3.4)$$

Na forma estendida:

$$\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} \geq \left( [c_1, c_2, \dots, c_m] \begin{bmatrix} a_{1,1}^+ & a_{1,2}^+ & \dots & a_{1,n}^+ \\ a_{2,1}^+ & a_{2,2}^+ & \dots & a_{2,n}^+ \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1}^+ & a_{m,2}^+ & \dots & a_{m,n}^+ \end{bmatrix} \right)^T = \begin{bmatrix} a_{j,1}^+ \\ a_{j,2}^+ \\ \vdots \\ a_{j,n}^+ \end{bmatrix}$$

### 3.1.1.4 Vetor de Habilitação

O vetor de habilitação  $H_k$  de ordem  $m$ , é formado pelo resultado da avaliação da habilitação de cada uma das transições da rede

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_m \end{bmatrix}_k \quad \text{donde: } h_i = \begin{cases} 1 & \text{se verificam as equações 3.3 e 3.4} \\ 0 & \text{de outro modo} \end{cases} \quad (3.5)$$

### 3.1.1.5 Equação de Estado

As conseqüências de um disparo das transições da rede são calculadas mediante a equação de estado:

$$U_{k+1} = U_k + A^T \cdot F_k \quad (3.6)$$

Onde  $F$  é o vetor que representa as transições disparadas. É preciso considerar a possibilidade de que nem todas as transições habilitadas para disparar, disparem efetivamente, assim:

$$F_k \leq H_k \quad (3.7)$$

A forma explicita: da equação 3.6 é mostrada a seguir:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,m} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \dots & a_{n,m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_m \end{bmatrix}_k$$

### 3.1.1.6 Detecção de Conflitos

Os conflitos aparecem quando se deseja disparar simultaneamente varias transições, nas quais o disparo de uma desabilita as outras (conflito *preset*), ou quando o disparo de várias transições gera uma quantidade de *tokens* que excede a capacidade de um lugar (Conflito *Postset*). A figura 3.2 ilustra graficamente este conceito.

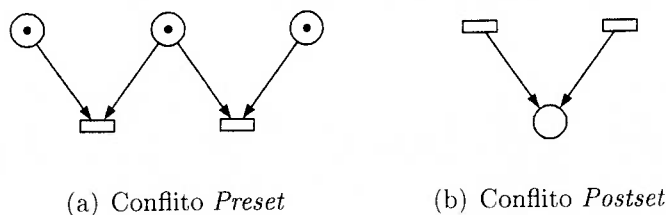


Figura 3.2: Conflito em Redes de Petri

Para detectar os possíveis conflitos se calcula o vetor de marcação obtido a partir da simulação do disparo de todas as transições habilitadas para disparar (representado por  $U_{k+1}^s$ ), segundo a equação:

$$U_{k+1}^s = U_k + A^T \cdot (H_k) \quad (3.8)$$

Onde:

$A$  é a matriz de incidência construída a partir das duas matrizes definidas em 3.3.

$$A = \begin{matrix} & L_1 & L_2 & \dots & L_n \\ \begin{matrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1} & a_{m,2} & \dots & a_{m,n} \end{bmatrix} & \text{onde: } a_{i,j} = a_{i,j}^+ - a_{i,j}^- & (3.9) \end{matrix}$$

$H_k$  é o vetor de Habilitação no  $k$ -ésimo vetor de disparo.

A partir do vetor de simulação de disparo  $U_k^s$  e do vetor de capacidades  $C$  calcula-se o vetor de marcação de conflitos  $U^c$  segundo a seguinte equação:

$$U_k^c = \begin{bmatrix} u_1^c \\ u_2^c \\ \vdots \\ u_n^c \end{bmatrix} \quad \text{onde: } (u_j^c)_k = \begin{cases} -1 & \text{se } (u_j^s)_k < 0 \\ 1 & \text{se } (u_j^s)_k > c_j \\ 0 & \text{de outro modo} \end{cases} \quad (3.10)$$

Uma entrada diferente de zero na  $j$ -ésima posição do vetor de marcação do conflito implica que na coluna correspondente da matriz  $A^-$  encontram-se presentes transições que apresentam um conflito. Se a entrada é negativa ( $-1$ ) o conflito que se apresenta é de *preset*, se a entrada é positiva ( $1$ ) o conflito é de *postset*.

A resolução de conflitos, aplica-se uma política de resolução específica para o sistema modelado, e que depende da interpretação deste modelo. Na ausência de conflitos, seja porque não foram detectados ou porque foram resolvidos pela aplicação de uma política de resolução, é possível avaliar as consequências de um disparo real, através da equação de estado (ver 3.6).

### 3.1.2 Dinâmica da Rede

A dinâmica da Rede representa o comportamento dos aspectos de interesse do sistema modelado. O algoritmo da dinâmica da rede e apresentado na figura 3.3.

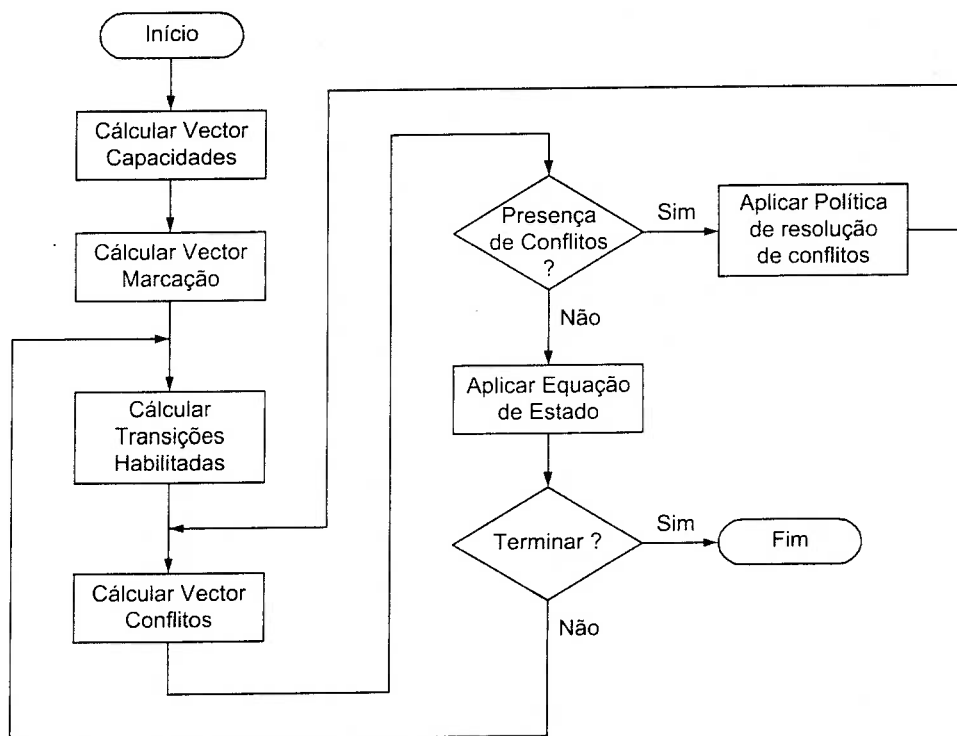


Figura 3.3: Algoritmo da Dinâmica de uma Rede de Petri

### 3.1.3 Redes Estendidas e de Alto Nivel

Com o objetivo de incrementar o poder de representação dos modelos construídos com Redes de Petri várias abordagens têm sido desenvolvidas introduzindo novos elementos e técnicas na teoria clássica das redes. Entre estas redes, denominadas redes estendidas, as mais importantes são: Redes com Arcos Habilitadores e Inibidores, Redes com Tempo e Redes Estocásticas

Além disso há técnicas nas quais são associados aos *tokens* valores que são modificados durante a execução da rede, este tipo de Rede é conhecida como Redes de Alto Nivel e incluem as Redes Coloridas, Predicado/Transição e Redes com *tokens* Individuais.

### 3.1.4 Linguagens

Seja  $\Sigma$  um conjunto de símbolos chamado alfabeto. Uma palavra (*string*) é uma cadeia finita de símbolos do alfabeto  $\Sigma$ . Uma linguagem é um conjunto de palavras e frases bem formadas sobre um alfabeto, definidas por uma gramática. Um alfabeto vazio é denotado por  $\lambda$  e o conjunto das palavras por  $\Sigma^*$ .

Uma Rede de Petri é geradora de uma linguagem [Giua, 1991]. O conjunto de estados de marcação que uma rede  $N$ , pode alcançar desde um estado de marcação inicial  $M_0$ , através do disparo das transições da rede é denominado o conjunto de alcançabilidade de  $M$  e denota-se como  $R(N, M_0)$ . O conjunto de alcançabilidade da rede é equivalente à linguagem gerada pela rede, onde ambos os conceitos se relacionam mediante uma Rede de Petri Rotulada [Giua, 1994].

#### Definição 3.4 Rede de Petri Rotulada

Uma Rede de Petri Rotulada é uma 4-Tupla,  $G = (N, l, M_0, F)$  onde:

$N$  = Uma estrutura de Rede de Petri.

$l : T \rightarrow \Sigma$  é uma função que associa a cada transição um rótulo a partir de um Alfabeto de Eventos  $\Sigma$ .

$M_0$  = Marcação inicial.

$F$  é um conjunto finito de Marcações finais.

A função de rotulação pode ser estendida de maneira que  $T^* \rightarrow \Sigma^*$

Duas Redes de Petri são equivalentes se suas linguagens são iguais, e assim se estabelece a base formal para a equivalência de dois sistemas [Peterson, 1981]. Se uma transformação aplicada a uma rede, produz uma nova rede com a mesma linguagem diz-se que a linguagem é preservada a partir desta transformação.

A representação das Redes de Petri a partir de linguagens permite a otimização de sistemas mediante a aplicação de transformações que preservem a linguagem da rede, procurando reduzir o número de elementos utilizados. Adicionalmente esta representação é útil para técnicas de análise de propriedades e para a especificação da síntese automática da rede à partir da especificação do comportamento desejado do sistema como uma linguagem.

## 3.2 Orientação a Objetos

A Orientação a Objetos (**OO**) é uma técnica originária da engenharia de Software, à qual consiste em modelar um sistema decompondo-o em entidades conceituais denominadas objetos. O comportamento do sistema é reproduzido pela interação dos objetos assim definidos. O processo de identificação dos objetos de um sistema se conhece como decomposição [Booch, 1994]. Os objetos são definidos em termos da informação que contém e das operações que disponibilizam para a utilização e manipulação desta informação.

Um objeto se define como uma estrutura que possui dados, estados e métodos. Os dados são a especificação da informação que caracteriza o objeto, os métodos são a forma de manipular os dados, permitindo alterar o estado do objeto. Os métodos podem ser de três tipos:

- **Métodos de Construção/Destruição:** Permitem que um objeto passe a ser parte do sistema o deixe de sê-lo.
- **Métodos com acesso a Escrita:** Modificam o valor dos dados do Objeto.
- **Métodos com acesso a Leitura:** Permitem obter os valores dos dados do objeto, sem alterá-los.

### 3.2.1 Conceitos Básicos

Os conceitos mais relevantes dos métodos com Orientação a Objetos são descritos a seguir [Jaworski, 1997]:

**Mensagens:** Os objetos interagem trocando mensagens: quando um objeto recebe uma mensagem, invoca um método para processá-la; este método pode mudar o estado do objeto, retornar a informação nele contida, ou provocar a criação ou eliminação de objetos.

**Classes:** Uma classe é um conjunto de objetos que compartilham uma estrutura e um comportamento comum, quando um objeto pode ser considerado como um elemento de uma classe, diz-se que este objeto é uma instância da classe. Assim, uma classe define o tipo de dados contidos em um objeto e os métodos que estes utilizam para acessar os dados, e os métodos para criar e/ou destruir instâncias de se mesmo.

**Classificação:** A classificação é um mapeamento entre objetos e classes conhecidas. Se um objeto não se encaixa em nenhuma das categorias conhecidas, então gera-se uma nova classe.

**Reutilização:** Consiste em utilizar instâncias de uma classe fazendo referência a os seus métodos de criação. A reutilização de classes proporciona a possibilidade de construir entidades que podem ser depois utilizadas em outros projetos com o conseqüente incremento na produtividade no projeto de sistemas.

**Herança:** A propriedade de que uma categoria de objeto (Classe) contem as propriedades de todas as categorias de objetos dos quais este é descendente na árvore de classificação das classes denomina-se herança. A árvore de classificação das classes possui uma organização hierarquica onde os níveis superiores contêm as classes mais simples, isto é, as que têm um número menor de atributos, dados e métodos, descendo até os objetos mais complexos.

**Composição:** É a propriedade de um objeto poder estar composto de outros objetos ou construído com base nestes, permitindo a construção de objetos complexos à partir de objetos simples.

**Encapsulamento:** O encapsulamento é a combinação de dados e procedimentos que manipulam os dados em um único componente, isto é um objeto. O Encapsulamento também faz referência ao controle de acesso aos detalhes da

implementação de um objeto. O acesso a um objeto fica limitado a uma interface controlada e definida especificamente, o que permite que os objetos sejam autônomos.

**Polimorfismo:** É a capacidade de um objeto possuir vários métodos com o mesmo nome porém com formas diferentes, isto é com um número e/ou um tipo de parâmetros diferentes. Tal característica é especialmente útil na Engenharia de Software.

### 3.2.2 Análise Orientada a Objetos

O termo Análise Orientada a Objetos (**AOO**) refere-se a qualquer método que utilize a decomposição para a construção de modelos do mundo real, do ponto de vista da Orientação a Objetos. O Projeto Orientado a Objetos (**POO**) é um método de projeto que utiliza o processo de Análise Orientado a Objetos e algum tipo de notação para representar os modelos lógico, físico, dinâmico e estático do sistema. [Booch, 1994]

As técnicas Orientadas a Objetos já provaram ser extremamente efetivas no modelagem e simulação em geral [Pilgrim, 2001]. Especificamente, as técnicas de modelagem orientadas a Objetos estão sendo amplamente utilizadas na descrição de diferentes tipos de sistemas em diferentes áreas da engenharia, graças ao fato de possuírem importantes características como reutilização de código/classes, independência de implementação e uma grande capacidade de expressão de modelos [Wong, 1995].

## 3.3 Orientação a Objetos e Redes de Petri

Pesquisas recentes mostram que a integração do formalismo de Redes de Petri com técnicas de Orientação a Objetos tem características complementares. [Zapf, 1999]. Da integração destes dois conceitos é possível identificar três tendências [Bastide, 1995]:

### 3.3.1 Objetos Dentro de Redes de Petri

No enfoque de Objetos Dentro de Redes de Petri (*Objects Inside Petri Nets*) o sistema é modelado por uma Rede de Petri na qual os objetos são representados



por *tokens* na rede, as transições representam métodos com capacidade de ler e mudar os atributos dos objetos. Não existe intercâmbio de mensagens entre os objetos. A figura 3.4 ilustra graficamente este conceito, a tabela 3.1 apresenta alguns dos trabalhos realizados neste sentido [Zapf, 1999].

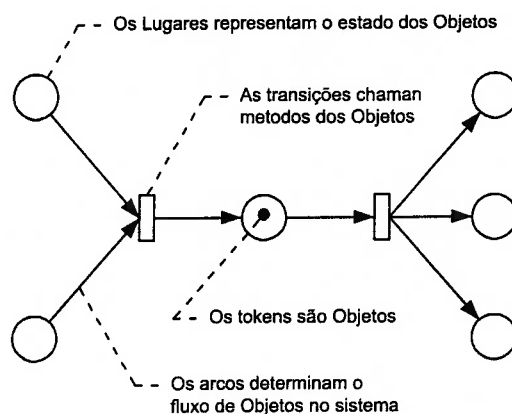


Figura 3.4: Conceito de Objetos Dentro de Redes de Petri

### 3.3.2 Redes de Petri Dentro de Objetos

Na tendência de Redes de Petri Dentro de Objetos (*Petri Nets Inside Objects*) realiza-se primeiro o processo de decomposição do sistema (ver 3.2). Uma vez que os elementos relevantes e suas relações foram estabelecidas, o comportamento de cada objeto é modelado com ajuda das Redes de Petri. Assim, a rede é um framework para o fluxo de objetos, o que é conceitualmente semelhante a ter uma rede colorida, já que o mapeamento das marcas em objetos é o mesmo que categorizá-las identificando a sua "cor". A figura 3.5 ilustra graficamente este conceito, e a tabela 3.2 apresenta alguns dos trabalhos realizados nesta tendência [Zapf, 1999].

### 3.3.3 Mútua Integração das Técnicas de Orientação a Objetos e Redes de Petri

A integração mútua das técnicas orientadas a Objetos e Redes de Petri tende a se concentrar no desenvolvimento de sistemas que integram de maneira recursiva as redes e os objetos. A AOO é utilizada para determinar os objetos e as regras de composição e associação entre estes. O comportamento de cada objeto as relações e o fluxo de mensagens entre objetos são representadas em Redes de Petri

ainda que sejam necessárias extensões para abrigar especificamente o conceito de mensagem ou ampliar o espectro de relações entre objetos para incluir relações de vizinhança e ordenação.

Assim, as Redes de Petri são usadas para modelar o comportamento dos objetos, e portanto não é possível ter uma visão global da interação entre os objetos e da sua troca de mensagens, porém a integração das Técnicas de Orientação a Objetos e Redes de Petri facilita a modelagem hierarquica com comportamento concorrente [Zapf, 1999]. A figura 3.6 ilustra graficamente este conceito, a tabela 3.3 mostra alguns trabalhos que utilizam este enfoque.

<b>Técnica</b>	<b>OO Notação- Linguagem</b>	<b>Tipo da Rede</b>	<b>Ferramenta</b>
LOOPN (Language for Objects Petri Nets)	Linguagem Própria	Redes Coloridas com Tempo	LOOPN
Macronet)	Extensão da representação ER	Rede Estendida	MacroTec
MOBY	SmallTalk-80	Rede Estendida	MOBY
NetCASE (Petri Net Based CASE)	Baseado em OMT	Subclasse das redes Pr/T	NEPTUM
OBJSA Nets	OBJ2	Rede Estendida	ONE
OOCPN (Object-Oriented Coloured Petri Nets)	EIFFEL	Redes Coloridas	
OPM (Objects Process Model)	UML	Transformação em Coloridas ou PT.	OTW 2
SimCon (Simple Integrated Model for Complex Object Networks)	Notação Própria	Rede Estendida	ExSpect
THORN (Timed hierárchical Object-Related Nets)	C++	Rede Estendida	THORN/DE

Tabela 3.1: Trabalhos na Têndencia de Objetos Dentro de Redes de Petri

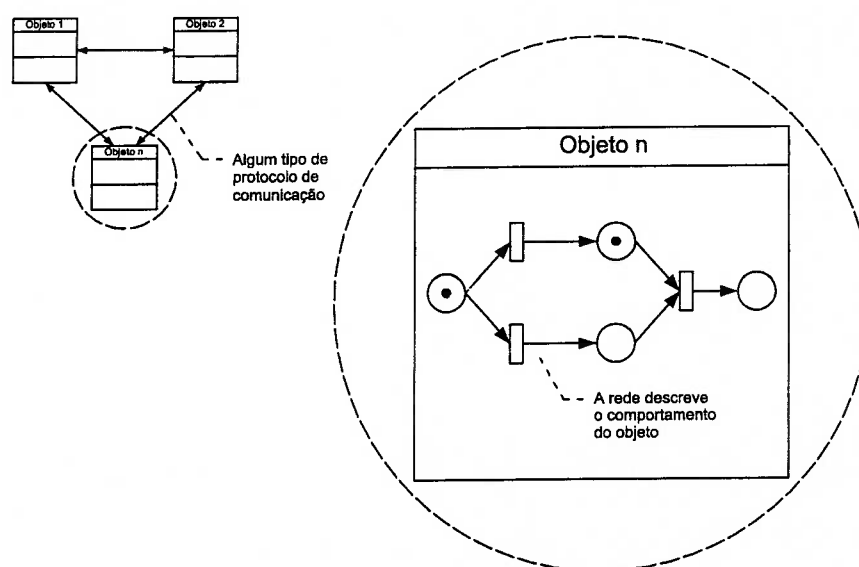


Figura 3.5: Conceito de Redes de Petri Dentro de Objetos

técnica	OO Notação- Linguagem	Tipo da Rede	Ferramenta
CLOWN (Class Orientation with Nets)	Linguagem Própria	Rede Estendida	Ambiente ONE
HOOD Nets	Notação Própria, ADA-pseudo-code	High Level, Pr/T Nets	
OBM (Object Behaviour Model)	Notação Própria baseada em Modelo semantico de dados	Transformação em Pr/T	editor
OCPN (Object Coloured Petri Nets)	Notação Orientada a Objetos	Transformação em Coloridas	
OOBM (Object-Oriented Behaviour Modelling for Real-Time Design)	Notação Orientada a Objetos	Redes Coloridas	
PAM (Petri Net Based Abstract Machine)	Linguagem própria	Redes Coloridas	
PROTOB	Notação e Linguagem própria	Linguagem própria	PROTOB

Tabela 3.2: Trabalhos na Têndencia de Redes de Petri Dentro de Objetos

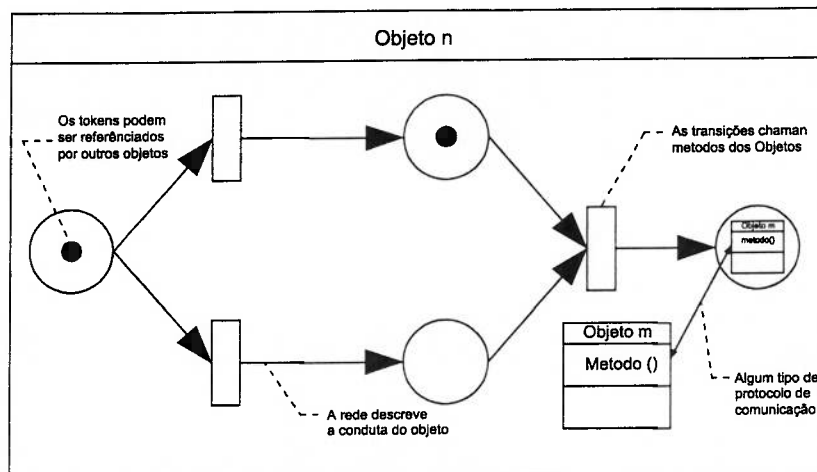


Figura 3.6: Mutua Integração das Técnicas de OO e Redes de Petri

Técnica	OO Notação- Linguagem	Tipo da Rede	Ferramenta
CO-OPN/2 (Concurrent Object-Oriented Petri Nets)	Linguagem Própria	Rede Estendida	Coopn-Tools
COOs (Cooperative Objects)	Linguagem Própria	Rede Estendida	SYROCO
HOON Higher-Order Object Nets	OMT e ER-Notation	Rede Estendida	
LOOPN++ (Languaje for Object Petri Nets)	Linguagem Própria	Transformação em Coloridas	LOOPN++
OOPN (Object Oriented Petri Nets)	Notação Própria	Rede Estendida	PNTalk
OOPNL (Object Oriented Petri Net Languaje)	Notação Própria	Rede Estendida	Codesign
OOPr/T (Nets Object oriented Pr/T Nets)	OMT ou UML	Pr/T	
OPN (Object Petri Nets)		Rede Estendida	
PN-TOX (Petri Nets Tools for Object Concurrency Specification)	Notação Própria	Diferentes tipos de Redes	

Tabela 3.3: Mutua Integração de Técnicas de Orientação a Objetos e Redes de Petri

Em geral, nas propostas apresentadas na tabela 3.3 a formulação analítica das redes e a possibilidade de análise de propriedades é substituída por um conjunto de comportamentos atribuídos a objetos, onde as marcas desempenham um papel fundamental dando ao sistema o status de alto nível.

Porém, algumas das propostas estão baseadas no modelo Redes de Petri dentro de Objetos, incluindo a capacidade de um objeto referenciar outros objetos [Lakos, 1995]. O sistema desta maneira construído é composto por um conjunto de instâncias de classes. Não há portanto como sintetizar as propriedades globais do sistema, por conseguinte não é possível representar agentes integrados de controle.

Os esforços para Integrar Redes de Petri com Orientação a Objetos tem a grande desvantagem de serem essencialmente *flat* enquanto que o desenvolvimento de sistemas de maior complexidade necessitam de uma abordagem ser hierárquica (*Top down* ou *bottom up*) [Schiel, 1990].

## 3.4 Hierarquia em Redes de Petri

A construção de modelos de sistemas de maior complexidade requer algum tipo de modularização para romper a complexidade [Lakos, 1991]. Para a representação eficiente deste tipo de sistema requer-se um mecanismo de composição hierárquica que permita que os modelos possam ser construídos de maneira estruturada, composto a partir de unidades simples e facilmente compreensíveis em cada nível de abstração. A hierarquia é uma ferramenta valiosa que permite que o projeto de um sistema seja construído de maneira estruturada, compondo-o por uma quantidade de entidades totalmente inteligíveis [Cortés, 2001].

### 3.4.1 Composição Hierárquica

O método para a elaboração de um modelo onde o resultado final é a combinação das soluções de pequenos sub-modelos é conhecido como composição hierárquica [Malhotra, 1993]. Vários métodos de composição hierárquica são propostos: [Valette, 1979] define o conceito de *block* que é uma subrede que inicia e termina com uma transição, [Zuzuki, 1983] propõe um método para refinamento e abstração que permite manejar o problema da explosão de estados mediante

a transformação de Transições e Lugares em subredes. Transformações realizadas em redes de complexas são, em geral, difíceis de provar. O modelo hierárquico permite uma representação do sistema no qual as subredes que o integram são suficientemente simples para serem modificadas de forma rápida e eficiente [Brauer, 1990].

### 3.4.2 Refinamento Hierárquico

A técnica de refinamento hierárquico consiste em substituir uma transição ou um lugar por uma rede. Assim, a descrição da rede pode ser representada como um conjunto hierarquicamente organizado de redes [Anisimov, 1994], uma Rede de Petri que implementa esta técnica é chamada Rede Refinada .

Um conceito relacionado com o refinamento é a redução que consiste em substituir um subconjunto de elementos por um lugar ou uma transição, [Murata, 1989] apresenta um conjunto de regras de redução que preservam propriedades como vivacidade (*Liveness*), Segurança (*Safeness*) e Limitação (*Boundeness*). A figura 3.7 ilustra estas transformações.

Um refinamento ou uma redução são conservativos com relação a vivacidade, segurança e limitação, se mantem a conduta da Rede, isto é, se preserva o comportamento da rede. [Murata, 1989]. A vantagem da hierarquia e refinamento está associada à possibilidade de poder definir um sistema a ser modelado em vários níveis de abstração, conforme o estágio de desenvolvimento e o conhecimento que se tem do sistema. Acrescida a esta vantagem, estaria ainda a possibilidade de associar a modelagem conceitual à reutilização de módulos já existentes.

## 3.5 Controle de Sistemas a Eventos Discretos com Redes de Petri

### 3.5.1 Controle

Para que um sistema realize de forma adequada as funções para as quais foi desenvolvido, é preciso que seja controlado, selecionando um conjunto de valores de entrada corretos para que efetuará a conduta desejada. [Cassandras, 1993]. Assim, a entrada de um sistema é chamada a sinal de controle, para o caso escalar

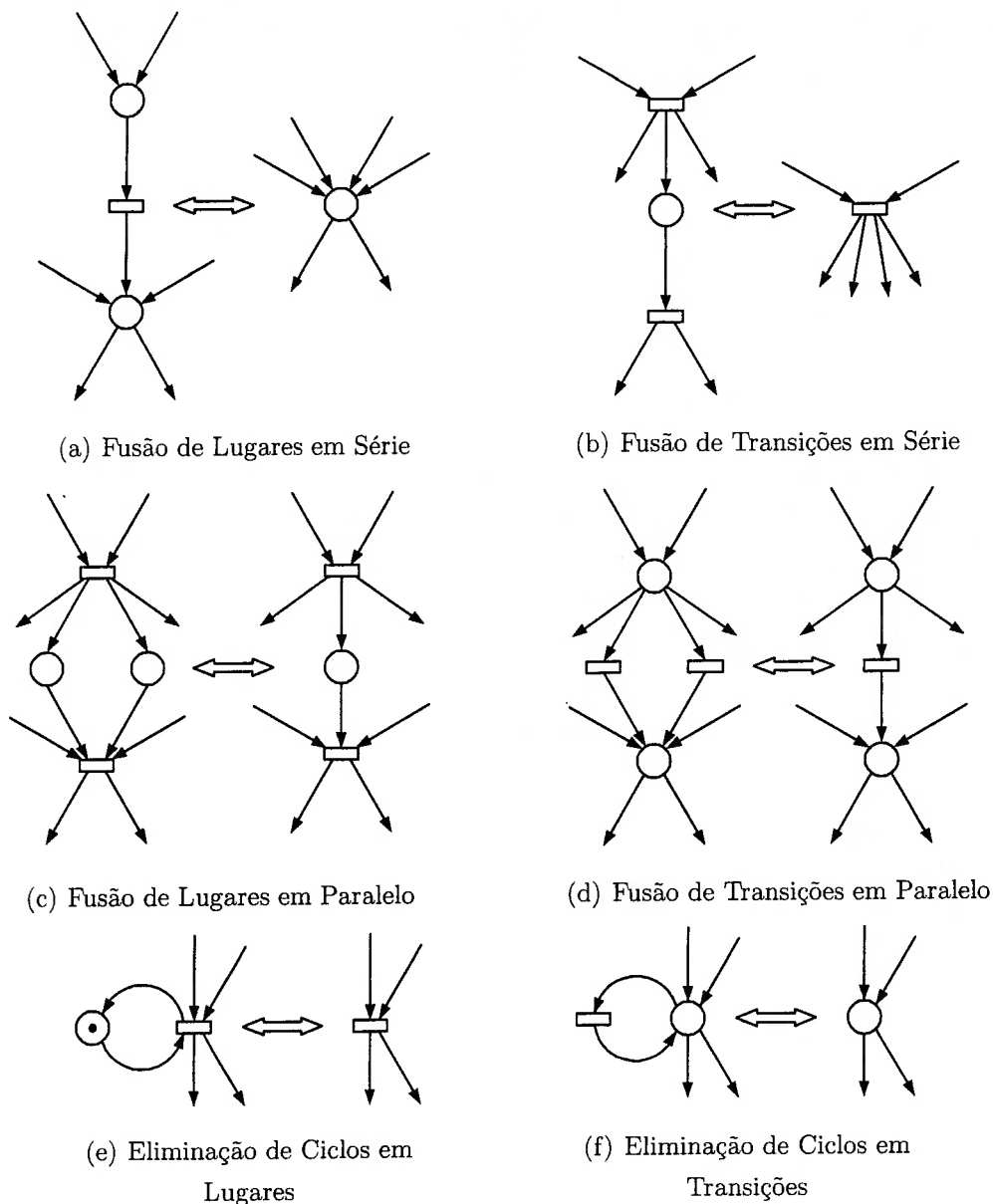


Figura 3.7: Transformações Preservando Vivacidade, Segurança, e Limitação

simples o sinal de referencia  $r(t)$  esta dada pela equação 3.11.

$$u(t) = \gamma(r(t), t) \quad (3.11)$$

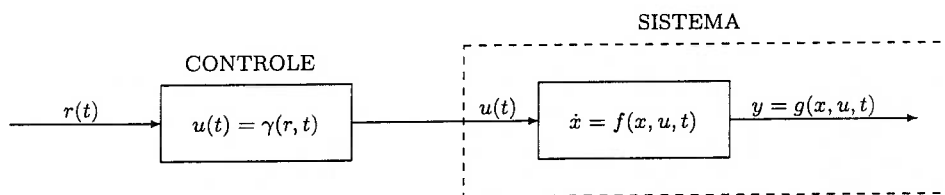
Esta relação é chamada lei de controle, a extensão ao caso vetorial onde são especificados múltiplos sinais leva à lei de controle referida na equação 3.12.

$$U(t) = \Gamma(R(t), t) \quad (3.12)$$

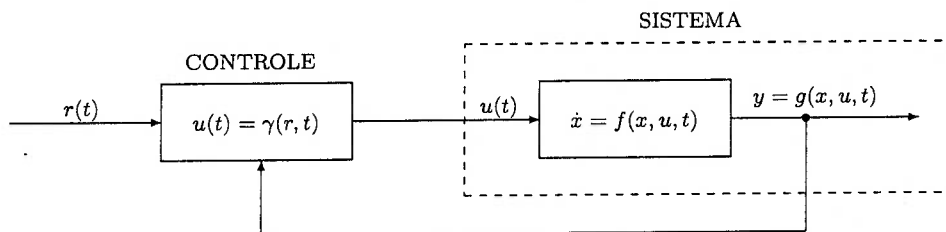
Um sistema de controle que corresponde ao modelo matemático descrito nas equações 3.11 ou 3.12 é conhecido como de malha aberta, os sistemas de con-

trole que utilizam a retroalimentação chamam-se de malha fechada. A retroalimentação consiste em incluir a variável de saída no controle. A equação 3.13 apresenta a definição matemática dos sistemas de controle de malha fechada. A figura 3.8 apresenta graficamente os conceitos de malha aberta e malha fechada.

$$U(t) = \Gamma(R(t), X(t), t) \quad (3.13)$$



(a) Sistema de Controle de Malha Aberta



(b) Sistema de Controle de Malha Fechada

Figura 3.8: Representação dos Sistemas de Controle de Malha Aberta e Fechada

### 3.5.2 Controle de Sistemas de Eventos Discretos

Um Sistema de Eventos Discretos (*SED*) é um sistema dinâmico que evolui de acordo com eventos que acontecem em períodos irregulares de tempo. As Redes de Petri são uma ferramenta adequada para o modelagem de sistemas a eventos discretos [Murata, 1989], [Valette, 1979], [Cassandras, 1993].

O Controle de SED baseia-se na capacidade de habilitar ou desabilitar alguns dos eventos do sistema. Assim, o conjunto de eventos  $E$  fica dividido em um subconjunto de eventos controláveis  $E_c$  e incontrolláveis  $E_u$ , isto é:  $E = E_c \cup E_u$  [Ramadge, 1989]. Um sistema de controle que funciona desta maneira se conhece como sistema supervisorio [Cassandras, 1993]. A fig. 3.9 ilustra graficamente o conceito de controle de sistemas a eventos discretos.



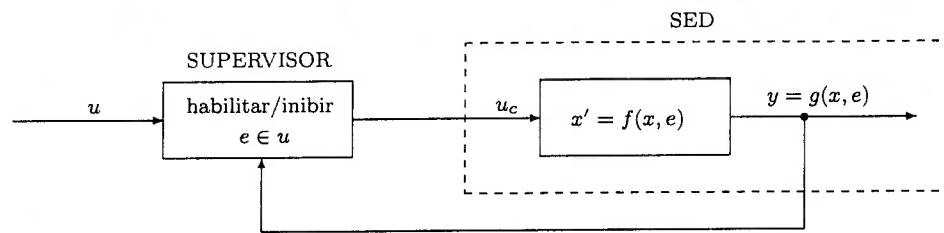


Figura 3.9: Controle Supervisório de Sistemas a Eventos Discretos

Diferentes metodologias para a construção de sistemas supervisórios baseados em Redes de Petri podem ser encontradas em [Brandin, 1992], [Brandin, 1992a], [Zhou, 1995], [Giua, 1991], [Giua, 1994], [Moody, 2000], [Bourdon, 2002]. Em geral, Redes de Petri de Controle são uma classe de Redes de Petri com condições de habilitação externas chamadas *lugares de controle* que permitem a um controlador externo influenciar a progressão de *tokens* na rede [Holloway, 1994].

## 3.6 Prédios Inteligentes

### 3.6.1 Inteligência nos Prédios

A inteligência dos prédios consiste em sua capacidade para responder às necessidades de seus usuários, provendo-lhes (ao indivíduo e à organização) serviços administrados de forma coordenada para maximizar a ação técnica, minimizar os custos de investimento e a manutenção. Neste caso a inteligência reside no fato que os sistemas contam com características para satisfazer as necessidades dos usuários de forma automática, aplicando os critérios que um ser humano aplicaria na mesma situação. Para chamar a um Prédio de 'inteligente', ele deve reunir as seguintes características: [Fujie, 1991]

- Possuir um Projeto que permita prover, todos os serviços de um modo adequado, em relação às exigências de usuários e administradores, permitindo flexibilidade no uso das dependências.
- Contar com serviços integrados e controlados
- Contar com sistemas históricos de operações.
- Ter um plano que proveja todos os serviços de um modo apropriado, em

relação às exigências de usuários e administradores, e que permita flexibilidade no uso das dependências.

- Ter serviços integrados e controlados.
- Ter históricos das operações do sistema.

”A inteligência de um prédio inteligente reside no grau em que são liberados os administradores e usuários das atividades tediosas e assistidos nas tarefas que deveriam executar. Um prédio altamente automatizado não pode ser considerado inteligente, a menos que esta automatização ajuda criar uma atmosfera que promova a criatividade, produtividade, excitação intelectual, troca de informação, e as saúde mental e física. Não pode ser denominado inteligente um Prédio que é projetado ergonomicamente, mas que não possui sistemas de telecomunicações, necessários no mundo atual. Também não é suficiente uma arquitetura brilhante, engenhosa, para considerar a um Prédio inteligente.” [Finley, 1991]

O nível de Inteligência de um prédio também é medido de forma efetiva pelo nível de conforto do ambiente. As características de conforto são: segurança, eficiência no trabalho, economia de energia, minimização do impacto ambiental, prontidão de canais de comunicação e sistemas de informação. [Stipidis, 1998]

Deste modo o projeto de um Prédio inteligente requer o trabalho de peritos em áreas diversas, como, computação e telecomunicações, construção, projeto de interiores e ainda ecologia. [Akimaru, 1991]

### **3.6.2 Diferença entre um Prédio Inteligente e um Prédio Automatizado**

#### **3.6.2.1 Prédio Automatizado**

Um prédio automatizado, é aquele que possui sistemas e serviços que respondem de um modo automático às necessidades de seus usuários e da administração, com a característica de que cada sistema atua de forma descentralizada. Por exemplo:

- Sistemas de segurança (alarmes, extintores de incêndio, etc.).
- Sistemas de corrente interrompida.
- Ar condicionado por zonas.

- Manutenção automatizada.

### 3.6.2.2 Prédio Inteligente

Um prédio inteligente é aquele que, além de ser automatizado, incorpora técnicas da tecnologia da Informação. Aliás também deve incluir inevitavelmente aspectos de integração, flexibilidade, planejamento do espaço, otimização de recursos e telecomunicações. [Cerde, 1989].

### 3.6.3 Sistemas do Prédio Inteligente

Os sistemas do Prédio são os que permitem alcançar uma atmosfera ergonômica para os usuários e equipes. Os sistemas principais de um Prédio são:

- Sistemas de calefação, ventilação y ar condicionado, HVAC (*Heating Ventilation Air- Conditioning*).
- Iluminação.
- Energia elétrica.
- Cableamento estruturado.
- Elevadores e escadas Rolantes.
- Controle de acesso.
- Segurança.
- Telecomunicações.
- Administração da informação.

Um sistema de automação predial deve contemplar uma grande quantidade de tarefas, entre elas é necessário considerar: [Stipidis, 1998]

## 3.7 Realidade Virtual

A Realidade Virtual (R.V.) é uma simulação na qual utilizam-se gráficos por computador para criar um universo cujo comportamento reúne as características próprias da realidade [Burdea, 1994]. Com o incremento da capacidade computacional do hardware e a diminuição no custo do mesmo, ocorrido nos últimos

anos é possível utilizar de maneira simples modelos gráficos tridimensionais, assim como outras facilidades no acesso a sistemas de entrada e saída para interagir com sistemas gráficos e ainda sonoros.

A R.V. é utilizada hoje em áreas tão variadas como a construção civil [Whyte, 1999], Arquitetura [Navinchandra, 2002], Robótica [Calkin, 1998], [Tianmiao, 2001] e [Freund, 2001], Simulação de Operações [Crook, 1998], Área Militar [Hix, 1999],

Sistema	Aspecto
Administração	Manutenção e Administração de dados
	Análise econômica
	Relatório de Operações
Comunicações	Telefonia
	Internet
	Dados Internos
Segurança	Controle de Acesso (ID cards, Passwords, etc)
	Sistema de Alarmes
	CFTV.
Prevenção de desastres	Controle de Elevadores
	Controle de Portas e Janelas
	Sistemas de <i>Sprinkler</i> .
	Vazamento de água e/ou gás
	Sistema de apoio a falhas no suprimento de Energia
Controle ambiental	Manutenção dos sistemas de Esgoto
	Ar Condicionado
	Iluminação
	Temperatura
	Umidade
	Ventilação
Administração de Energia e Controle	Sistemas automáticos de iluminação
	Sistema de iluminação de Emergência
	Sistema de Administração do consumo de Energia
	Sistema geradores de Emergência

Tabela 3.4: Sistemas requeridos em um Prédio Inteligente

Ensino [Li, 2002], Medicina [Shelbourn, 1998], [Satava, 1997], [Satava, 1998]. Especificamente com relação aos prédios a RV é utilizada no processo de projeto arquitetônico [Frost, 2000], estudo do desempenho de sistemas modernos de apoio ao funcionamento do prédio [Pilgrim, 2000], comercialização de prédios [Navinchandra, 2002], integração de projetos de grande porte desenvolvidos por equipes multidisciplinares. [Whyte, 1998].

A R.V. tem o potencial para assistir desenvolvedores de *housing* para avaliar y comercializar novos esquemas [Whyte, 1999]. Neste trabalho, se utilizara a Realidade Virtual para a construção de uma maquete de um prédio em forma de ambiente virtual.

### 3.7.1 Conceitos Fundamentais

As técnicas da Realidade Virtual englobam vários conceitos, entre os quais temos:

**Realidade Aumentada:** É uma tecnologia mediante a qual o ponto de vista do usuário da realidade é aumentado com informação adicional gerada pelo computador. É uma forma complementar de R.V. que permite ao usuário interagir com um mundo virtual integrado ao mundo real, a realidade aumentada envolve a superposição de informação em forma de imagens tridimensionais geradas por computador sobre uma cena do mundo real. [Whyte, 1999].

**Ambientes Virtuais:** Um ambiente virtual é um meio que permite a visualização e a simulação de mundos gerados por computador. É preciso fazer a distinção com relação à animação onde imagens criadas são simplesmente reproduzidas em seqüência. Um ambiente virtual pode ser explorado e visualizado de várias formas, com um número potencialmente infinito de perspectivas [Pilgrim, 2001].

**Sistemas Imersos:** Os sistemas imersos são aqueles sistemas onde se procura que o usuário fique totalmente imerso no ambiente virtual, este tipo de sistemas utiliza diferentes acessórios, como luvas, trajes especiais, visores o cascos, permitindo ao usuário uma visualização integral e uma experiência cognitiva profunda, este tipo de sistemas são utilizados especialmente para training e capacitação. [Burdea, 1994].

**Desktop Virtual Reality:** É uma técnica que aplica o mesmo software utilizado nos sistemas imersos mas baseado em sistemas de computadores pessoais, onde usuário interage com o sistema utilizando o teclado, o mouse ou um sistema 3D de mesa como os Joystick. O Desktop Virtual Reality *DVR* possui os benefícios de visualização e interação com o ambiente virtual sem ter os altos custos dos sistemas imersos. [Tait, 1992].

### 3.7.2 Programação de Ambientes Virtuais

Os modelos de realidade virtual são modelos tridimensionais que podem ser experimentados em tempo real, um nível de iteração ótimo requer uma taxa de 60 frames por segundo combinado com uma latência de resposta à iteração do usuário de 50 milissegundos. [Whyte, 1999]. Existem várias ferramentas para a construção de Ambientes virtuais, entre elas destaca-se o OpenGL por suas características de portabilidade e desempenho. [Burdea, 1994]. O Ambiente virtual construído para a validação do sistema computacional *GHENESYS* será desenvolvido em OpenGL com uma matriz em Delphi, referências na utilização do OpenGL na construção de Sistemas de realidade virtual encontram-se em [Modjeska, 2000] e [Forte, 2001]

## 4. REDE *GHENeSys*

### 4.1 Conceitos Básicos

A rede *GHENeSys* (*General Hierarchical Enhanced Net System*) é uma rede estendida, hierárquica, orientada a objetos, cujos elementos estendidos são apresentados na figura 4.1.

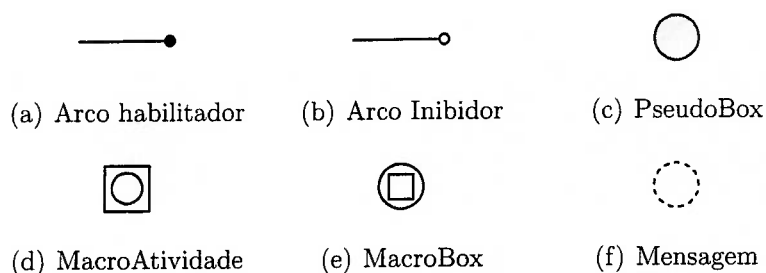


Figura 4.1: Elementos Estendidos da Rede *GHENeSys*

Os elementos passíveis de receber marcações são os passivos: Lugares, Macrobox e PseudoBox, cuja representação gráfica é mostrada na figura 4.2

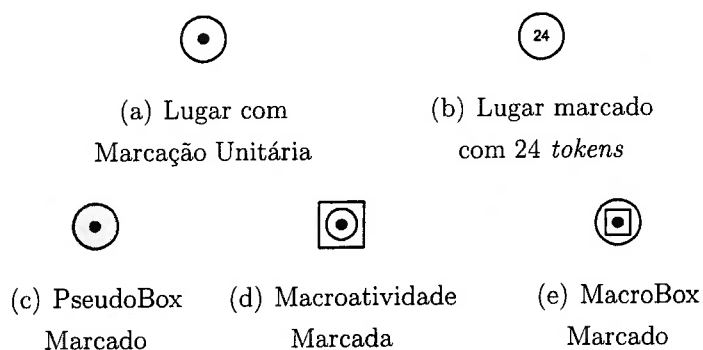


Figura 4.2: Representação dos Elementos Marcados na Rede *GHENeSys*

A tabela 4.1 descreve os elementos que compõem uma rede *GHENeSys* e as relações entre eles. A figura 4.3 apresenta um exemplo de uma rede *GHENeSys*.










NOME	SIMBOLO	DESCRIÇÃO
Lugar		Os lugares na Rede <i>GHENeSys</i> têm as mesmas características da Rede de Petri ordinária
Transição		As transições na Rede <i>GHENeSys</i> têm as mesmas características da Rede de Petri ordinária
Arco		Os arcos normais na rede <i>GHENeSys</i> têm uma função de peso ( $w$ ) constante de valor 1.
PseudoBox		Este elemento permite a representação das condições de fronteira do sistema, admite marcação vazia ou unitária, está conectado só a elementos ativos e somente através de arcos inibidores ou habilitadores, não pode ter mais de uma conexão com o mesmo elemento ativo.
MacroBox		Representa uma Subrede que inicia e finaliza com um lugar, só pode estar conectado com elementos ativos e somente mediante arcos normais. Permite dois tipos de comportamento: Funcionando diretamente com uma rede interna associada ou acumulando uma quantidade de <i>tokens</i> que são liberados em janelas de disparo estabelecidas por um relógio de simulação.
MacroAtividade		Representa uma Subrede que inicia e finaliza com uma transição, só podem estar conectadas a elementos passivos, quando conectada a lugares ou MacroBox terá arcos normais, quando conectada a um PseudoBox só poderá ter arcos inibidores ou habilitadores e pode estar conectada a vários PseudoBox. Possui dois tipos de comportamento: trabalhando com uma Rede associada ou acumulando uma quantidade de <i>tokens</i> e liberando-os em janelas de disparo.
Arco Habilitador		Um Arco habilitador só pode ser traçado entre um PseudoBox e um elemento ativo, se o PseudoBox está marcado a habilitação do elemento ativo depende somente das condições de marcação dos elementos passivos de entrada e saída, se o PseudoBox não está marcado o elemento ativo não está habilitado, independentemente de sua localidade.
Arco Inibidor		Um Arco inibidor só pode ser traçado entre um PseudoBox e um elemento ativo, se o PseudoBox está marcado o elemento ativo está desabilitado, se o PseudoBox não está marcado a habilitação será determinada pelos estados de marcação dos elementos passivos de entrada e saída, isto é de sua localidade.
Mensagem		As mensagens na rede <i>GHENeSys</i> representam uma conexão entre uma transição e um PseudoBox de redes diferentes, assim é possível a marcação ou desmarcação de um PseudoBox por um outro Objeto do sistema. Uma mensagem só pode ter arcos de entrada e devem ser traçados partindo de um elemento ativo.

Tabela 4.1: Descrição dos Elementos da Rede *Ghenesys*



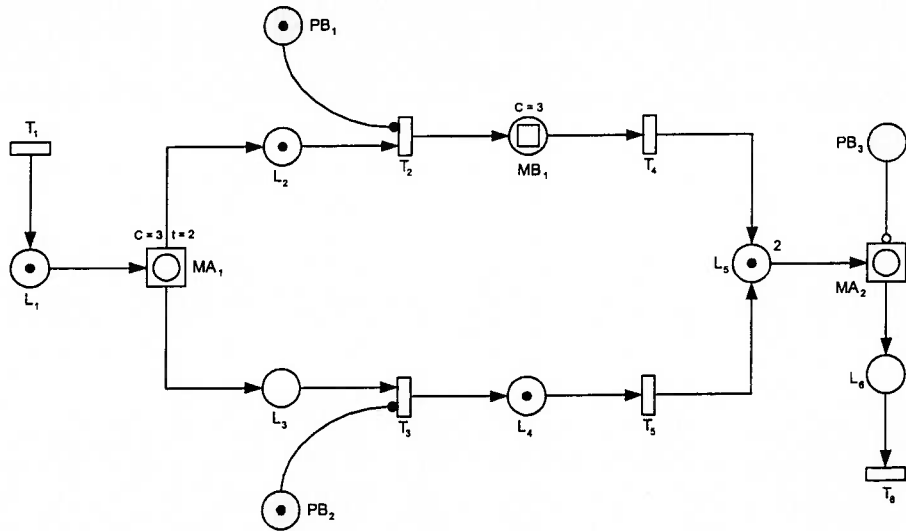


Figura 4.3: Exemplo de um modelo em Rede *GHENeSys*

## 4.2 Diagrama de Classes

O diagrama de classes, expressando a descendência e herança dos elementos da rede *GHENeSys* e a sua hierarquia, é apresentado na figura 4.4

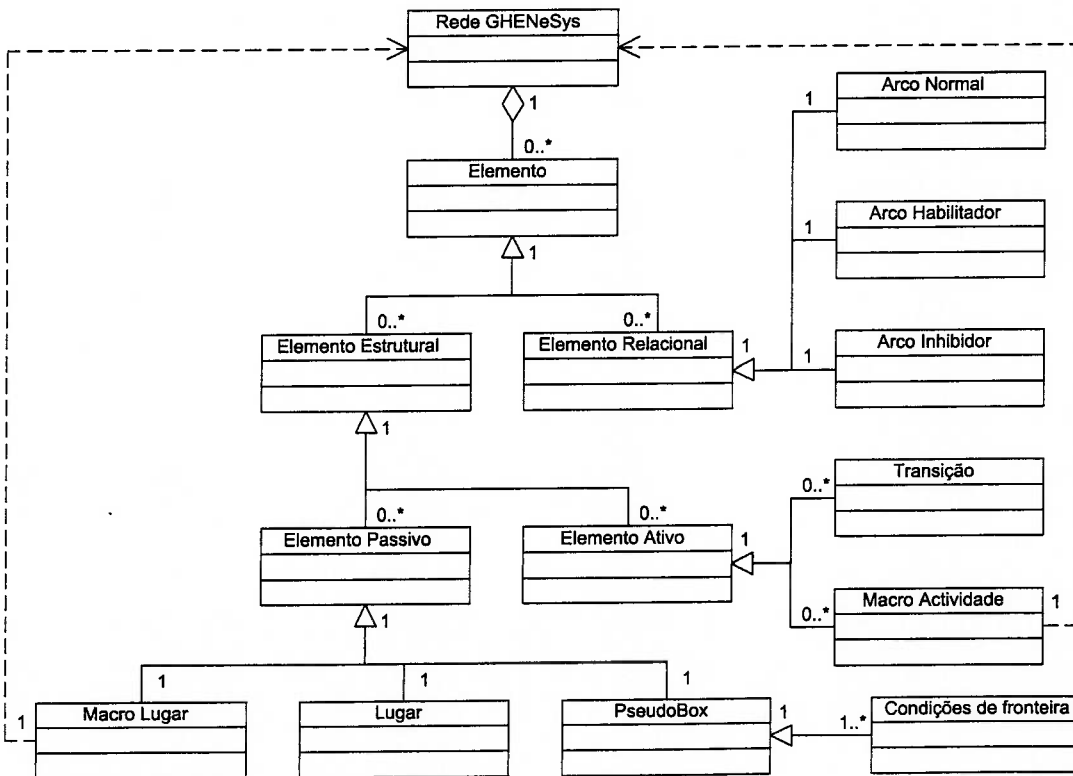


Figura 4.4: Diagrama de Classes da Rede *GHENeSys*

### 4.3 Regras de Compatibilidade entre Redes e MacroElementos

A utilização da *GHENeSys* baseia-se no design de redes que sejam compatíveis com MacroElementos, permitindo o projeto de sistemas a partir de refinamento e composição hierarquica a partir de uma rede inicial, as redes integradas na estrutura se comunicam diante mensagens que alteram a marcação dos PseudoBox das redes no projeto. A seguir se enunciam as regras de compatibilidade das subredes com os MacroElementos:

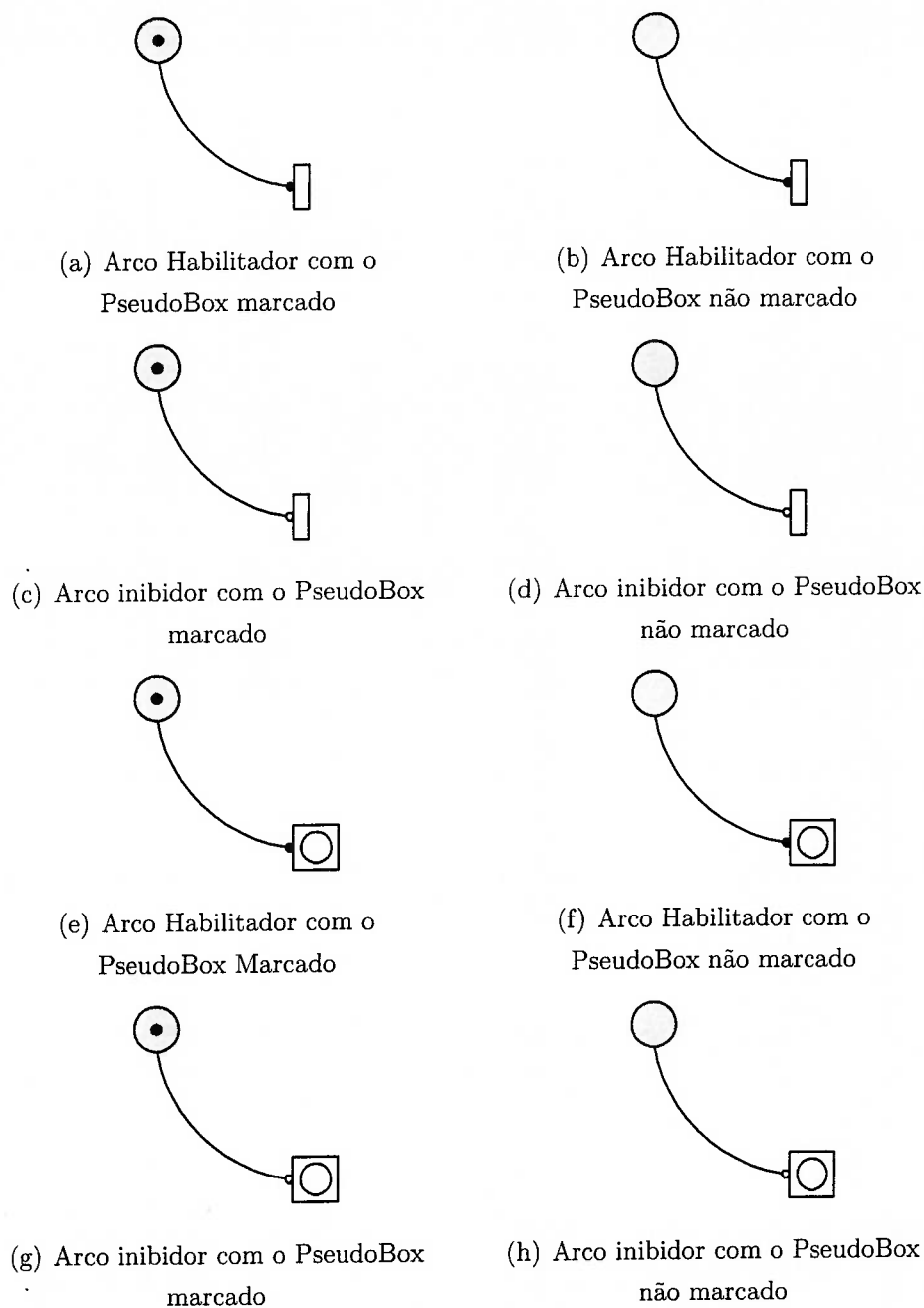
1. Uma rede é compatível com um elemento MacroBox se tem um único elemento Inicial e final, e os dois são Lugares.
2. Uma rede é compatível com um elemento MacroActividade se tem um único elemento Inicial e final, e os dois são Transições.
3. Uma rede é incompatível com qualquer MacroElemento se não cumpre nenhuma das condições anteriores.

### 4.4 Efeito da Marcação dos PseudoBox sobre os Elementos Ativos

Quando um elemento ativo (transição ou MacroActividade) esta conectado com um PseudoBox, su estado de habilitação para disparar é influenciado por a marcação do PseudoBox e o tipo de arco que os une. A figura 4.5 apresenta os possíveis casos de conexão entre um PseudoBox e um Elemento Ativo.

### 4.5 Efeito do Fluxo de mensagens na Marcação dos PseudoBox

Na *GHENeSys* um mensagem precisa estar vinculado com um PseudoBox, na ocorrência da geração de um mensagem o estado de marcação do PseudoBox pode ser alterado, o fluxo de mensagens é considerado instantâneo. Além disso, múltiplos mensagens, ainda de redes diferentes dentro do projeto, podem estar vinculados ao mesmo PseudoBox.



As figuras (b), (c), (f) e (g) apresentam elementos Ativos desabilitados de maneira incondicional, as figuras (a), (d), (e) e (h) mostram elementos ativos cujo estado de habilitação depende da marcação e capacidade dos elementos *Preset* e *postset*

Figura 4.5: Efeito da Marcação dos PseudoBox sobre os Elementos Ativos

## 4.6 Definição Formal

### Definição 4.1 Rede *GHENeSys*

A *GHENeSys* é um tipo de Rede de Petri definido por uma 4-tupla:  $(P, A, F, w)$ , onde:

$P$  é um conjunto finito de elementos passivos, onde:

$$P = L \cup Mb \cup Pb$$

$L$  é um conjunto finito de lugares.

$Mb$  é um conjunto finito de Macro elementos do tipo passivo.

$Pb$  é um conjunto finito de elementos do tipo PseudoBox.

$A$  é um conjunto finito de Elementos ativos

$$A = T \cup Ma$$

$T$  é um conjunto finito de Transições.

$Ma$  é um conjunto finito de Macro elementos do tipo ativo.

$$P \cap A = \phi \text{ e } P \cup A \neq \phi.$$

$F$  é a relação de fluxo, sendo um subconjunto do *Bag*  $(P \times A) \cup (A \times P)$  e

$w$  é um função de peso, onde  $w(a) \rightarrow \{1\}$

Na *GHENeSys* os arcos inibidores e/ou habilitadores só podem ser desenhados entre um PseudoBox e um elemento ativo. Além disso nenhum outro tipo de arco pode ser traçado começando ou terminando em um PseudoBox. Isto é,

$F = (P \times A) \cup (A \times P)$ , como  $P = L \cup Mb \cup Pb$  e  $A = T \cup Ma$  então:

$$F = [(L \cup Mb \cup Pb) \times (T \cup Ma)] \cup [(T \cup Ma) \times (L \cup Mb \cup Pb)], \text{ assim:}$$

$$F = [(L \cup Mb \cup Pb) \times (T \cup Ma)] \cup [(T \cup Ma) \times (L \cup Mb)]$$

## 4.7 Representação Algébrica

### Definição 4.2 Representação Algébrica da Rede *GHENeSys*

A rede *GHENeSys* pode ser representada algebricamente por uma 5-tupla de matrizes  $(P, A^+, A^-, H^e, H^d)$  onde:

Se  $|A| = m$  e  $|P| = n$ , então:  $(A^+, A^-)$  são matrizes de ordem  $m \times (n - l)$ , sendo  $m$  o número de elementos ativos,  $n$  o número de elementos passivos e  $l$  o

número de PseudoBox presentes na rede;  $(H^e, H^d)$  são matrizes de ordem  $m \times l$ . As colunas destas matrizes relacionam os elementos passivos não PseudoBox com os elementos ativos da Rede.

A matriz  $A^+$  representa a contribuição de *tokens* aos lugares e/ou MacroBox depois de disparado um elemento ativo.

$$A^- = \begin{matrix} & P'_1 & P'_2 & \dots & P'_{n-l} \\ A_1 & \left[ \begin{array}{cccc} a_{1,1}^+ & a_{1,2}^+ & \dots & a_{1,n-l}^+ \\ a_{2,1}^+ & a_{2,2}^+ & \dots & a_{2,n-l}^+ \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1}^+ & a_{m,2}^+ & \dots & a_{m,n-l}^+ \end{array} \right. \end{matrix}$$

$$\text{Onde: } a_{i,j}^+ = \begin{cases} 1 & \text{se existe um arco entre } T_i \text{ e } P'_j \\ 0 & \text{de outro modo} \end{cases}$$

A matriz  $A^-$  representa a subtração de *tokens* aos lugares e/ou MacroBox depois de disparado um elemento ativo.

$$A^+ = \begin{matrix} & P'_1 & P'_2 & \dots & P'_{n-l} \\ A_1 & \left[ \begin{array}{cccc} a_{1,1}^- & a_{1,2}^- & \dots & a_{1,n-l}^- \\ a_{2,1}^- & a_{2,2}^- & \dots & a_{2,n-l}^- \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1}^- & a_{m,2}^- & \dots & a_{m,n-l}^- \end{array} \right. \end{matrix}$$

$$\text{onde: } a_{i,j}^- = \begin{cases} 1 & \text{se existe um arco entre } P'_j \text{ e } T_i \\ 0 & \text{de outro modo} \end{cases}$$

As matrizes  $H^e$  e  $H^d$  representam a conexão entre os elementos PseudoBox e os elementos ativos. O valor das entradas destas matrizes não representam fluxo de *tokens*, mas sim informação associada ao tipo de arco: Inibidor  $H^d$  ou habilitador ( $H^e$ )

$$H^e = \begin{matrix} & P_1^{pb} & P_2^{pb} & \dots & P_l^{pb} \\ T_1 & \left[ \begin{array}{cccc} h_{1,1}^e & h_{1,2}^e & \dots & h_{1,l}^e \\ h_{2,1}^e & h_{2,2}^e & \dots & h_{2,l}^e \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m,1}^e & h_{m,2}^e & \dots & h_{m,l}^e \end{array} \right. \end{matrix} \quad (4.1)$$

onde  $h_{i,j}^e = \begin{cases} 1 & \text{se existe um arco habilitador entre } P_j^{pb} \text{ e } T_i \\ 0 & \text{de outro modo} \end{cases}$

$$H^d = \begin{matrix} & P_1^{pb} & P_2^{pb} & \dots & P_l^{pb} \\ \begin{matrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^c & h_{1,2}^c & \dots & h_{1,l}^c \\ h_{2,1}^c & h_{2,2}^c & \dots & h_{2,l}^c \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m,1}^c & h_{m,2}^c & \dots & h_{m,l}^c \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4.2)$$

onde  $h_{i,j}^c = \begin{cases} -1 & \text{se existe un arco inibidor entre } P_j^{pb} \text{ e } T_i \\ 0 & \text{de outro modo} \end{cases}$

#### 4.7.1 Matriz de Incidência

A matriz de incidência da rede *GHENeSys*, simbolizada por  $A_g$ , é uma matriz estendida formada a partir de  $A^+$ ,  $A^-$ ,  $H^e$  y  $H^d$ :

$$A_g = \begin{matrix} & P'_1 & P'_2 & \dots & P'_{n-l} & P_{n-l+1}^{pb} & P_{n-l+2}^{pb} & \dots & P_n^{pb} \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,n-l} & h_{1,n-l+1} & h_{1,n-l+2} & \dots & h_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,n-l} & h_{2,n-l+1} & h_{2,n-l+2} & \dots & h_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1} & a_{m,2} & \dots & a_{m,n-l} & h_{m,n-l+1} & h_{m,n-l+2} & \dots & h_{m,n} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

onde:  $\begin{cases} P'_j & \text{Elemento passivo não PseudoBox na } j\text{-ésima coluna} \\ P_j^{pb} & \text{PseudoBox na } j\text{-ésima coluna} \\ h_{i,j} & h_{i,j}^e + h_{i,j}^c \end{cases}$

Por ser a rede *GHENeSys* uma rede hierarquica, além da rede principal, a cada elemento de refinamento hierarquico corresponde uma matriz de incidência e demais elementos da representação algébrica.

## 4.7.2 Efeito da Marcação dos PseudoBox no Fluxo de Marcas

Como foi expresso na tabela 4.1 os PseudoBox representam condições externas ao sistema e possuem marcação unitaria. Além disso é necessário considerar que na rede *GHENeSys* a marcação dos PseudoBox não tem efeito salvo no que se refere à habilitação das transições. Em seguida apresenta-se o procedimento matemático incorporado na equação de estado que garante este comportamento:

Seja  $D$  uma matriz diagonal de ordem  $n$ .

$$D = \begin{bmatrix} d_{1,1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_{2,2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & d_{n,n} \end{bmatrix} \quad \text{donde: } d_{i,i} = \begin{cases} 1 & \text{se } i \leq n-l \\ 0 & \text{de outro modo} \end{cases} \quad (4.3)$$

Examinando o produto de  $D \cdot A_g^T$  tem-se:

$$D \cdot A_g^T = \begin{bmatrix} d_{1,1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_{2,2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & d_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,m} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n-l,1} & a_{n-l,2} & \dots & a_{n-l,m} \\ b_{n-l+1,1} & b_{n-l+1,2} & \dots & b_{n-l+1,m} \\ b_{n-l+2,1} & b_{n-l+2,2} & \dots & b_{n-l+2,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{n,1} & b_{n,2} & \dots & b_{n,m} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} d_{1,1} \cdot a_{1,1} & d_{1,1} \cdot a_{1,2} & \dots & d_{1,1} \cdot a_{1,m} \\ d_{2,2} \cdot a_{2,1} & d_{2,2} \cdot a_{2,2} & \dots & d_{2,2} \cdot a_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ d_{n-l,n-l} \cdot a_{n-l,1} & d_{n-l,n-l} \cdot a_{n-l,2} & \dots & d_{n-l,n-l} \cdot a_{n-l,m} \\ d_{n-l+1,n-l+1} \cdot b_{n-l+1,1} & d_{n-l+1,n-l+1} \cdot b_{n-l+1,2} & \dots & d_{n-l+1,n-l+1} \cdot b_{n-l+1,m} \\ d_{n-l+2,n-l+2} \cdot b_{n-l+2,1} & d_{n-l+2,n-l+2} \cdot b_{n-l+2,2} & \dots & d_{n-l+2,n-l+2} \cdot b_{n-l+2,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{n,n} \cdot b_{n,1} & d_{n,n} \cdot b_{n,2} & \dots & d_{n,n} \cdot b_{n,m} \end{bmatrix}$$

$$D \cdot A_g^T = \begin{bmatrix} d_{1,1} \cdot a_{1,1} & d_{1,1} \cdot a_{1,2} & \dots & d_{1,1} \cdot a_{1,m} \\ d_{2,2} \cdot a_{2,1} & d_{2,2} \cdot a_{2,2} & \dots & d_{2,2} \cdot a_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{n-l,n-l} \cdot a_{n-l,1} & d_{n-l,n-l} \cdot a_{n-l,2} & \dots & d_{n-l,n-l} \cdot a_{n-l,m} \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

O produto  $D \cdot A_g^T$  na equação de estado, garante que não ocorra alteração na marcação dos PseudoBoxes da rede. As modificações na marcação dos PseudoBox se correspondem ao estado das condições externas do sistema que cada PseudoBox representa, e portanto, não podem estar sob o controle do sistema modelado.

### 4.7.3 Vetor de Capacidades

É um vetor  $C$  de ordem  $n$ , que guarda as capacidades dos lugares e dos Macrobox da rede:

$$C = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} \quad \text{onde: } c_j = \text{Capacidade do } j\text{-ésimo lugar} \quad (4.4)$$

### 4.7.4 Vetor de Marcação

O vetor de marcação da rede ordinária só considera a existência de lugares, enquanto que a rede *GHENeSys* possui elementos passivos que envolvem tanto os elementos internos da rede (lugares e MacroBox) como aqueles que representam as condições de fronteira: os PseudoBox. Assim, é preciso fazer a seguinte distinção com o vetor de marcação  $U$ :

$$U = U' + U^{pb} \quad (4.5)$$

$$\text{onde: } \begin{cases} U' & \text{Marcação dos elementos passivos não-PseudoBox} \\ U^{pb} & \text{Marcação dos PseudoBox} \end{cases}$$

De forma estendida:



$$U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u'_1 \\ \vdots \\ u'_{n-l} \\ 0_{n-l+1} \\ \vdots \\ 0_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_1 \\ \vdots \\ 0_{n-l} \\ u_{n-l+1}^{pb} \\ \vdots \\ u_n^{pb} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$U$  é um vetor de ordem  $n$  que guarda a marcação dos elementos passivos no  $k$ -ésimo ciclo de simulação, conforme o modo de execução seja por rede associada ou como acumulador de marcas por alguns ciclos de tempo.

$$U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} \quad \text{onde: } u_j = \text{Quantidade de } tokens \text{ presentes no } j\text{-ésimo lugar} \quad (4.7)$$

#### 4.7.5 Vetor de Habilitação

O cálculo do vetor de habilitação da rede *GHENeSys* leva em conta a marcação devido à quantidade de marcas nos elementos de entrada e saída dos elementos ativos, além da contribuição dos elementos de que representam as condições de fronteira (PseudoBox) através dos arcos habilitadores e inibidores.

##### 4.7.5.1 Habilitação por Marcação

O cálculo da habilitação das transições é feito da mesma forma que em 3.5, porém o cálculo da habilitação de cada transição só se aplica à parte não estendida da matriz. Isto é:

$$\mu \geq (e[j] \cdot A^-)^T \quad \text{com: } j \in [1, n-l] \quad (4.8)$$

O cálculo da habilitação das MacroAtividades realiza-se mediante uma mensagem que traduz-se em uma consulta sobre o estado interno do elemento.

#### 4.7.5.2 Efeito dos arcos Habilitadores e Inibidores

Tendo o vetor de habilitação  $H$ , procede-se ao cálculo do efeito dos arcos habilitadores e inibidores. O resultado da presença destes arcos sobre o estado de habilitação das transições do sistema está relacionando com a marcação dos PseudoBox. Para relacionar a marcação dos PseudoBoxes e determinar o efeito dos arcos habilitadores e inibidores constroi-se uma matriz diagonal  $T$  de ordem igual à quantidade de PseudoBox  $l$ , onde as entradas são os valores de marcação dos PseudoBox:

$$T_k = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & \dots & l \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ l \end{matrix} & \begin{bmatrix} t_{1,1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & t_{2,2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & t_{l,l} \end{bmatrix} \end{matrix}_k$$

No caso dos arcos inibidores a relação é estabelecida mediante o produto de  $H^d$  e  $T_k$ , isto é:

$$\begin{aligned} H^d \cdot T_k &= \begin{bmatrix} h_{1,1}^d & h_{1,2}^d & \dots & h_{1,n}^d \\ h_{2,1}^d & h_{2,2}^d & \dots & h_{2,n}^d \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m,1}^d & h_{m,2}^d & \dots & h_{m,n}^d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{1,1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & t_{2,2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & t_{n,n} \end{bmatrix}_k \\ &= \begin{bmatrix} h_{1,1}^d \cdot (t_{1,1})_k & h_{1,2}^d \cdot (t_{2,2})_k & \dots & h_{1,n}^d \cdot (t_{n,n})_k \\ h_{2,1}^d \cdot (t_{1,1})_k & h_{2,2}^d \cdot (t_{2,2})_k & \dots & h_{2,n}^d \cdot (t_{n,n})_k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m,1}^d \cdot (t_{1,1})_k & h_{m,2}^d \cdot (t_{2,2})_k & \dots & h_{m,n}^d \cdot (t_{n,n})_k \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Assim é possível calcular o efeito total para cada habilitação através da somatória de cada fila da matriz anterior.

$$\begin{bmatrix} h_{1,1}^d \cdot (t_{1,1})_k & h_{1,2}^d \cdot (t_{2,2})_k & \dots & h_{1,n}^d \cdot (t_{n,n})_k \\ h_{2,1}^d \cdot (t_{1,1})_k & h_{2,2}^d \cdot (t_{2,2})_k & \dots & h_{2,n}^d \cdot (t_{n,n})_k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m,1}^d \cdot (t_{1,1})_k & h_{m,2}^d \cdot (t_{2,2})_k & \dots & h_{m,n}^d \cdot (t_{n,n})_k \end{bmatrix} \ddots \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n h_{1,j}^d \cdot (t_{j,j})_k \\ \sum_{j=1}^n h_{2,j}^d \cdot (t_{j,j})_k \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^n h_{m,j}^d \cdot (t_{j,j})_k \end{bmatrix}$$

O resultado do efeito dos arcos inabilitadores no estado de habilitação das transições é representado pelo vetor  $H^-$ :

$$(H^-)_k = \begin{bmatrix} h_1^- \\ h_2^- \\ \vdots \\ h_m^- \end{bmatrix}_k \quad \text{onde:} \quad (h_i^d)_k = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n (h_{1,j}^d \cdot t_{j,j}) \\ \sum_{j=1}^n (h_{2,j}^d \cdot t_{j,j}) \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^n (h_{m,j}^d \cdot t_{j,j}) \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Para o cálculo do efeito da existência de arcos habilitadores é preciso considerar que a marcação dos PseudoBox afeta de forma diferente o estado de habilitação das transições. Assim, a presença ou ausência de *tokens* produz o efeito oposto. A relação entre a marcação dos PseudoBoxes e a existência dos arcos inibidores está dada pelo produto de  $H^e$  pela matriz resultante da subtração da matriz identidade de  $T_k$ :

$$H^e \cdot (T_k - I) = \begin{bmatrix} h_{1,1}^e & h_{1,2}^e & \dots & h_{1,n}^e \\ h_{2,1}^e & h_{2,2}^e & \dots & h_{2,n}^e \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m,1}^e & h_{m,2}^e & \dots & h_{m,n}^e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{1,1} - 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & t_{2,2} - 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & t_{n,n} - 1 \end{bmatrix}_k$$

$$H^e \cdot (T_k - I) = \begin{bmatrix} h_{1,1}^e \cdot (t_{1,1} - 1) & h_{1,2}^e \cdot (t_{2,2} - 1) & \dots & h_{1,n}^e \cdot (t_{n,n} - 1) \\ h_{2,1}^e \cdot (t_{1,1} - 1) & h_{2,2}^e \cdot (t_{2,2} - 1) & \dots & h_{2,n}^e \cdot (t_{n,n} - 1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m,1}^e \cdot (t_{1,1} - 1) & h_{m,2}^e \cdot (t_{2,2} - 1) & \dots & h_{m,n}^e \cdot (t_{n,n} - 1) \end{bmatrix}$$

Estabelecida esta relação é possível calcular o efeito total para cada habilitação que é obtido através da somatória de cada fila na matriz anterior.

$$\begin{bmatrix} h_{1,1}^e \cdot (t_{1,1} - 1) & h_{1,2}^e \cdot (t_{2,2} - 1) & \dots & h_{1,n}^e \cdot (t_{n,n} - 1) \\ h_{2,1}^e \cdot (t_{1,1} - 1) & h_{2,2}^e \cdot (t_{2,2} - 1) & \dots & h_{2,n}^e \cdot (t_{n,n} - 1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m,1}^e \cdot (t_{1,1} - 1) & h_{m,2}^e \cdot (t_{2,2} - 1) & \dots & h_{m,n}^e \cdot (t_{n,n} - 1) \end{bmatrix}$$

$$\therefore \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n h_{1,j}^e \cdot ((t_{j,j})_k - 1) \\ \sum_{j=1}^n h_{2,j}^e \cdot ((t_{j,j})_k - 1) \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^n h_{m,j}^e \cdot ((t_{j,j})_k - 1) \end{bmatrix}$$

Assim, o resultado do efeito dos arcos habilitadores é representado pelo vetor  $H^+$ :

$$(H^+)_k = \begin{bmatrix} h_1^+ \\ h_2^+ \\ \vdots \\ h_m^+ \end{bmatrix}_k \quad \text{onde:} \quad (h_i^e)_k = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n h_{1,j}^e \cdot ((t_{j,j})_k - 1) \\ \sum_{j=1}^n h_{2,j}^e \cdot ((t_{j,j})_k - 1) \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^n h_{m,j}^e \cdot ((t_{j,j})_k - 1) \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

O efeito geral dos arcos inibidores e habilitadores presentes na rede sobre o vetor de Habilitação  $H$  é dado por:

$$H'_k = \begin{bmatrix} h'_1 \\ h'_2 \\ \vdots \\ h'_m \end{bmatrix}_k \quad \text{onde:} \quad (h'_i)_k = \begin{cases} 1 & \text{se } (h_i)_k + (h_i^d)_k + (h_i^e)_k > 0 \\ 0 & \text{de outro modo} \end{cases} \quad (4.11)$$

#### 4.7.6 Equação de Estado

Aplica-se a equação de estado da *GHENeSys* a cada um dos elementos hierárquicos além da rede principal. É uma equação linear semelhante à da rede elementar por tanto o cálculo das propriedades das redes pode ser será feito de forma análoga à da rede clássica.

$$U_{k+1} = U_k + (D \cdot A_g^T) \cdot (F'_k) \quad (4.12)$$

Onde  $(F'_k) \leq (H'_k)$

#### 4.7.7 Detecção de Conflitos

Realiza-se a detecção de Conflitos seguindo as mesmas considerações e procedimentos apresentados em 3.1.1.6, porém esta só se aplica às marcações geradas a partir do vetor de marcação dos elementos passivos não PseudoBox. Assim o

vetor de simulação de disparo em uma rede *GHENeSys* é calculado mediante a equação 4.13.

$$U_{k+1}^s = U_k + (D \cdot A_g^T) \cdot (H_k') \quad (4.13)$$

Partindo do vetor de simulação de disparo  $U_{k+1}^s$  e do vetor de capacidades  $C$  calcula-se o vetor de marcação do conflito  $U_{k+1}^c$ , isto é:

$$U_{k+1}^c = \begin{bmatrix} u_1^c \\ u_2^c \\ \vdots \\ u_{n-l}^c \end{bmatrix} \quad \text{onde:} \quad (u_j^c)_k = \begin{cases} -1 & \text{se } (u_j^s)_k < 0 \\ 1 & \text{se } (u_j^s)_k > c_j \\ 0 & \text{de outro modo} \end{cases} \quad (4.14)$$

Uma entrada diferente de zero (0) na  $j$ -ésima posição do vetor de marcação de conflito implica que na coluna correspondente da matriz  $A^-$ , encontram-se presentes transições que apresentam um conflito. Se a entrada é negativa (-1) o conflito que apresentam é do tipo *preset*, se a entrada é positiva (1) o conflito é de tipo *postset*.

#### 4.7.8 Cálculo de Efeito de Mensagens nos PseudoBox

O efeito da ocorrência de mensagens na rede é refletido na marcação dos PseudoBoxes das outras redes que compõem o projeto, isto é, um mensagem não pode ter *ligação* com algum PseudoBox na mesma rede, porem pode ser associado a múltiplos PseudoBoxes.

O fluxo de mensagens é considerado instantâneo, portanto um mensagem afeita de maneira imediata os PseudoBoxes associados, mas não deve considerarse um fluxo de *tokens* porem uma mudança nas condições de fronteira da do subsistema representado por a rede. O fator de efeito dos mensagens na marcação dos PseudoBox ( $F_m$ ) e apresentada na equação 4.15

$$\text{Seja } M_k = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_n \end{bmatrix} \quad \rightarrow \quad F_m(\text{PseudoBox})_n = \begin{cases} 0 & \text{se } M_k < 1 \\ 1 & \text{de outro modo} \end{cases} \quad (4.15)$$

Onde  $M_k$  é o vetor que contem a ocorrência dos mensagens associados ao  $n$ -ésimo PseudoBox do Projeto. Um valor de um (1) na  $i$ -ésima entrada do vetor significa que o mensagem correspondente foi gerado, pelo contrário a entrada tem valor zero (0). O efeito do fator  $F_m$  na marcação dos PseudoBox é apresentada na tabela 4.2.

Estado Inicial da Marcação	valor de $F_m$	Estado Final da Marcação
0	1	1
1	0	1
1	1	1
0	0	0

Tabela 4.2: Efeito do Fluxo de mensagens nos PseudoBox

#### 4.7.9 Dinâmica da Rede

A dinâmica da Rede ghenesys é apresentado na figura 4.6, note se que este algoritmo aplica-se a todos as Redes associadas aos MacroElementos do sistema. O Algoritmo detalhado da execução da rede *GHENeSys* é apresentado nas seções 5.5.1 e 5.5.2.

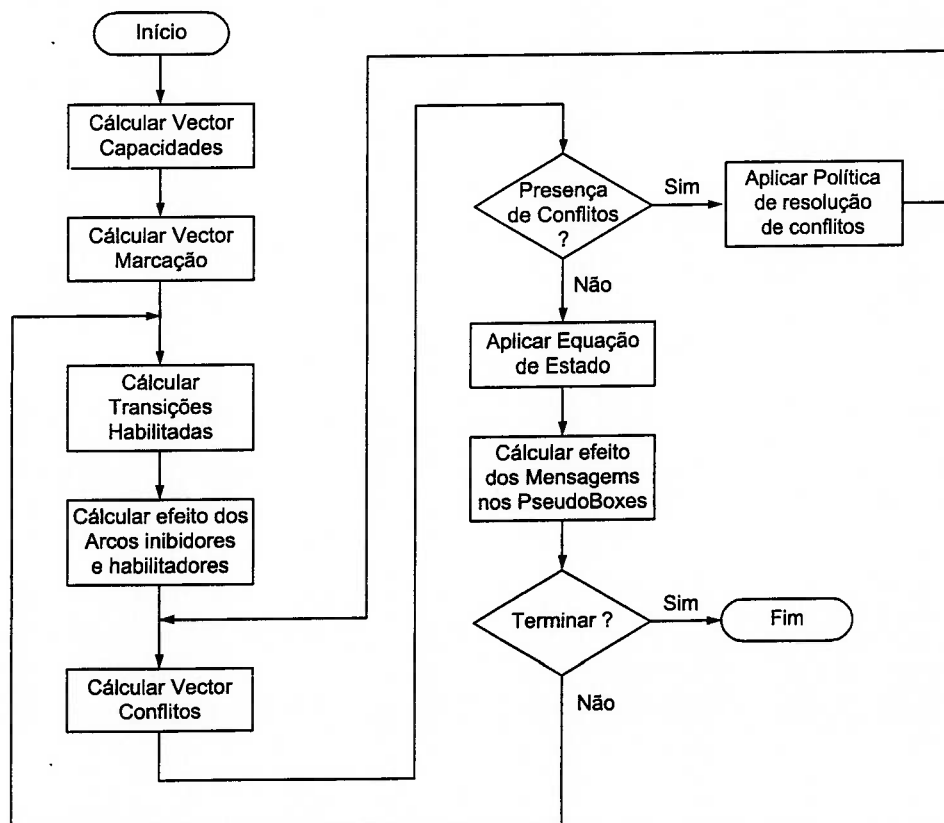


Figura 4.6: Algoritmo da Dinâmica de uma Rede *GHENeSys*

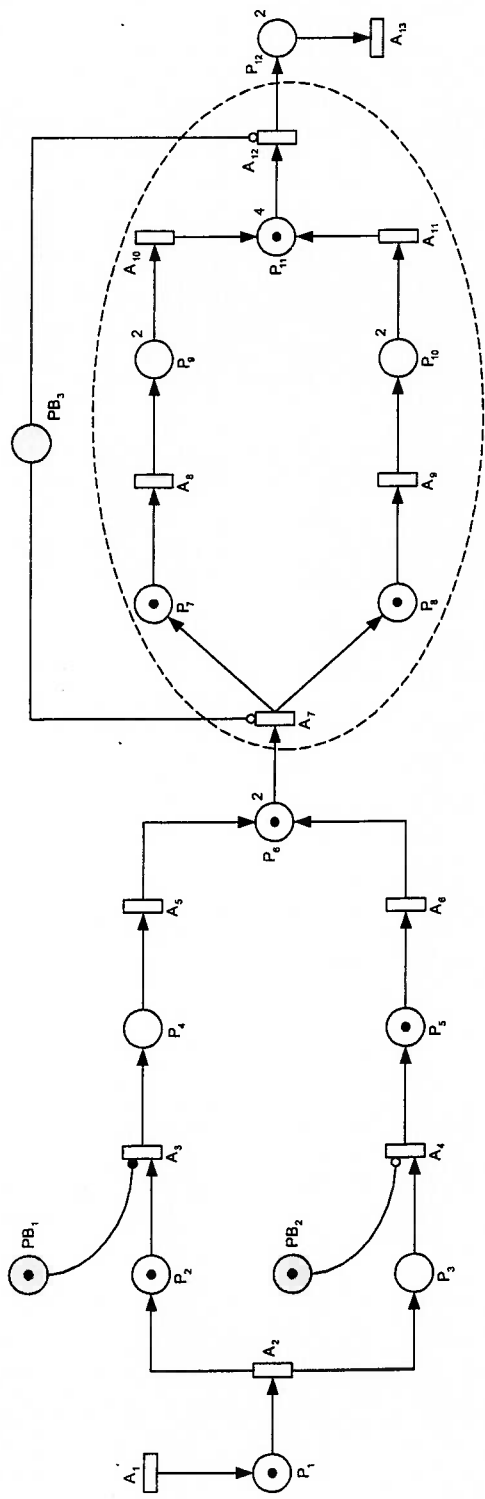
## 4.8 Exemplo de Abstração

Para ilustrar o potencial da hierarquia e o seu uso prático na rede *GHENeSys* utiliza-se o exemplo apresentado na figura 4.7. As matrizes do sistema são apresentadas a seguir:

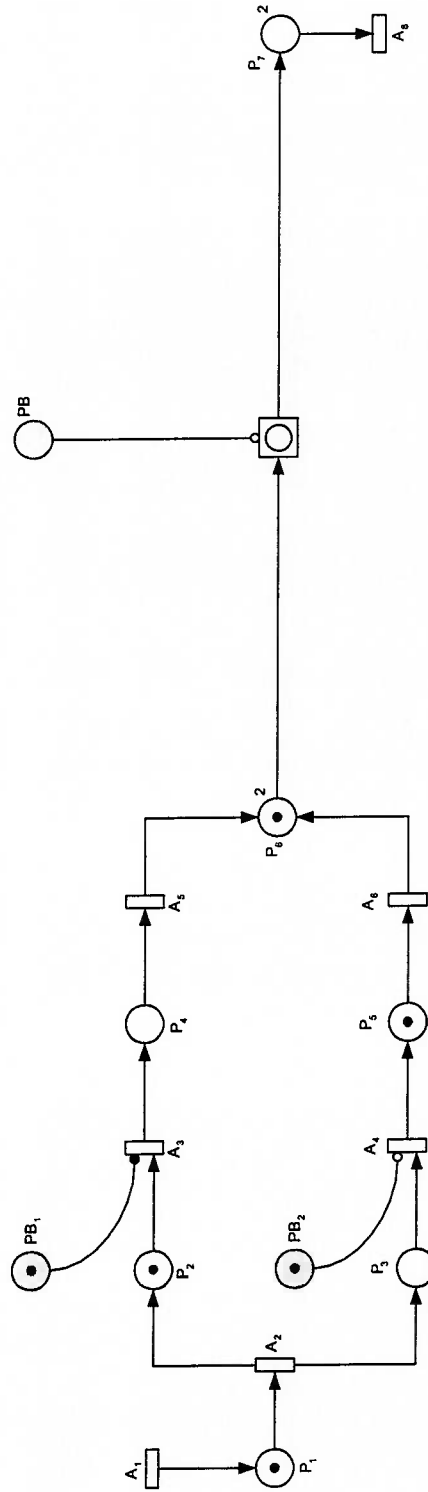
$$A = \begin{matrix} & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 & P_7 & P_8 & P_9 & P_{10} & P_{11} & P_{12} \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_9 \\ A_{10} \\ A_{11} \\ A_{12} \\ A_{13} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$H^e = \begin{matrix} & P_1 & P_2 & P_3 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_8 \\ A_9 \\ A_{10} \\ A_{11} \\ A_{12} \\ A_{13} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$H^d = \begin{matrix} & P_1 & P_2 & P_3 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_8 \\ A_9 \\ A_{10} \\ A_{11} \\ A_{12} \\ A_{13} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$



(a) Sistema com a Seleção dos Elementos Encapsular



(b) Resultado do Encapsulamento

Figura 4.7: Exemplo de Abstração e Encapsulamento



$$A_g = \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_9 \\ A_{10} \\ A_{11} \\ A_{12} \\ A_{13} \end{array} \begin{array}{c} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \\ P_8 \\ P_9 \\ P_{10} \\ P_{11} \\ P_{12} \\ P_1^{pb} \\ P_2^{pb} \\ P_3^{pb} \end{array} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

O sistema pode ser transformado no sistema equivalente apresentado na figura 4.8 onde 4.8(b) é a rede associada à MacroAtividade  $MA_1$  da 4.8(a). As matrizes de estado destas redes se apresentam a seguir:

$$A^+ = \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_8 \end{array} \begin{array}{c} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \end{array} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A^- = \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_8 \end{array} \begin{array}{c} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \end{array} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

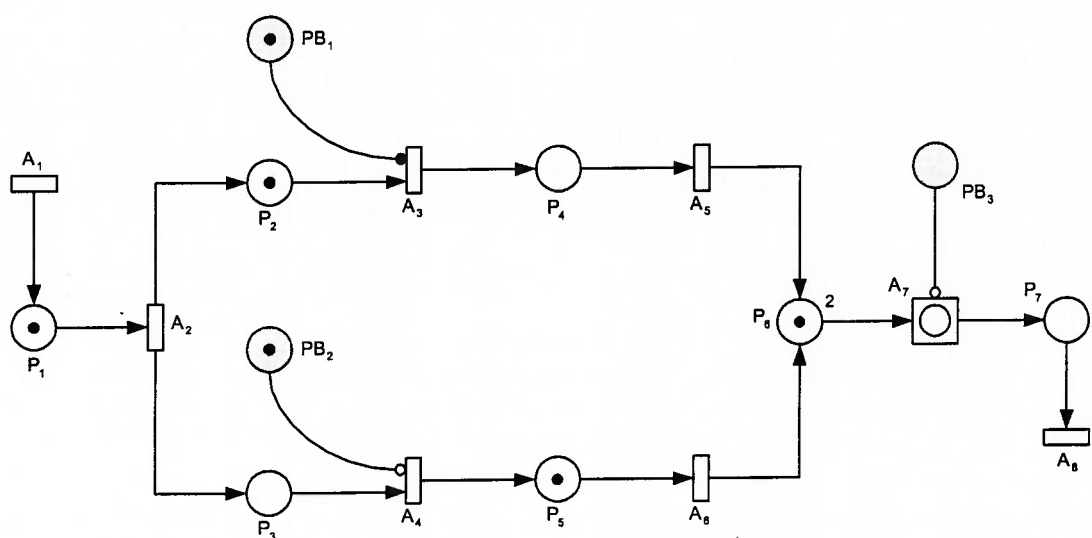
$$H^e = \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_8 \end{array} \begin{array}{c} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{array} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$H^d = \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_8 \end{array} \begin{array}{c} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{array} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

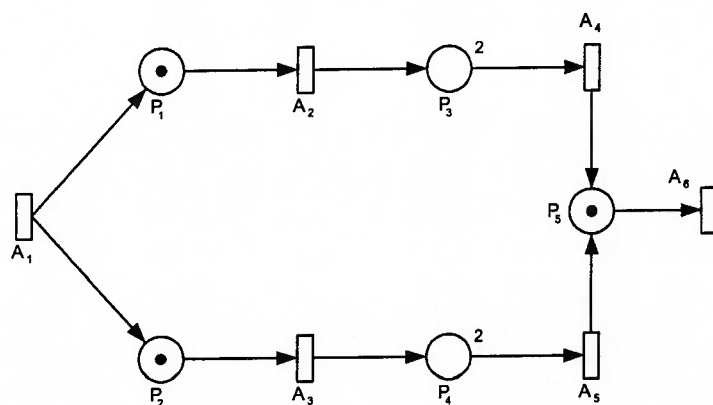
Assim a matriz de incidência de 4.8(a) é:

$$A_g = \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_8 \end{array} \begin{array}{c} P'_1 \\ P'_2 \\ P'_3 \\ P'_4 \\ P'_5 \\ P'_6 \\ P'_7 \end{array} \begin{array}{c} P''_1 \\ P''_2 \\ P''_3 \\ P''_4 \\ P''_5 \\ P''_6 \\ P''_7 \end{array} \begin{array}{c} P'''_1 \\ P'''_2 \\ P'''_3 \\ P'''_4 \\ P'''_5 \\ P'''_6 \\ P'''_7 \end{array} \begin{array}{c} P^{pb}_8 \\ P^{pb}_9 \\ P^{pb}_{10} \end{array} \left[ \begin{array}{ccccccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]$$

As matrizes de estado da Subrede encapsulada (figura 4.8(b)) são:



(a) Rede Principal



(b) Subrede associada a MacroAtividade

Figura 4.8: Subrede Encapsulada em uma MacroAtividade

$$A^+ = \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \end{array} \begin{array}{c} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{array} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad A^- = \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \end{array} \begin{array}{c} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{array} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Assim a matriz de incidência da Subrede encapsulada (figura 4.8(b)) é dada por:

$$A_g = \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \end{array} \begin{array}{c} P'_1 \\ P'_2 \\ P'_3 \\ P'_4 \\ P'_5 \end{array} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Uma consideração final deve ser levada em conta: no caso que a MacroAtividade  $MA_1$  não apresente *marcação consistente* o sistema representado é o da figura 4.9. Neste caso somente é limitado o ingresso de *tokens* à MacroAtividade, mas é permitida a saída dos mesmos. A matriz de incidência é então dada pela matriz seguinte:

$$A_g = \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_9 \\ A_{10} \\ A_{11} \\ A_{12} \\ A_{13} \end{array} \begin{array}{c} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \\ P_8 \\ P_9 \\ P_{10} \\ P_{11} \\ P_{12} \\ P_1^{pb} \\ P_2^{pb} \\ P_3^{pb} \end{array} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

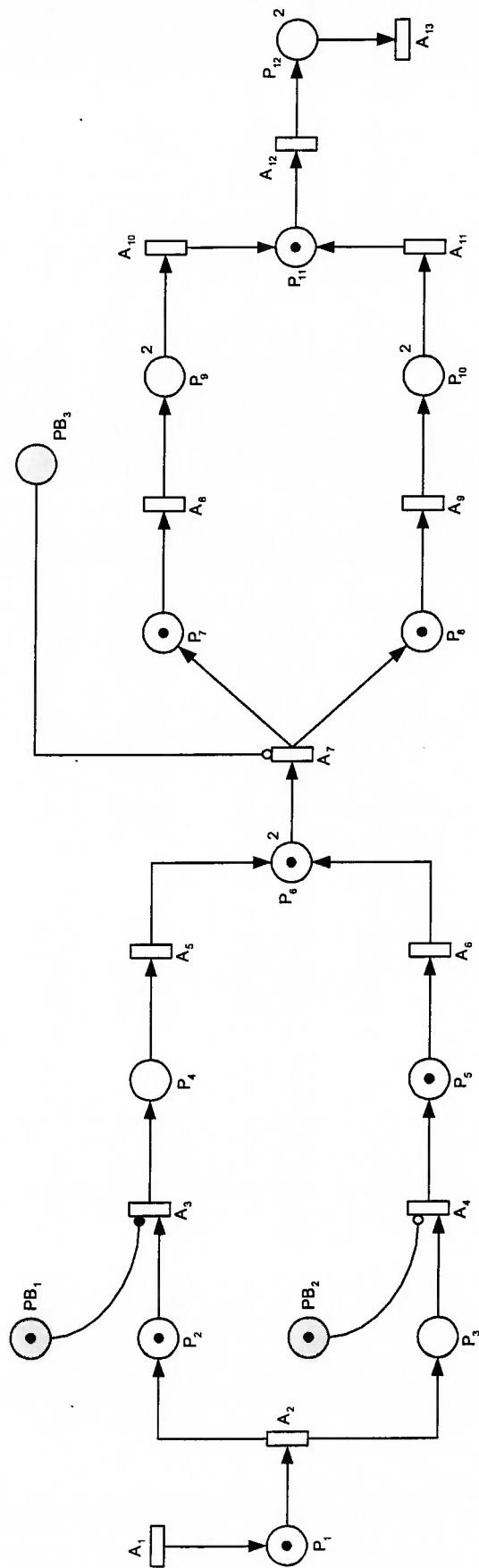


Figura 4.9: Abstração na Rede sem Marcação Consistente

## 4.9 Modelagem e Projeto de Sistemas com a Rede *GHENeSys*

O método proposto para o projeto de sistemas com a rede *GHENESYS* é apresentada na figura 4.10, onde:

- **Identificação do Sistema:** Envolve a identificação do sistema, delimitação das condições de fronteira e das funções que se espera que o sistema realize.
- **Análise Orientada a Objetos:** É a identificação das entidades conceituais cuja posterior interação representa o comportamento do sistema, é dizer involucra a identificação dos objetos mediante (AOO). (ver seção 3.2.2).
- **Construção dos Modelos dos Objetos:** Cada um dos objetos identificados na etapa anterior e modelado utilizando a rede *GHENeSys*
- **Encapsulamento:** As redes se encapsulam em MacroElementos constituindo classes. Assim, os objetos que compõem o sistema são representados por instâncias destes MacroElementos, as conexões dos MacroElementos entre si e com os demais elementos representam o fluxo de mensagens em um nível hierarquico do sistema.
- **Construção da Árvore de hierarquia:** Os diferentes níveis hierarquicos são integrados de acordo ao nível de abstração, constituindo o árvore de hierarquia.

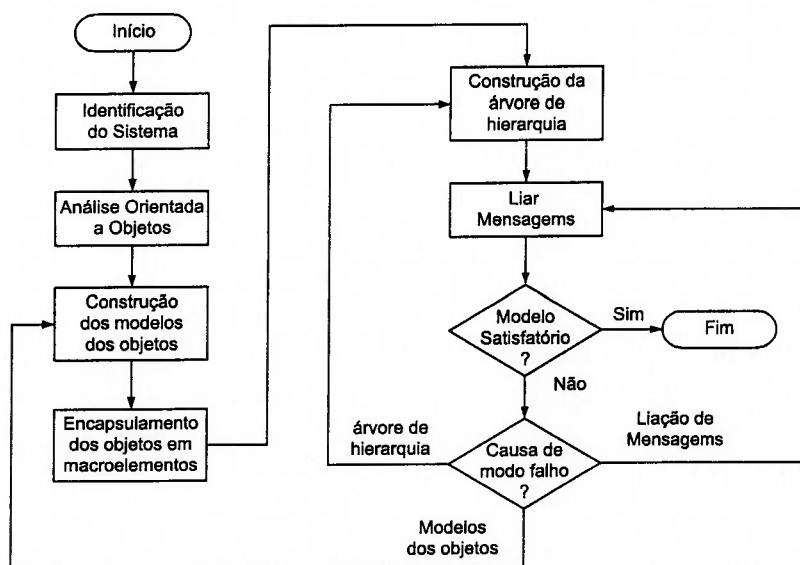


Figura 4.10: Método de Projeto de Sistemas com a Rede *GHENeSys*

## 5. *GHENESYS*: O SISTEMA COMPUTACIONAL

Para desenvolver aplicações práticas com Redes de Petri é preciso utilizar ambiente de Software [Murata, 1989]. No momento não existe uma ferramenta computacional específica para a construção e execução de redes do tipo *GHENeSys*, portanto se procederá ao levantamento de requisitos que permitam identificar as características necessárias e desejáveis de um ambiente de software que implemente a proposta apresentada na seção 4, e que reúna ademais as particularidades comuns às ferramentas existentes para o estudo das redes de Petri. Trata-se de fato de um ambiente de projeto baseado em Redes de Petri Orientadas a Objetos onde se destaca o papel da hierarquia. O Nome escolhido para o software é *GHENESYS*.

### 5.1 Características Gerais

Utilizou-se como referência o site do *DAIMI*<sup>1</sup>, considerado como representativo da área, para o levantamento das características gerais dos sistemas e ambientes de modelagem em Redes de Petri existentes. As principais características dos 51 sistemas de desenvolvimento cadastrados são apresentadas na tabela 5.1. As propriedades comuns observadas são:

1. Editor Gráfico
2. Jogador de Marcas
3. Cálculo de Invariantes de Lugar e de Transição

A tabela 5.1 apresenta uma discriminação dos sistemas que apresentam propriedades similares as características desejadas para a ferramenta computacional *GHENESYS*.

---

<sup>1</sup><http://www.daimi.au.dk/PetriNets/>, repositório de redes de Petri do departamento de Ciência da Computação da Universidade de Aarhus, visitada em Novembro 25 do 2003

No.	Nome do Software	Tipos de Redes Suportadas	Características	Sistema Operacional	Licença	Página Web
1	ALPHA/Sim	Alto Nível Com Tempo	Editor Gráfico Jogador de Marcas Simulação Rápida Ana. de desempenho simples	SunOS Solaris Windows	Comercial	<a href="http://www.alphatech.com/secondary/techpro/alphasim/alphasim.html">http://www.alphatech.com/secondary/techpro/alphasim/alphasim.html</a>
2	ARP	Lugar/Transição Com Tempo	Simulação Rápida Espaço de estados Invariantes de Lugar Invariantes de Transição Análise estrutural Ana. de desempenho simples	MS DOS	Gratuito	<a href="http://www.ppgia.pucpr.br/~maziero/Petri/">http://www.ppgia.pucpr.br/~maziero/Petri/</a>
3	Artifex	Orientada a Objetos Alto Nível Lugar/Transição Com Tempo	Editor Gráfico Jogador de Marcas Simulação Rápida Análise estrutural Ana. de desempenho avançado	Sun, SunOS HP-Unix S.G. IRIX Linux Windows	Comercial (Desconto acadêmico)	<a href="http://www.rsoftdesign.com/">http://www.rsoftdesign.com/</a>
4	CoopnTools	Alto Nível	Editor Gráfico Simulação Rápida Análise estrutural	Java	Gratuito	<a href="http://lg www.epfl.ch/Conform">http://lg www.epfl.ch/Conform</a>
5	CPN-AMI	Alto Nível Lugar/Transição	Editor Gráfico Simulação Rápida Espaço de estados Invariantes de Lugar Invariantes de Transição Análise estrutural Modelagem Modular	Sun Linux Macintosh	Gratuito	<a href="http://www.lip6.fr/cpn-ami">http://www.lip6.fr/cpn-ami</a>
6	CPN-AMI	Alto Nível Com Tempo	Editor Gráfico Jogador de Marcas Simulação Rápida	Windows	Gratuito	<a href="http://www.daimi.au.dk/CPNtools/">http://www.daimi.au.dk/CPNtools/</a>

7	<b>Design/CPN</b>	Alto Nível Com Tempo	Invariantes de Lugar Espaço de estados Ana. de desempenho simples Formato de intercambio de arquivos	Editor Gráfico Jogador de Marcas Simulação Rápida Invariantes de Lugar Espaço de estados Ana. de desempenho simples Formato de intercambio de arquivos	Windows HP Irix Linux	Gratuito	<a href="http://www.daimi.au.dk/designCPN/">http://www.daimi.au.dk/ designCPN/</a>
8	<b>DPN Schematic</b>	Lugar/Transição Com Tempo D-extended PN	Editor Gráfico Simulação Rápida Ferramenta esquemática	Editor Gráfico Simulação Rápida Ferramenta esquemática	Windows	Gratuito	<a href="http://www.petrifool.narod.ru/">http://www.petrifool.narod.ru/</a>
9	<b>EDS Petri Net Tool</b>	Lugar/Transição Stochastic Petri Nets Com Tempo Coloridas	Editor Gráfico Jogador de Marcas Simulação Rápida Análise estrutural Ana. de desempenho simples Formato de intercambio de arquivos Linguagem de programação	Editor Gráfico Jogador de Marcas Simulação Rápida Análise estrutural Ana. de desempenho simples Formato de intercambio de arquivos Linguagem de programação	Windows	Comercial (Desconto acadêmico)	
10	<b>ExSpect</b>	Alto Nível Lugar/Transição Stochastic Petri Nets Com Tempo Modelagem Hierarquico	Editor Gráfico Jogador de Marcas Simulação Rápida Análise estrutural Ana. de desempenho simples Ana. de desempenho avançado	Editor Gráfico Jogador de Marcas Simulação Rápida Análise estrutural Ana. de desempenho simples Ana. de desempenho avançado	Windows	Comercial (Desconto acadêmico)	<a href="http://www.exspect.com/">http://www.exspect.com/</a>
11	<b>F-net</b>	Stochastic Petri Nets	Editor Gráfico	Editor Gráfico	Windows	Comercial	<a href="http://www.fi.ru/os/">http://www.fi.ru/os/</a>



	Com Tempo	Jogador de Marcas Simulação Rápida Espaço de estados Invariantes de Lugar Invariantes de Transição Análise estrutural Ana. de desempenho simples Ana. de desempenho avançado	OS/2	(Desconto acadêmico)	petri.php3
12	Alto Nível Lugar/Transição	Desenho Automatico	Sun Linux Windows	Comercial (Gratuito acadêmico)	<a href="http://www.dia.uniroma3.it/~gdt/">http://www.dia.uniroma3.it/~gdt/</a>
13	Alto Nível Stochastic Petri Nets Com Tempo	Editor Gráfico Jogador de Marcas Simulação Rápida Espaço de estados Esp. de est. Condensados Invariantes de Lugar Invariantes de Transição Análise estrutural Ana. de desempenho avançado	Sun Linux	Comercial (Desconto acadêmico)	<a href="http://www.di.unito.it/~greatspn/">http://www.di.unito.it/~greatspn/</a>
14	Alto Nível Stochastic Petri Nets Com Tempo	Editor Gráfico Jogador de Marcas Simulação Rápida Espaço de estados Invariantes de Lugar Invariantes de Transição Análise estrutural Formato de intercambio de arquivos	Sun	Gratuito	<a href="http://ls4-www.informatik.uni-dortmund.de/QPN/">http://ls4-www.informatik.uni-dortmund.de/QPN/</a>
15	Lugar/Transição Stochastic Petri Nets	Editor Gráfico Jogador de Marcas	Windows	Gratuito	<a href="http://www.winpessim.de/">http://www.winpessim.de/</a>

16	<b>INA</b>	Com Tempo Alto Nível Lugar/Transição Com Tempo	Simulação Rápida Ana. de desempenho simples Espaço de estados Esp. de est. Condensados Invariantes de Lugar Invariantes de Lugar Net Reductions Análise estrutural Análise de desempenho Simples e Avançado Formato de intercambio de arquivos	Sun Linux Windows	Gratuito	<a href="http://www.informatik.hu-berlin.de/~sstarke/ina.html">http://www.informatik.hu-berlin.de/~sstarke/ina.html</a>
17	<b>INCOME Process Designer</b>	Alto Nível Lugar/Transição Com Tempo	Editor Gráfico Jogador de Marcas Simulação Rápida	Sun OS HP-Unix Linux Windows Java	Comercial (Desconto acadêmico)	<a href="http://www.get-process.com/">http://www.get-process.com/</a>
18	<b>JARP</b>	Lugar/Transição	Editor Gráfico Jogador de Marcas Espaço de estados	Java	Gratuito	<a href="http://jarp.sf.net/">http://jarp.sf.net/</a>
19	<b>JFern</b>	Orientada a Objetos Alto Nível Lugar/Transição Com Tempo	Editor Gráfico Jogador de Marcas Simulação Rápida Espaço de estados Ana. de desempenho simples Formato de intercambio de arquivos	Java	Gratuito	<a href="http://sourceforge.net/projects/jfern">http://sourceforge.net/projects/jfern</a>
20	<b>Maria</b>	Alto Nível Lugar/Transição Redes Modulares de Alto Nível	Jogador de Marcas Simulação Rápida Espaço de estados Espaço de estados Modular	Sun OS Unix Linux Windows	Gratuito	<a href="http://www.tcs.hut.fi/Software/maria/">http://www.tcs.hut.fi/Software/maria/</a>

		Redes Etiquetadas Sistemas de transição	Verificação de modelos LTL	Mac OS		
21	<b>Marigold</b>	Lugar/Transição Construtor de fluxo de dados	Editor Gráfico	Java	Gratuito	<a href="http://www-users.cs.york.ac.uk/~jwillians/VE_Research.html">http://www-users.cs.york.ac.uk/~jwillians/VE_Research.html</a>
22	<b>MISS-RdP</b>	Alto Nível Lugar/Transição Stochastic Petri Nets Com Tempo Modelos Híbridos	Editor Gráfico Jogador de Marcas Simulação Rápida Análise de desempenho Avançado	Sun Windows	Comercial (Desconto acadêmico)	<a href="http://www.ixi.fr/tools/pages/miss/fr_0.htm">http://www.ixi.fr/tools/pages/miss/fr_0.htm</a>
23	<b>The Model Checking Kit</b>	Alto Nível Lugar/Transição	Espaço de estados Esp. de est. Condensados Verificação de modelos CTL-/LTL Verificação de <i>Deadlock</i> Verificação de Alcançabilidade	Sun Linux	Gratuito	<a href="http://wwwbrauer.in.tum.de/gruppen/theorie/KIT/">http://wwwbrauer.in.tum.de/gruppen/theorie/KIT/</a>
24	<b>Nevod Arcos inibidores</b>	Redes de Petri com Jogador de Marcas Simulação Rápida	Editor Gráfico	MS DOS	Comercial	<a href="http://geocities.com/zsoftua">http://geocities.com/zsoftua</a>
25	<b>Opera</b>	Com Tempo	Editor Gráfico Jogador de Marcas Simulação Rápida Espaço de estados Esp. Est. Condensados Invariantes de Lugar Invariantes de Transição Reduções nas Redes Análise estrutural Análise de desempenho Simples e Avançado Formato de intercambio	MS DOS	Comercial	<a href="http://geocities.com/zsoftua">http://geocities.com/zsoftua</a>

			de arquivos	Windows	Comercial (Desconto acadêmico)	
26	<b>PACE</b>	Alto Nível Lugar/Transição Stochastic Petri Nets Com Tempo Redes de Petri com Atributos	Editor Gráfico Jogador de Marcas Simulação Rápida Reduções nas Redes Lógica Borrosa Otimizações na Rede		Comercial (Desconto acadêmico)	<a href="http://www.ibepace.com/">http://www.ibepace.com/</a>
27	<b>PED</b>	Lugar/Transição Com Tempo	Editor Gráfico	Sun Linux	Gratuito	<a href="http://www.dssz.informatik.tu-cottbus.de/~wwwdssz/">http://www.dssz.informatik.tu-cottbus.de/~wwwdssz/</a>
28	<b>PEP</b>	Alto Nível Lugar/Transição Com Tempo	Editor Gráfico Jogador de Marcas Espaço de estados Esp. Est. Condensados Invariantes de Lugar Invariantes de Transição Reduções nas Redes Análise estrutural Verificação dos Modelos Gerador de Redes Formato de intercambio de arquivos	Sun	Gratuito	<a href="http://parsys.informatik.uni-oldenburg.de/~pep">http://parsys.informatik.uni-oldenburg.de/~pep</a>
29	<b>Petrigen</b>	Lugar/Transição	Editor Gráfico Jogador de Marcas Síntese	Linux Windows	Gratuito	<a href="http://www.ec-lille.fr/tomnab">http://www.ec-lille.fr/tomnab</a>
30	<b>Petri Net Kernel</b>	Alto Nível Lugar/Transição Redes tipo <i>DAWNU</i> definidas pelo usuário	Editor Gráfico Jogador de Marcas INA-pilot Formato de intercambio de arquivos	Java	Gratuito	<a href="http://pnk.sourceforge.net/">http://pnk.sourceforge.net/</a>
31	<b>Petri Net Toolbox</b>	Lugar/Transição Stochastic Petri Nets	Editor Gráfico Jogador de Marcas	Sun	Comercial (Desconto)	<a href="http://www.ac.tuiasi.ro/pntool">http://www.ac.tuiasi.ro/pntool</a>

		Com Tempo Com Tempo	Simulação Rápida Espaço de estados Invariantes de Lugar Invariantes de Transição Análise estrutural Análise de desempenho Simples e Avançado Formato de intercambio de arquivos			acadêmico)	
32	<b>PetriSim</b>	Alto Nível Lugar/Transição Com Tempo	Editor Gráfico Simulação Rápida	MS DOS	Gratuito		<a href="http://staff.um.edu.nt/jskl1/petrisim/index.html">http://staff.um.edu.nt/jskl1/petrisim/index.html</a>
33	<b>Platform Independent Petri Net Editor</b>	Lugar/Transição	Editor Gráfico Jogador de Marcas Simulação Rápida Espaço de estados Esp. Est. Condensados Invariantes de Lugar Invariantes de Transição Análise estrutural Ana. de desempenho simples Formato de intercambio de arquivos	Java	Gratuito		<a href="http://petri-net.sourceforge.net/">http://petri-net.sourceforge.net/</a>
34	<b>PNSim</b>	Lugar/Transição	Editor Gráfico Jogador de Marcas Análise estrutural Análise Simples	Windows Java	Gratuito		<a href="http://www.elyros.com/PNSim/">http://www.elyros.com/PNSim/</a>
35	<b>PNtalk</b>	Alto Nível Com Tempo	Editor Gráfico Jogador de Marcas Simulação Rápida Ana. de desempenho simples	Sun Windows	Gratuito		<a href="http://www.fee.vutbr.cz/~janousek/pntalk/pntalk.html">http://www.fee.vutbr.cz/~janousek/pntalk/pntalk.html</a>

36	Poses++	Alto Nível	Simulação Rápida	Sun Linux Windows	Gratuito	<a href="http://www.gpc.de/">http://www.gpc.de/</a>
37	Predator	Lugar/Transição Stochastic Petri Nets Redes Hierarquicas (Subredes)	Editor Gráfico Invariantes de Lugar Invariantes de Transição Formato de intercambio de arquivos	Java	Gratuito	<a href="http://www.mark.wass.com/Petrinets">http://www.mark.wass.com/Petrinets</a>
38	PROD	Alto Nível Lugar/Transição	Espaço de estados Esp. Est. Condensados Verificação de Modelos <i>LTL</i> Verificação de Modelos <i>CTL</i>	Sun HP-Unix Linux Windows	Gratuito	<a href="http://www.tcs.hut.fi/Software/prod/">http://www.tcs.hut.fi/Software/prod/</a>
39	Renew	Orientada a Objetos Alto Nível Lugar/Transição Com Tempo	Editor Gráfico Jogador de Marcas Simulação Rápida Formato de intercambio de arquivos	Java	Gratuito	<a href="http://www.renew.de/">http://www.renew.de/</a>
40	Romeo	Com Tempo	Editor Gráfico Espaço de estados	Linux Mac OS Mac OS		<a href="http://www.ircyn.ec-nantes.fr/ircyn/d/em/equipres/TempReel/logs">http://www.ircyn.ec-nantes.fr/ircyn/d/em/equipres/TempReel/logs</a>
41	SEA	Alto Nível Com Tempo	Editor Gráfico Jogador de Marcas Simulação Rápida	Sun	Gratuito	<a href="http://www.c-lab.de/sea/">http://www.c-lab.de/sea/</a>
42	SIPN-Editor	Redes de Petri Interpretadas	Editor Gráfico Geração de Código para <i>PLC</i> Tradução em código <i>SMV</i>	Java	Gratuito	<a href="http://www.eit.uni-kl.de/litz/ENGLISH/software/SIPNEditor.htm">http://www.eit.uni-kl.de/litz/ENGLISH/software/SIPNEditor.htm</a>
43	SimulaWorks	Lugar/Transição Redes de Petri Estocásticas Com Tempo	Editor Gráfico Jogador de Marcas Simulação Rápida	Windows	Gratuito	<a href="http://www.simulaworks.com/">http://www.simulaworks.com/</a>
44	SPNP	Alto Nível	Análise de desempenho	Windows	Comercial	<a href="http://www.ee.duke.edu/~kst/">http://www.ee.duke.edu/~kst/</a>

		Stochastic Petri Nets	Avançado		(acad. Gratuito)	
45	<b>StpnPlay</b>	Stochastic Petri Nets Com Tempo	Editor Gráfico Simulação Rápida Ana. de desempenho simples Formato de intercambio de arquivos	Windows	Gratuito	<a href="http://dce.felk.cvut.cz/capekj/StpnPlay">http://dce.felk.cvut.cz/capekj/StpnPlay</a>
46	<b>SYROCO</b>	Alto Nível Com Tempo Instanção Dinâmica de Redes	Editor Gráfico Simulação Rápida Ana. de desempenho simples Formato de intercambio de arquivos	C++	Comercial (acad. Gratuito)	<a href="http://www.univ-tlse1.fr/ceriss/COOgene.html">http://www.univ-tlse1.fr/ceriss/COOgene.html</a>
47	<b>TimeNET</b>	Alto Nível Lugar/Transição Redes de Petri Estocásticas Com Tempo	Editor Gráfico Jogador de Marcas Simulação Rápida Espaço de estados Invariantes de Lugar Análise estrutural Análise de desempenho Simples e Avançado Formato de intercambio de arquivos	Sun Linux	Comercial (acad. Gratuito)	<a href="http://pdv.cs.tu-berlin.de/~timenet/">http://pdv.cs.tu-berlin.de/~timenet/</a>
48	<b>Tina</b>	Lugar/Transição Com Tempo Temporizadas	Editor Gráfico Espaço de estados Esp. Est. Condensados Invariantes de Lugar Invariantes de Transição Análise estrutural Espaço de Estado de Classes	Sun Linux Windows	Gratuito	<a href="http://www.laas.fr/tina">http://www.laas.fr/tina</a>
49	<b>Visual Object</b>	Lugar/Transição Com Tempo	Editor Gráfico Jogador de Marcas	Windows	Gratuito	<a href="http://www.systemtechnik.tu-ilmenau.de/~drath/visual_E.htm">http://www.systemtechnik.tu-ilmenau.de/~drath/visual_E.htm</a>

	Net ++	Temporizadas Redes Híbridas Redes de Petri Estocásticas	Simulação Rápida Análise estrutural Ana. de desempenho simples Hierarquia Orientada a Objetos			
50	WebSPN	Redes de Petri Estocásticas	Editor Gráfico Jogador de Marcas Ana. de desempenho avançado	Java	Gratuito	<a href="http://ing-inf.unime.it/webspn">http://ing-inf.unime.it/webspn</a>
51	WINSIM	Redes Simples Redes Estendidas	Simulação Rápida	Windows	Gratuito	<a href="ftp://cmpe.emu.edu.tr/SimSystem">ftp://cmpe.emu.edu.tr/SimSystem</a>

Tabela 5.1: Características das Ferramentas de Redes de Petri

#### Nomenclatura:

Ana. de desempenho avançado    Análise de desempenho avançado  
 Ana. de desempenho simples    Análise de desempenho simples  
 Esp. de est. Condensados    Espaço de estados Condensados



CARATERÍSTICA	SISTEMAS
Refinamento/Hierarquia	ExSpect INA Maria Opera Pep Predator Visual Object Net ++
Temporizadas	Tina Visual Object Net ++

Tabela 5.2: Caraterísticas dos Sistemas de Desenvolvimento Disponíveis

## 5.2 Caraterísticas Específicas

A seguir enumeram-se os requisitos derivados da formulação teórica da Rede *GHENeSys* :

1. A rede é Temporizada.
2. Uso de Hierarquia: O sistema deve permitir o projeto de redes hierárquicas.
3. Recursos para Permitir o refinamento dos elementos hierarquicos: O sistema deve possuir recursos para garantir a consistência do processo de refinamento das redes.
4. Uso do conceito de Orientação a Objetos.

## 5.3 Caraterísticas Adicionais

As características adicionais reúnem aspectos desejáveis em um ambiente computacional destinado à modelagem e projeto de Redes de Petri.

1. Evitar o problema do contato e/ou confusão na execução da rede.
2. Alta portabilidade do código fonte, permitindo obtenção de ambientes para execução em diferentes sistemas operacionais.

3. Possuir um mecanismo que permita administrar as diferentes subredes que compõem um projeto de forma simples, respeitando sua estrutura hierárquica.
4. Detectar os conflitos de maneira que o usuário identifique claramente quando ocorre um conflito, e possa intervir ativamente na resolução do mesmo.
5. Permitir que os elementos de uma rede *GHENeSys* se comuniquem mediante interface com outros aplicativos e/ou sistema operacional.
6. Possuir restrições no editor e gerenciador de projetos, de modo que as redes desenvolvidas estejam corretas sintaticamente por construção. Por exemplo o sistema não aceita a criação de arcos inibidores entre um lugar simples e uma transição.

## 5.4 Critérios para a Seleção do Compilador

A seleção do ambiente de desenvolvimento para a construção do software foi feita após uma avaliação quantitativa das características relativas ao compilador, ao produto e ao desenvolvedor. Os compiladores e aspectos avaliados apresentam-se na tabela A.1. O compilador selecionado foi o Delphi.

## 5.5 Aspectos Computacionais

### 5.5.1 Algoritmo de Hierarquização

Sendo a *GHENeSys* uma rede hierárquica sua dinâmica é diferente. O primeiro aspecto a se considerar é a necessidade de se estabelecer as relações de subordinação dos MacroElementos que estão associados a redes, mediante a construção de uma árvore hierárquica. Isto é necessário porque a determinação da habilitação das transições, da marcação dos elementos passivos não PseudoBox, da detecção de conflitos e da aplicação da equação de estado realiza-se mediante a técnica de análise em profundidade (*depth first*), na qual o nó que possui um maior nível de profundidade, partindo do nó raiz, é avaliado primeiro. O algoritmo de Hierarquização da rede é apresentado na figura 5.1

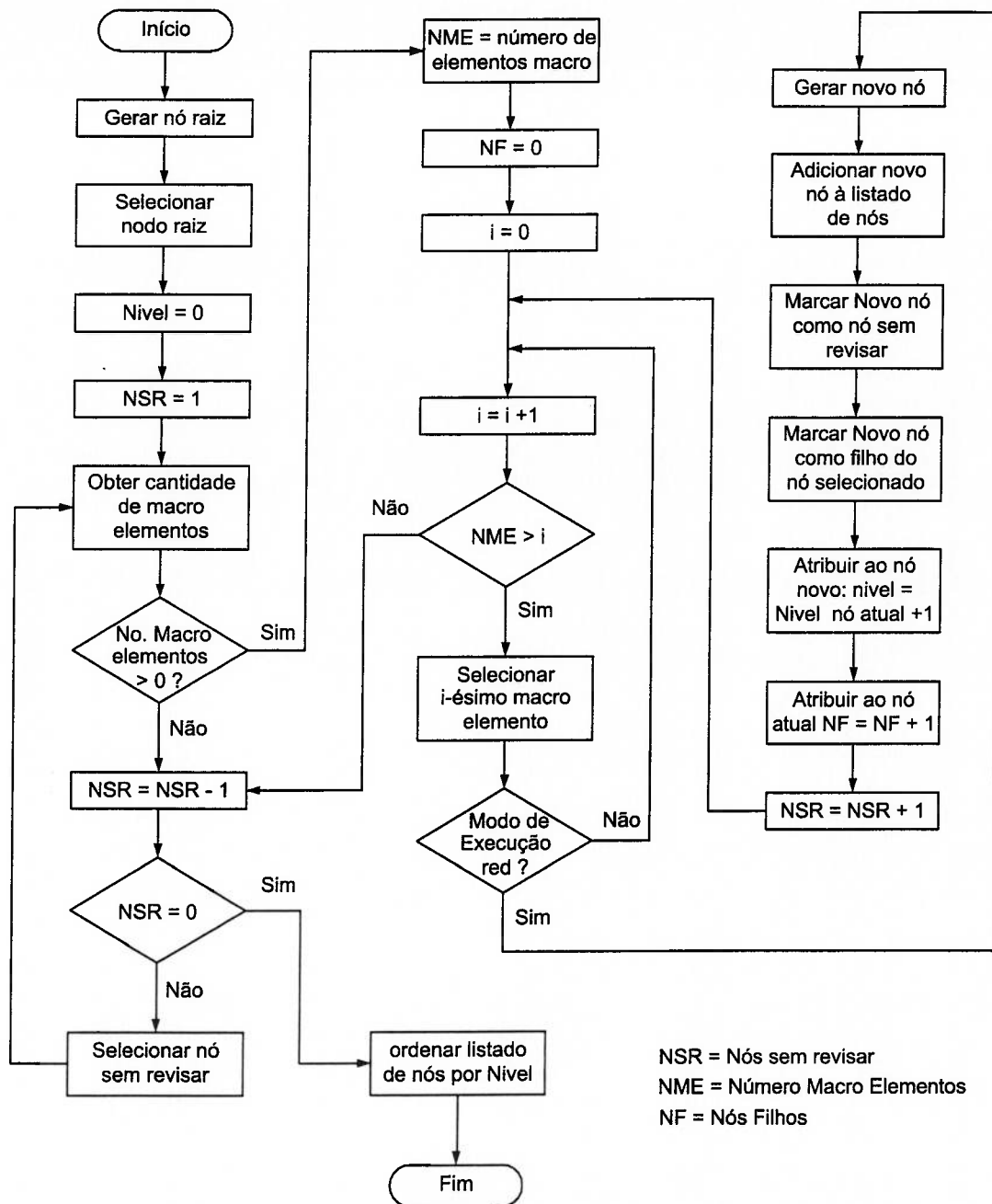


Figura 5.1: Algoritmo de Hierarquização da Rede *GHENeSys*

Para fazer referência aos diferentes nós, utiliza-se uma sintaxe derivada da estrutura da árvore, onde se percorre toda a rota desde o nó raiz até o nó destino, como se apresenta na figura 5.2. As linhas pontilhadas indicam que os MacroElementos são limites, isto é, não possuem uma rede associada.

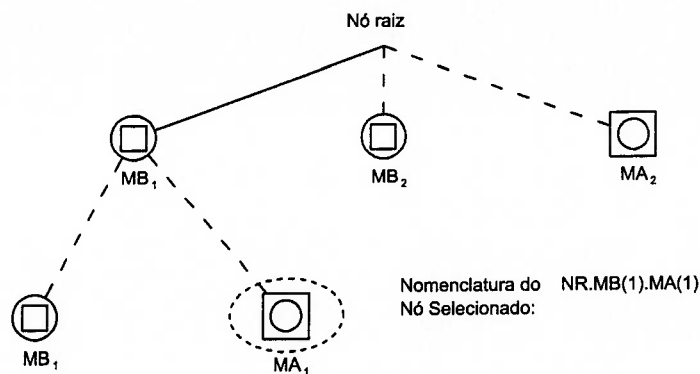


Figura 5.2: Sintaxe para Fazer Referência aos Nós da Rede *GHENeSys*

### 5.5.2 Algoritmo de Execução da Rede *GHENeSys*

A execução da Rede *GHENeSys* é apresentada no algoritmo da figura 5.1.

## 5.6 Exemplo da Dinâmica da Rede *GHENeSys*

Para o exemplo apresentado utiliza-se a rede apresentada na figura 5.5, contendo dois elementos MacroAtividade e um elemento MacroBox. Como visto no capítulo anterior existem dois modos de operação na rede *GHENeSys*: o modo abstrato temporizado e o modo de rede-associada. No primeiro caso, as MacroAtividades quando chamadas esperam tantos ciclos de tempo quanto o armazenado no seu atributo de temporização. Os MacroBox operam da mesma forma ou eventualmente chamando um dos seus métodos. No Exemplo uma das MacroAtividades é executada em modo de rede-associada.

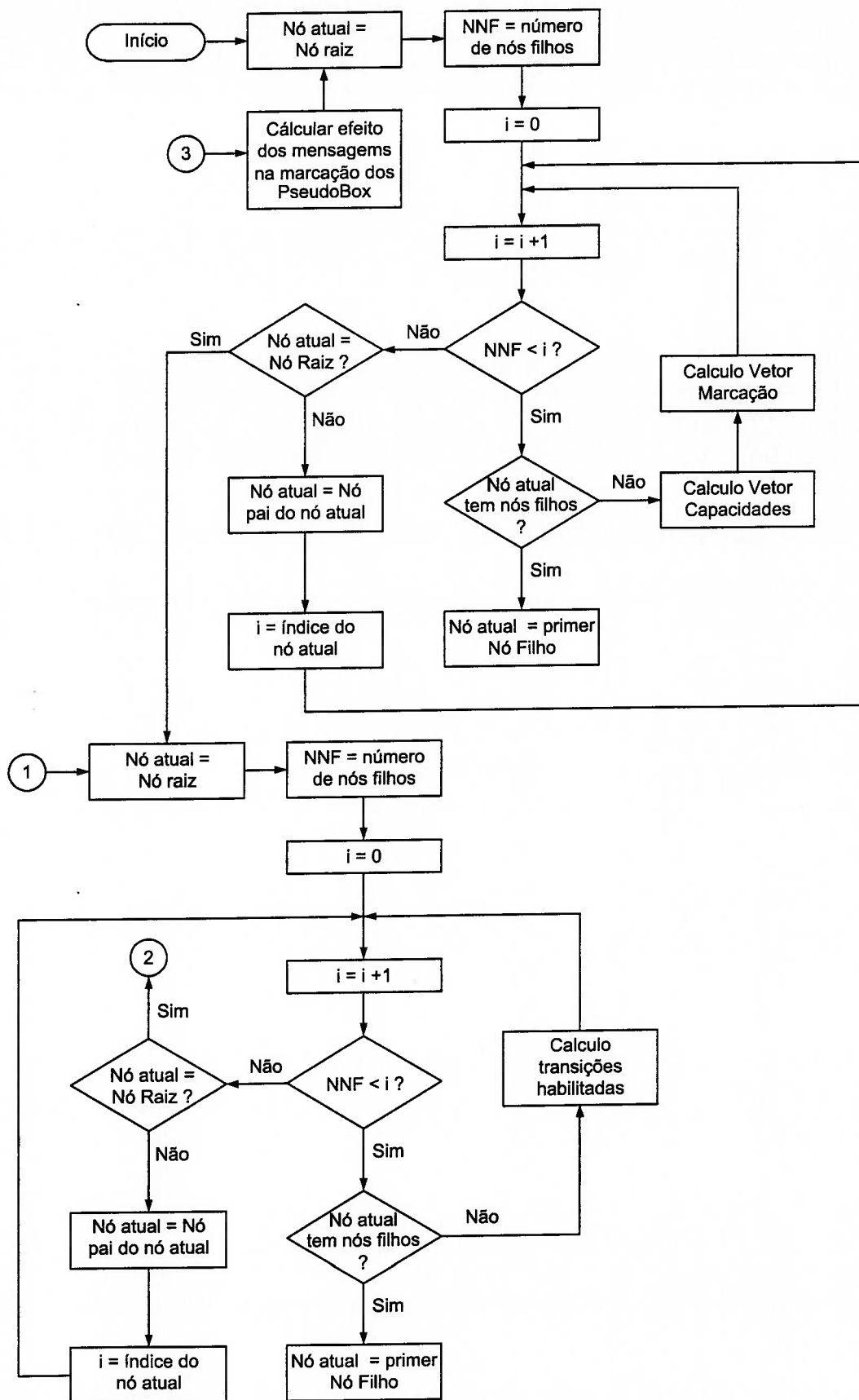


Figura 5.3: Algoritmo de Execução da Rede *GHENeSys* (a)

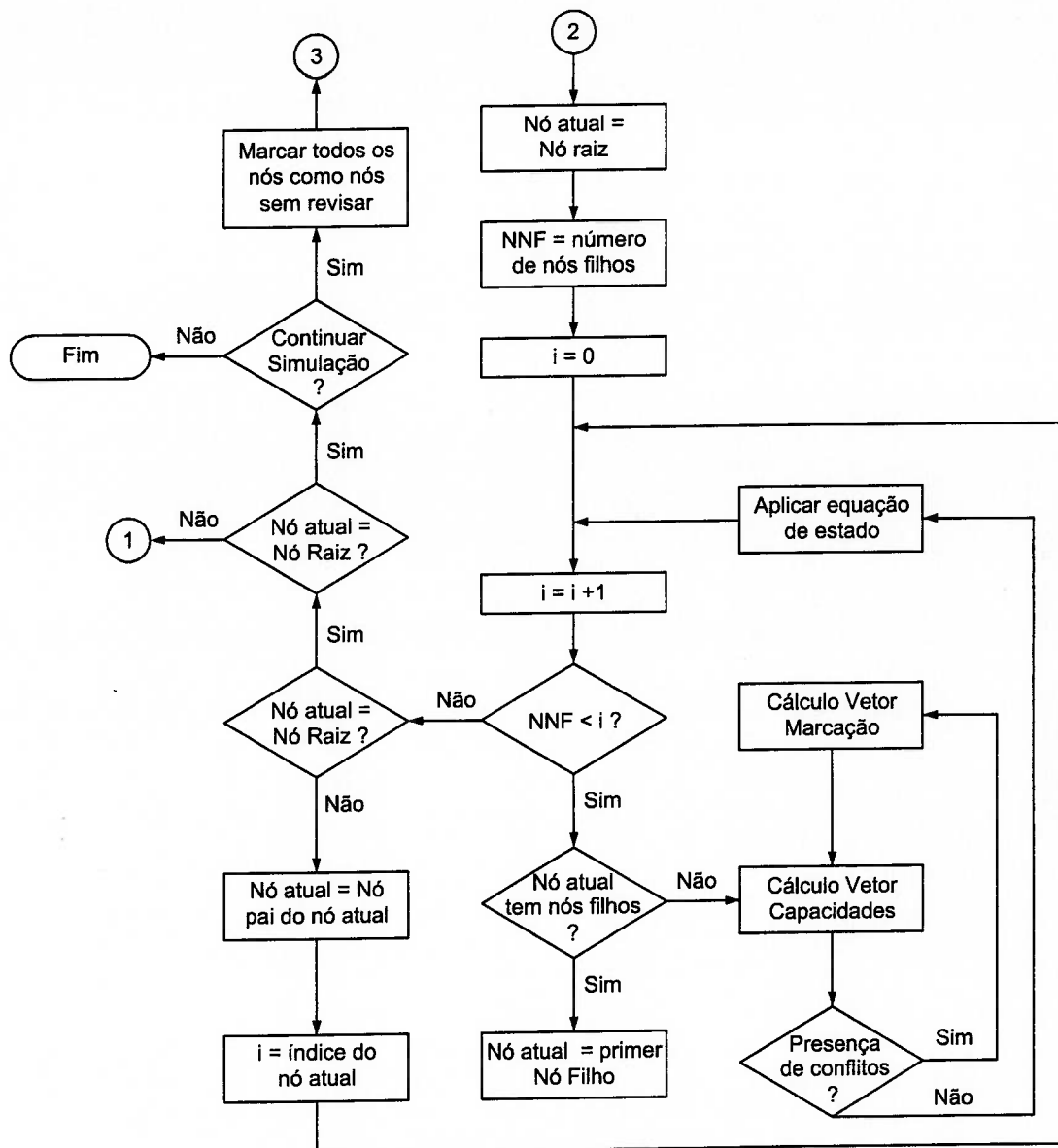
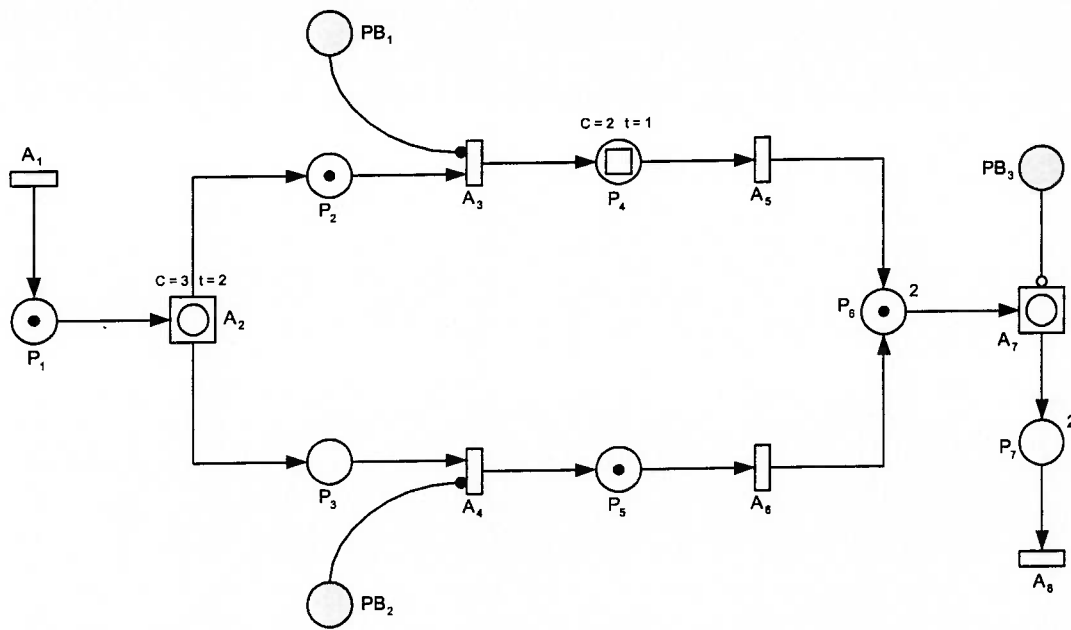


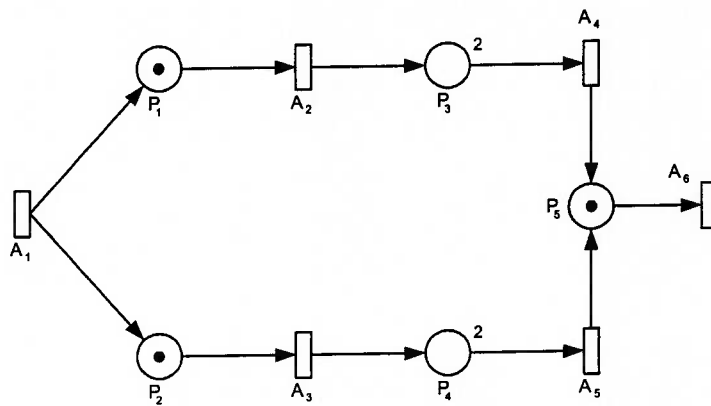
Figura 5.4: Algoritmo de Execução da Rede *GHENeSys* (b)

### 5.6.1 Geração da Árvore Hierárquica

Segundo: o algoritmo apresentado na figura 5.1 a árvore de hierarquia corresponde à figura 5.6.



(a) Rede principal



(b) Subrede associada a MacroAtividade *NR.MA2*  
(Elemento Ativo *A7* da rede principal)

Figura 5.5: Exemplo de Dinâmica da Rede *GHENeSys*

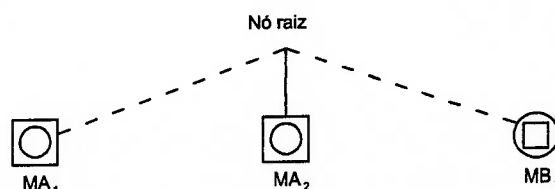


Figura 5.6: Árvore de Hierarquia para o Exemplo da figura 5.5

## 5.6.2 Matrizes do Sistema

### Matrizes associadas ao nó NR.Ma(2)

$$A^+ = \begin{matrix} & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad A^- = \begin{matrix} & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

A matriz de incidência do nó NR.Ma(2) é portanto:

$$A_g = \begin{matrix} & P'_1 & P'_2 & P'_3 & P'_4 & P'_5 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

### Matrizes do nó raiz

$$A^+ = \begin{matrix} & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 & P_7 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_8 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad A^- = \begin{matrix} & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 & P_7 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_8 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$H^e = \begin{matrix} & P_1 & P_2 & P_3 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_8 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad H^d = \begin{matrix} & P_1 & P_2 & P_3 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_8 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

A matriz de incidência portanto é:



$$A_g = \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_8 \end{array} \left[ \begin{array}{cccccccc|ccc} P'_1 & P'_2 & P'_3 & P'_4 & P'_5 & P'_6 & P'_7 & & P_8^{pb} & P_9^{pb} & P_{10}^{pb} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]$$

### 5.6.3 Vetores de Capacidade

Capacidade do Nó NR.Ma(2)

$$C_{NR.Ma(2)} = [1 \ 1 \ 2 \ 2 \ 1]^T$$

Capacidade do Nó raiz

$$C_{NR} = [1 \ 1 \ 1 \ 2 \ 1 \ 2 \ 2]^T$$

### 5.6.4 Vetores de Marcação

Seguindo 5.4

Marcação de Nó NR.Ma(2)

$$U_{NR.Ma(2)} = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]^T$$

Marcação do Nó raiz

$$U_{NR} = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0]^T$$

### 5.6.5 Cálculo das Transições Habilitadas

Seguindo 4.8

### Transições habilitadas do Nó NR.Ma(2)

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow h_1 = 1 \qquad \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \not\geq \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow h_2 = 0$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \not\geq \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow h_3 = 0 \qquad \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow h_4 = 1$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \not\geq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow h_5 = 0 \qquad \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \not\geq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \rightarrow h_6 = 0$$

Isto é:

$$H = [1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]^T$$

### Transições habilitadas Nó raiz

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow h_1 = 1 \qquad \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow h_2 = 1$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow h_3 = 1 \qquad \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \not\geq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow h_4 = 0$$

$$\begin{array}{ccc}
 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \not\geq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \rightarrow h_5 = 0 & \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow h_6 = 1 \\
 \\
 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} & \rightarrow h_7 = 1 & \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \not\geq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \rightarrow h_8 = 0
 \end{array}$$

Isto é:

$$H = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0]^T$$

### 5.6.6 Cálculo do Efeito da Presença de Arcos Habilitados e Inibidores

Segundo o algoritmo apresentado em 4.7.5.2 no ciclo de avaliação  $k = 1$ :

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Arcos inibidores Segundo 4.7.5.2

$$\begin{aligned}
 H^d \cdot T_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_1 \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T
 \end{aligned}$$

Isto é:

$$(H^-)_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_1$$

### Arcos Habilitadores

A avaliação segundo 5.4

$$\begin{aligned} H^e \cdot (T_k - I) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1-1 & 0 & 0 \\ 0 & 1-1 & 0 \\ 0 & 0 & 0-1 \end{bmatrix}_1 \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

Isto é:

$$(H^+)_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_1$$

Assim o efeito dos arcos inibidores e habilitadores sobre o vetor de transições é:

$$H'_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_1$$

### 5.6.7 Cálculo de Conflitos

**conflitos Nó NR.Ma(2)** A avaliação dos conflitos na rede é feita segundo equação 4.14

$$\begin{aligned}
U_2^s &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_1 + \left( \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}^T \right) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_1 \\
&= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_1 + \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_1 \\
&= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_1 + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_1
\end{aligned}$$

Aplicando a equação 4.14:

$$(1 \geq 0) \wedge (1 \leq 0) \rightarrow u_1^c = 0$$

$$(1 \geq 0) \wedge (1 \leq 2) \rightarrow u_2^c = 0$$

$$(0 \geq 0) \wedge (0 \leq 0) \rightarrow u_3^c = 0$$

$$(0 \geq 0) \wedge (0 \leq 0) \rightarrow u_4^c = 0$$

$$(1 \geq 0) \wedge (1 \leq 0) \rightarrow u_5^c = 0$$

Portanto:

$$U_2^c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_2$$

Isto é a Subrede associada ao Nó NR[3].MA não apresenta conflitos em  $k = 1$ .

**Conflitos do Nó Raiz:** Usando 4.14

$$U_2^s = U_1 + (D \cdot A_g^T) \cdot (H_1')$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_g^T = \left[ \begin{array}{cccccccc|cc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]^T$$

$$D \cdot A_g^T = \left[ \begin{array}{cccccccc|cc} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]$$

$$U_2^s = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_1 + \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_1$$

$$= \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_1 \quad \text{Aplicando 4.14:}$$

$$(1 \geq 0) \wedge (1 \leq 1) \rightarrow u_1^c = 0$$

$$(1 \geq 0) \wedge (1 \leq 1) \rightarrow u_2^c = 0$$

$$(1 \geq 0) \wedge (1 \leq 1) \rightarrow u_3^c = 0$$

$$(1 \geq 0) \wedge (1 \leq 2) \rightarrow u_4^c = 0$$

$$(0 \geq 0) \wedge (0 \leq 1) \rightarrow u_5^c = 0$$

$$(1 \geq 0) \wedge (1 \leq 2) \rightarrow u_6^c = 0$$

$$(1 \geq 0) \wedge (1 \leq 2) \rightarrow u_7^c = 0$$

Portanto:

$$U_2^c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_2$$

Isto é a rede do nó raiz não apresenta conflitos em  $k = 1$ .

### 5.6.8 Aplicação da Equação de Estado

#### Nó NR.Ma(2)

Assumindo que todas as transições habilitadas dispararam, isto é:  $(F_2') = (H_2')$

$$U_2' = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_1 + \left( \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}^T \right) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_1$$

$$U'_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_1 + \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_1 + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_1$$

### Aplicação da Equação de estado ao Nó Raiz

$$U_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_1 + \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_1$$

$$= \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_1$$

A marcação do sistema depois da aplicação da equação de estado é apresentada na figura 5.7.

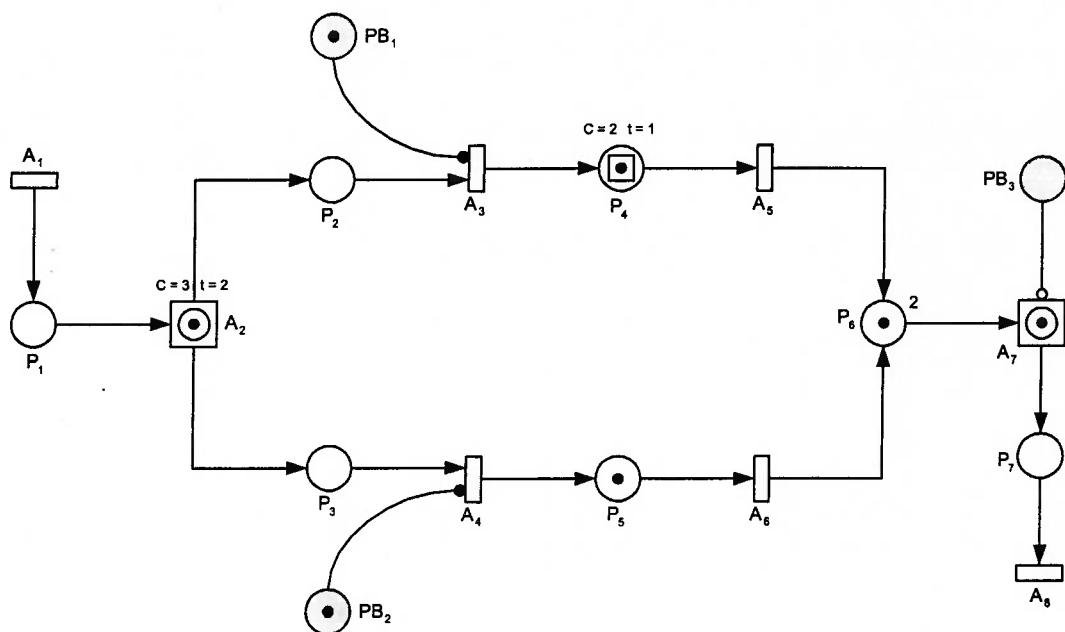
## 5.7 Descrição Geral da *GHENESYS*

A *GHENESYS* é concebida como um sistema computacional que permite construir e simular sistemas baseados na rede *GHENeSys*, assim é preciso que a ferramenta permita a utilização das Redes de Petri como objetos e a construção de sistemas utilizando composição e refinamento hierárquicos. Neste contexto,

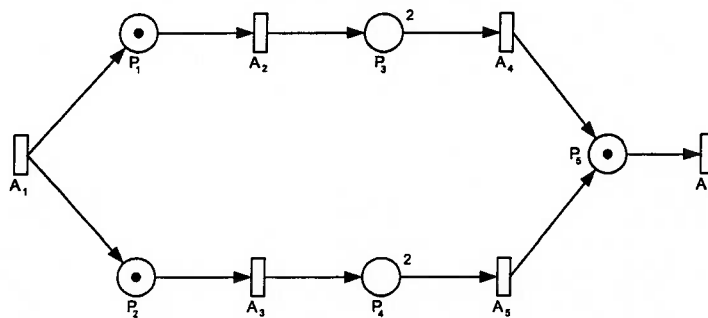


faz-se necessário definir um projeto (no contexto da *GHENESYS*) como uma estrutura mediante a qual é possível gerenciar as redes que compõem o sistema, sua hierarquia e o intercâmbio de mensagens. Para o projeto e para as redes definem-se tipos de arquivo diferentes.

Um arquivo de Projeto é um arquivo com extensão *.gp* (*GHENESYS Project*), Este é um arquivo compactado em formato *ZIP* que armazena os arquivos das redes e o conjunto de arquivos que contem características do sistema, tais como: a árvore de Hierarquia, lista de redes que integram o Projeto, os arquivos das redes, estrutura de mensagens, etc. A estrutura interna de um arquivo típico de projeto se apresenta na figura 5.8



(a) Rede principal



(b) Subrede Associada a MacroAtividade *NR.MA<sub>2</sub>*

Figura 5.7: Resultado Exemplo da Dinâmica da Rede *GHENeSys*

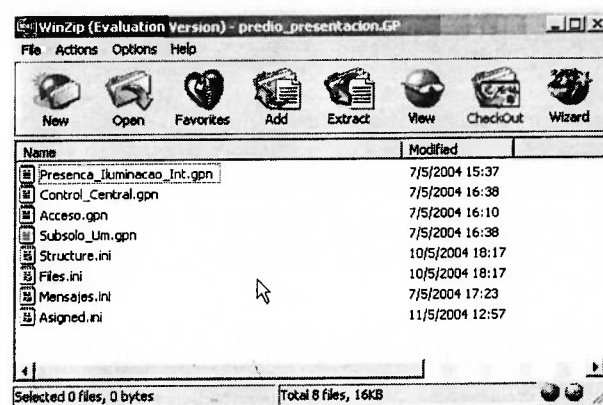


Figura 5.8: Estrutura interna de um Arquivo de Projeto na *GHENESYS*

Um arquivo de rede tem extensão *.gpn* (*GHENESYS Petri Net*), nele são armazenadas as informações próprias de uma rede, tais como a posição dos elemento na tela, tipos de elemento, arcos que unem os elementos, tipo de arcos, etc. A estrutura interna de um arquivo típico apresenta-se na figura 5.9

A *GHENESYS* pode ser utilizada de dois modos: *Design* e Gestão do Projeto. No primeiro caso o usuário constrói as redes. No segundo pode adicionar e/ou remover as redes a um projeto, construir a árvore de hierarquia e assinar os mensagens aos PseudoBox. Unicamente no modo de Gestão do Projeto o usuário pode executar um sistema *GHENeSys*.

A estrutura da *GHENeSys* utiliza um refinamento hierarquico que corresponde à atribuição de redes compatíveis encapsuladas em MacroElementos (MacroBoxes e/ou MacroActividades). A modificação das redes que compõem um projeto não é desejável, entretanto pode-se afetar a compatibilidade e/ou a estrutura de intercambio de mensagens. Assim se é desejado alterar uma rede de um projeto a modificação deve ser realizada em modo *Design* para depois integrar-la de novo ao projeto.

A classificação da compatibilidade das redes com os MacroElementos é uma condição básica para a construção hierarquica do sistema, Esta compatibilidade é determinada de acordo as regras estabelecidas na seção 4.3. Os dois tipos de classificação implementados na *GHENESYS* são:

1. **Validade:** Uma rede é valida se não tem elementos isolados.

```

[GPNF]
PaperType= A4
Orientation= poLandscape

[PLACES]
Left= 156
Top= 231
Show Name= True
Caption= Presença
Show Caption= True
Capacity= 1
ShowCapacity= True
Initial Tokens= 0
Current Tokens= 0

Left= 157
Top= 137
Show Name= True
Caption= Mensagem Reportada
Show Caption= True
Capacity= 1
ShowCapacity= True
Initial Tokens= 0
Current Tokens= 0

Left= 161
Top= 40
Show Name= True
Caption= Não Presença
Show Caption= True
Capacity= 1
ShowCapacity= True
Initial Tokens= 0
Current Tokens= 0

[MESSAGES]

[TRANSITIONS]
Left= 44
Top= 229
Show Name= True
Caption= Gerar Mensagem
Show Caption= True
Posicion= Vertical

Time= 0
Left= 52
Top= 35
Show Name= True
Caption= Detecção Presença
Show Caption= True
Posicion= Horizontal
Time= 0

Left= 262
Top= 233
Show Name= True
Caption= Não Detecção Presença
Show Caption= True
Posicion= Horizontal
Time= 0

Left= 264
Top= 39
Show Name= True
Caption= Gerar Mensagem
Show Caption= True
Posicion= Vertical
Time= 0

[PSEUDOBBOXES]
[MACROBOXES]
[MACROACTIVITIES]
[ARCS]
1 1 0 2 0
0 2 1 3 0
1 3 0 1 0
0 1 1 2 0
0 1 1 1 0
1 0 0 1 0
1 2 0 0 0
0 0 1 0 0

[END_GPTF]

```

Figura 5.9: Estrutura de um Arquivo de Rede na *GHENESYS*

2. **Compatibilidade:** A *GHENESYS* detecta se a rede que é ingressada a um projeto é compatível o incompatível. Se é compatível determina com qual tipo de elemento, MacroBox ou MacroActidade.

### 5.7.1 Interface Gráfica da *GHENESYS*

A *GHENESYS* foi desenvolvida procurando uma interface comum as aplicações estilo *Windows*, a figura 5.10 apresenta a janela principal do software apresentando o desenho de uma rede. Para cada função principal da *GHENESYS* é associado um ícone e um menu, que por sua vez são agrupados em módulos de acordo às funções gerais que desempenham. A figura 5.11 apresenta os ícones correspondentes a cada um dos módulos da *GHENESYS*.

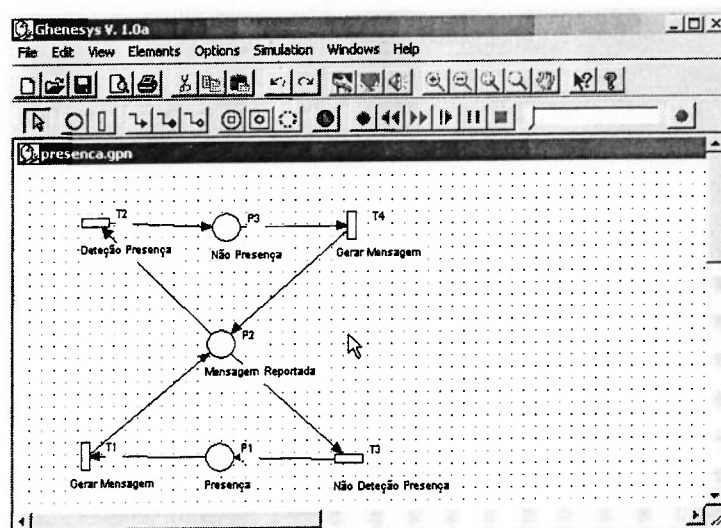


Figura 5.10: Janela Principal da *GHENESYS*

O módulo de Funções *CAD* (*Computer Aided Design*) e algumas das funções do módulo de Sistema Operacional não foram desenvolvidas, entretanto que a formalização da *GHENeSys* e a implementação dos requisitos levantados ( ver seções 5.3 e 5.2) foram priorizados. Os módulos desenvolvidos se explicam a seguir.

#### 5.7.1.1 Módulo de Sistema Operacional

É a interface com o sistema operacional, permite criar, abrir, fechar e/ou salvar arquivos de Projeto e de Rede. Os menus e ícones deste módulo são apresentados na figura 5.12

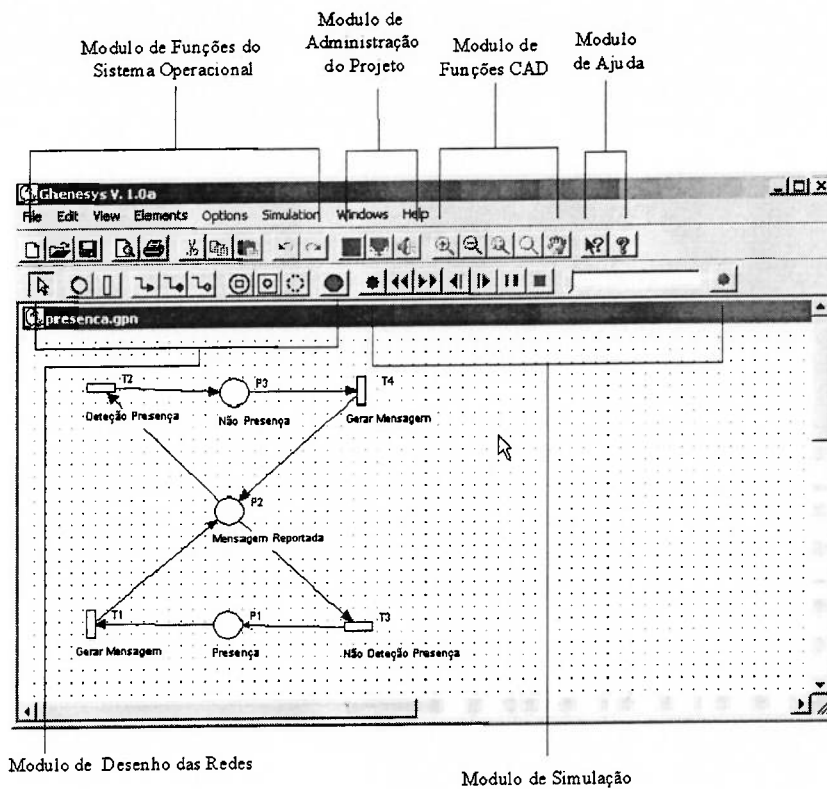
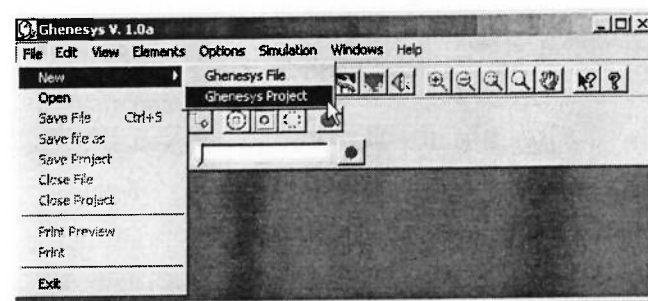
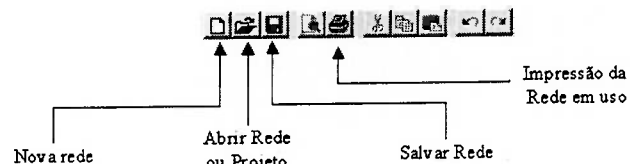


Figura 5.11: Ícones correspondentes aos Módulos da *GHENESYS*



(a) Barra de Menus



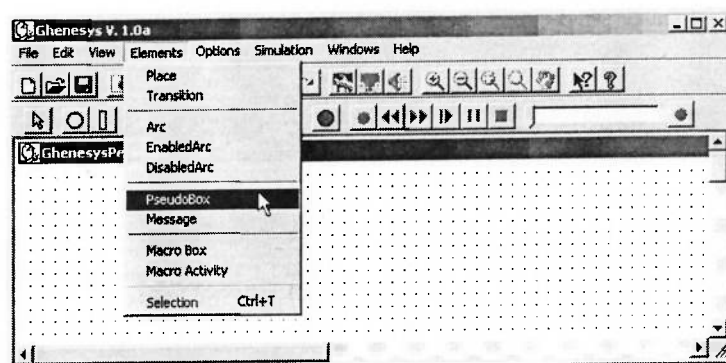
(b) Barra de Ícones

Figura 5.12: Menus e Barra de Ícones do Módulo Sistema Operacional

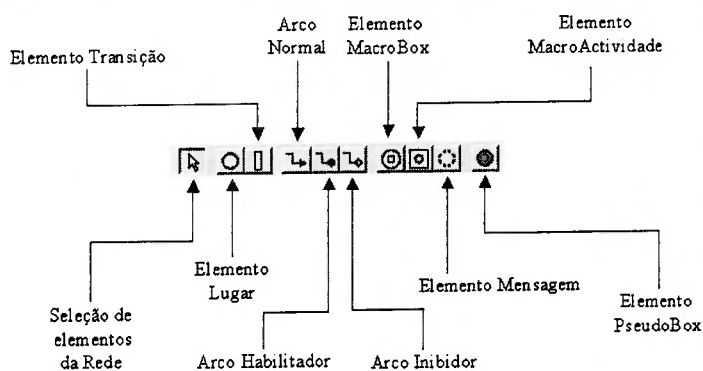
### 5.7.1.2 Módulo de Desenho

Este módulo reúne os elementos requeridos para o desenho das redes, ao selecionar o menu ou o ícone correspondente ao elemento a *GHENESYS* permite criar

na janela de edição uma instância do elemento escolhido. Os menus e ícones deste módulo são apresentados na figura 5.13, A barra de ícones e os menus de desenho estão habilitados unicamente em modo *Desig*



(a) Barra de Menus



(b) Barra de Ícones

Figura 5.13: Menus e Barra de Ícones do Módulo Desenho

Para desenhar um arco entre dos elementos se escolhe-se a opção no menu ou ícone do tipo de arco desejado. Para trazer o arco selecciona-se o elemento de origem e movimentase o mouse com o botão presionado, até o elemento final onde o botão é liberado e o arco criado. No caso que entre os dois elementos seleccionados não seja possivel criar um arco a *GHENESYS* apresentara um aviso explicativo.

Quando o elemento *Selection* é escolhido é possivel seleccionar os elementos para alterar suas propriedades, ovimentarlos e ainda apaga-os. A figura 5.14 ilustra a movimentação dos elementos e a figura 5.15 apresenta a maneira de mudar as propriedades dos elementos de uma dada rede.

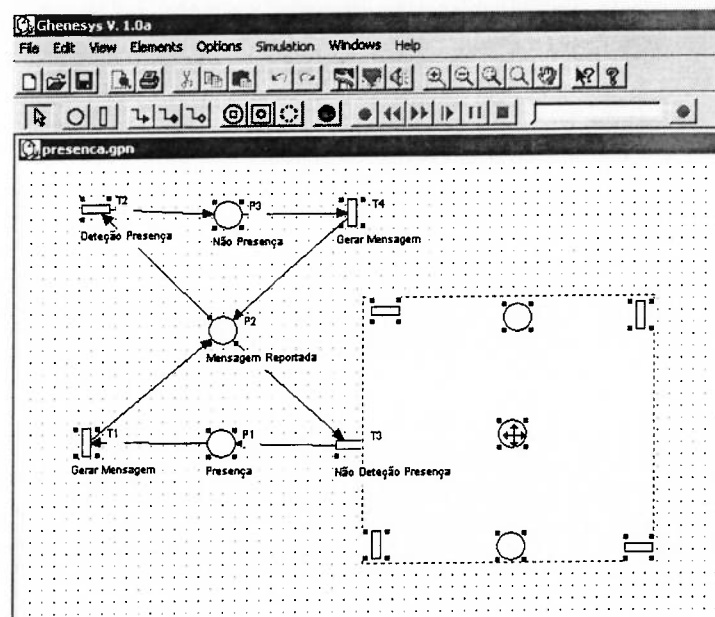


Figura 5.14: Movimentação de elementos na *GHENESYS*

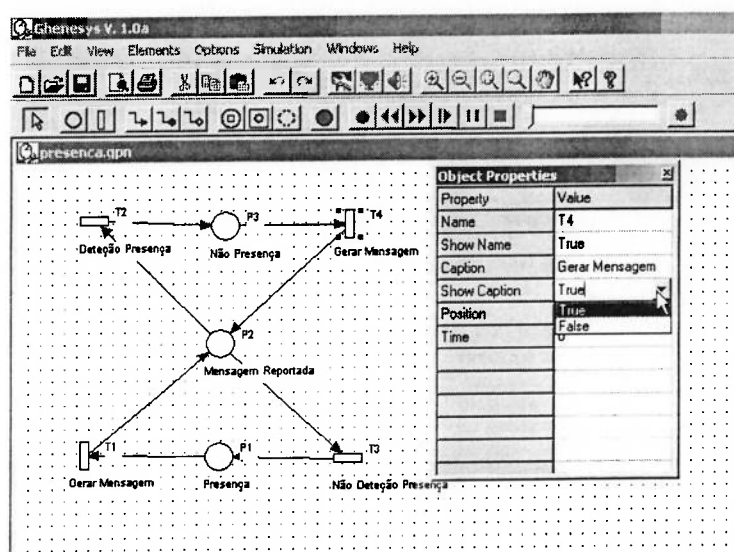
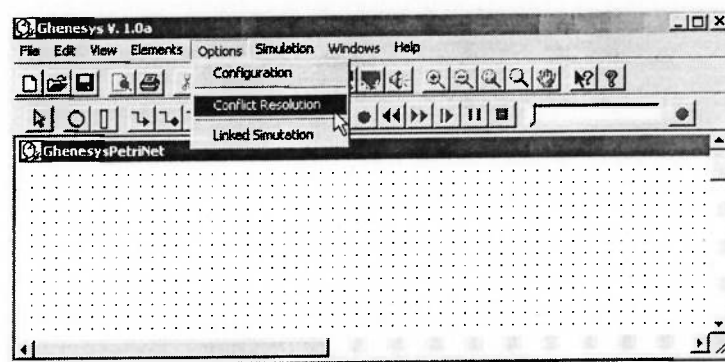


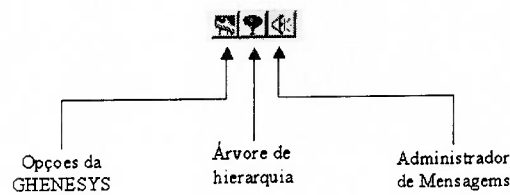
Figura 5.15: Mudança de Propriedades dos Elementos na *GHENESYS*

### 5.7.1.3 Módulo de Administração do Projeto

Este módulo é utilizado para à gestão do projeto, contem os métodos para á construção e modificação da Árvore Hierarquica e à assinatura de mensagens aos PseudoBox. Além disso, em versões futuras do software planeja-se incluir neste módulo a modificação do formato do espaço de edição da rede e o sistema de resolução, que na versão apresentada é por defeito prioridade assinada as transições. Á figura 5.16 apresenta os menus e ícones deste módulo.



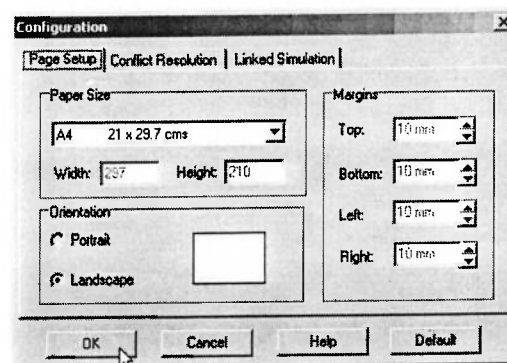
(a) Barra de Menus



(b) Barra de Ícones

Figura 5.16: Menus e Barra de Ícones do Módulo Administração do Projeto

O ícone de *opções* despenda a janela de opções do sistema, entanto que o menu *Options* permite ingressar directamente ao submódulo de opções desejado. A figura 5.17 apresenta a janela de opções.

Figura 5.17: Janela de Opções da *GHENESYS*

O ícone e o menu *Árvore de Hierarquia* apresentam a janela de atribuição de arquivos ao projeto, e permite a construção da árvore de hierarquia. Além disso possibilita observar à classificação das redes que compõem o projeto. A janela apresentada ao selecionar esta opção é ilustrada na figura 5.18.



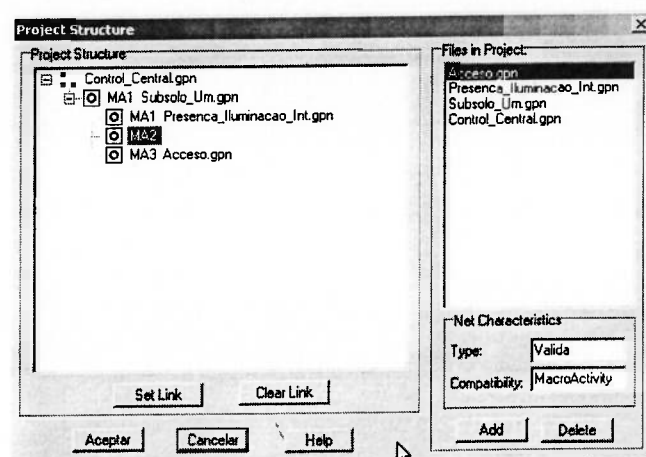


Figura 5.18: Janela de Estrutura da *GHENESYS*

O ícone e o menu *Administrador das Mensagens* apresentam a janela de gestão das mensagens, na qual é possível vincular o desvincular um conjunto de mensagens a cada PseudoBox. No caso que uma rede seja apagada da árvore de hierarquia, os mensagens atribuídos a seus PseudoBox serão apagados em forma automática, igualmente as mensagens que a rede contém não estarão mas na estrutura de mensagens do sistema. A figura 5.19 apresenta a janela de gestão das mensagens.

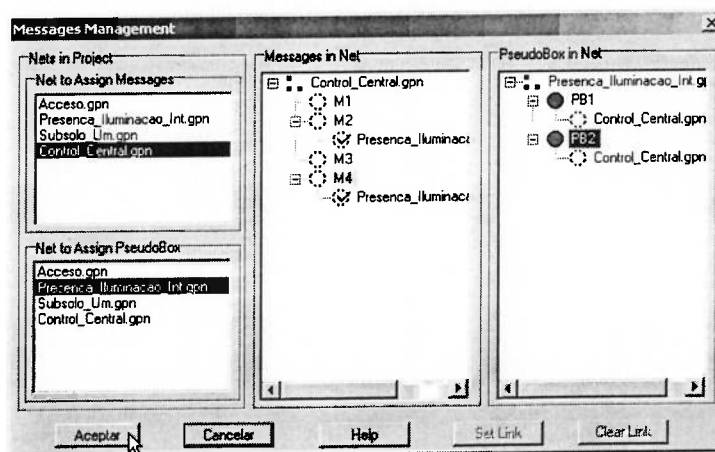
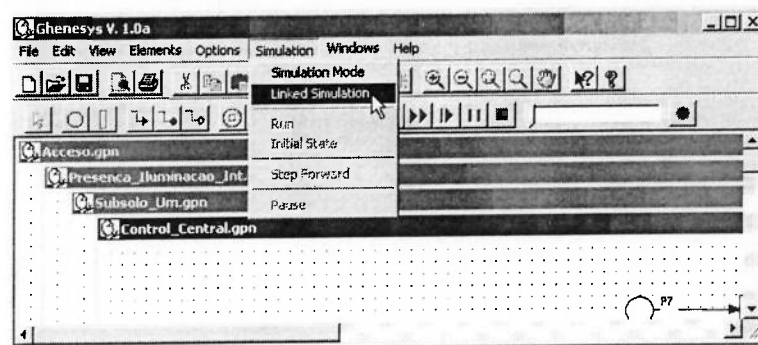


Figura 5.19: Janela de Gestão de mensagens da *GHENESYS*

#### 5.7.1.4 Módulo de Execução

A *GHENESYS* permite a execução como um jogador de ferramentas tradicional, mas conta com a possibilidade de funcionar como um controlador acoplada a algum outro sistema computacional. Os menus e ícones deste módulo são apre-

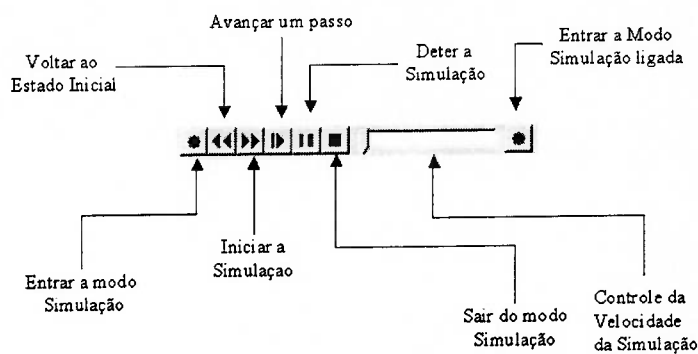
sentados na figura 5.20.



(a) Barra de Menus



(b) Barra de Ícones



(c) Barra de Ícones Executando uma simulação

Figura 5.20: Menus e Barra de Ícones do Módulo Administração do Projeto

No modo execução cada uma das instâncias do Projeto é apresentada em uma janela, o menu *windows* pode ser utilizado para alternar entre as diferentes janelas do projeto, como se ilustra na figura 5.21.

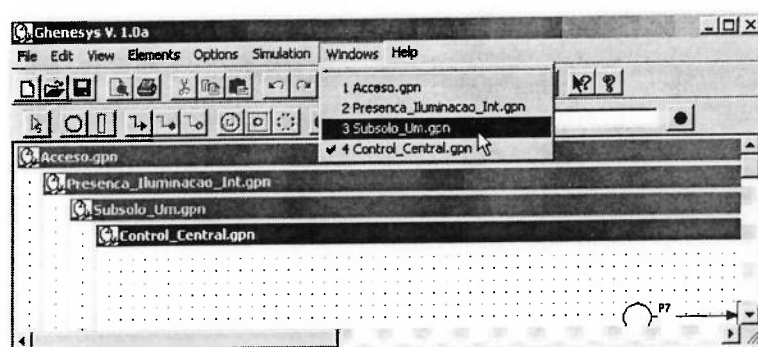
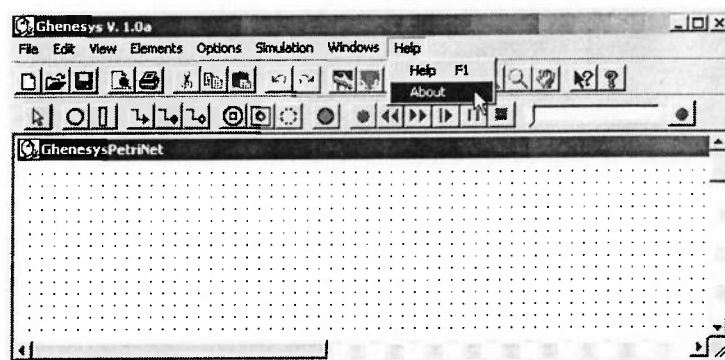


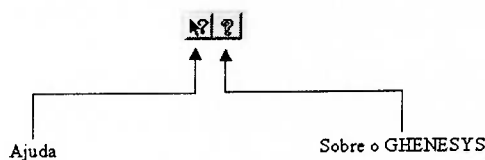
Figura 5.21: Menu de Seleção das Instâncias de um Projeto *GHENESYS*

### 5.7.1.5 Módulo de Ajuda

Este módulo reúne o sistema de ajuda da *GHENESYS*, a figura 5.22 apresenta os menus e ícones deste módulo.



(a) Barra de Menus



(b) Barra de Ícones

Figura 5.22: Menus e Barra de Ícones do Módulo Administração do Projeto

O ícone *ajuda* chama o sistema de ajuda e o ícone *Sobre o GHENESYS* ) despiiega a janela que apresenta o tipo de licença e os credits do software, como apresentado na figura 5.23

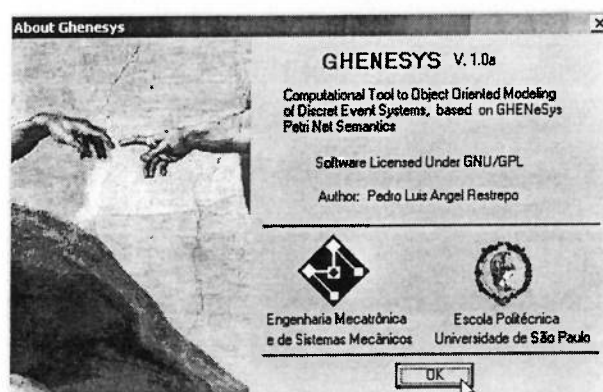


Figura 5.23: Janela *About* da *GHENESYS*

## 6. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso apresentado neste trabalho insere-se na área da automação predial, e consiste do projeto de um sistema de controle para um prédio automatizado utilizando a rede *GHENeSys*, o modelo de controle é validado utilizando o jogador de marcas desenvolvido acoplado, a uma maquete em realidade virtual do prédio.

O objeto de estudo deste trabalho é o controle de um prédio automatizado composto por três andares, o prédio é considerado como uma planta <sup>1</sup> em termos da utilização pelos usuários, a aplicação da metodologia de design do sistema de controle com a *GHENeSys* se apresenta a continuação.

### 6.1 Controle de Sistemas a Eventos Discretos com a Rede *GHENeSys*

O sistema de controle com a rede *GHENeSys* baseia-se na possibilidade de inibir e/ou habilitar elementos ativos mediante la marcação ou demarcação dos elementos PseudoBox. Ver seções 4.4 e 4.7.5.2 Os PseudoBox representam condições externas ao sistema.

### 6.2 Identificação do Sistema

#### 6.2.1 Descrição do Prédio

As plantas dos andares do prédio ilustram-se nos planos A4-01, A4-02 e A4-03, uma composição tridimensional do prédio apresenta-se no plano A4-04.

#### 6.2.2 Políticas de Utilização do Prédio

Apresentam-se como um conjunto de regras heurísticas de controle do prédio, enunciadas a seguir:

Na presença de usuários, quando o sistema de iluminação detecta a necessidade de aumentar a Iluminação presente, deve proverá, salvo quando o prédio não deva ter usuários presentes na área de ação do sensor de Presença. Neste

---

<sup>1</sup>No contexto da teoria de controle

caso deve-se acionar o sistema de alarmes. Os sistemas de Presença e iluminação tem funções diferentes para interior o exterior do prédio. Os sistemas externos não são desligados, não são inibido a sua ligação manual e não geraram alarmes.

No caso de presença de usuários em áreas do prédio, em horário proibido, os sistemas de acesso não permitem o ingresso ou saída dos usuários e o sistema de alarmes deve ser acionado. Além disso, o sistema de iluminação é desligado não podendo ser ligado de maneira manual.

Na presença de fumaça no prédio, o sistema de Incêndios deve determinar se trata-se de um incêndio, vigiando por uma quantidade de tempo antes de acionar as alarmes e demais sistemas. Com o objetivo de economizar energia, os sistemas de HVAC são desligados depois de um predeterminado a partir da não detecção de presença em suas áreas de influencia.

## **6.3 Decomposição do Sistema**

### **6.3.1 Objetos do Prédio**

O objetos identificados no prédio, classificam-se de acordo com a função que apresentam, assim os objetos situados no prédio são:

- Corredor
- Garagem
- Escritório
- Banheiro
- Bodega
- Escadas
- Portas
- Salão

A utilização do prédio é regulada com base em um conjunto de dispositivos que permitem reagir as diferentes situações que podem se apresentar. Assim, o

controle baseia-se nas regras heurísticas provenientes das políticas de utilização do prédio, implementando restrições de segurança e otimização de recursos. a colocação dos dispositivos do prédio apresentam-se nos planos A4-05, A4-06, A4-07. O modelo de utilização do prédio mostra-se no planos A2-01. As áreas as quais se faz referencia em dito modelo estão ilustradas nos planos A4-08, A4-09, A4-10.

### **6.3.2 Dispositivos de Automação do Prédio**

Os objetos identificados nos dispositivos existentes no prédio são:

- Sensor de Presença
- Sensor de Fumaça
- Sistema de Iluminação
- Sistema de acesso
- HVAC

### **6.3.3 Objetos de Controle**

Os elementos de controle relacionam sensores, actuadores, regras heurísticas e o tipo de área do prédio, para realizar o controle de utilização do mesmo, assim se observar que é possível a agregação de elementos constituindo elementos de controle. A tabela 6.1 apresenta os elementos de controle do prédio e a descrição da sua função.

OBJETO DE CONTROLE	DESCRIÇÃO
Presença-Iluminação-Interior	Permite o controle de espaços como banheiros, bodegas e corredores onde a detecção de presença é requisitada para ter ligada a iluminação só quando se tem presença, economizando energia; aplicar as políticas de segurança gerando alarmes quando se detecta presença em horários não autorizados e impossibilitar a ligação da iluminação manual quando existam alarmes no sistema.
Presença-Iluminação-Exterior	Permite a iluminação de áreas exteriores como garagem e no exterior dos sistemas de acesso ao prédio. A única diferença do Sistema Presença-Iluminação-Interior e que não apresenta geração de alarmes ou bloqueio na iluminação.
Acesso Exterior	São os sistemas que controlam o ingresso ao prédio.
Presença-Iluminação-Acesso	São sistemas que além de controlar as funções do sistema Presença-Iluminação-Interior, bloqueiam a abertura dos sistemas de acesso interior.
Presença(2)-Iluminação-Interior	São sistemas que por controlar áreas maiores requerem dois sensores de Presença, o funcionamento é igual que o Sistema Presença-Iluminação-Interior.
Presença(2)-Iluminação-Exterior	São sistemas que por controlar áreas maiores requerem dois sensores de Presença, o funcionamento é igual ao Sistema Presença-Iluminação-Exterior.
Presença-acesso(2)-Iluminação	Sistemas que controlam dos sistemas de acesso interior, o funcionamento é igual que o Sistema Presença-Iluminação-Acesso.
Controle de Incêndios	Sistemas de controle de presença de fumaça e existência de incêndios, gera alarmes na presença de incêndios.
Controle uso de HVAC	Permite desligar o HVAC quando não é detectada presença na área de utilização do sistema.
Sistema de Vigilância	Aplica as políticas de controle quando é detectada presença não autorizada.

Tabela 6.1: Descrição dos Elementos de Controle

## 6.4 Modelos dos Objetos

A figura 6.2 ilustra os modelos dos objetos identificados no conjunto de dispositivos utilizados na automação do prédio.

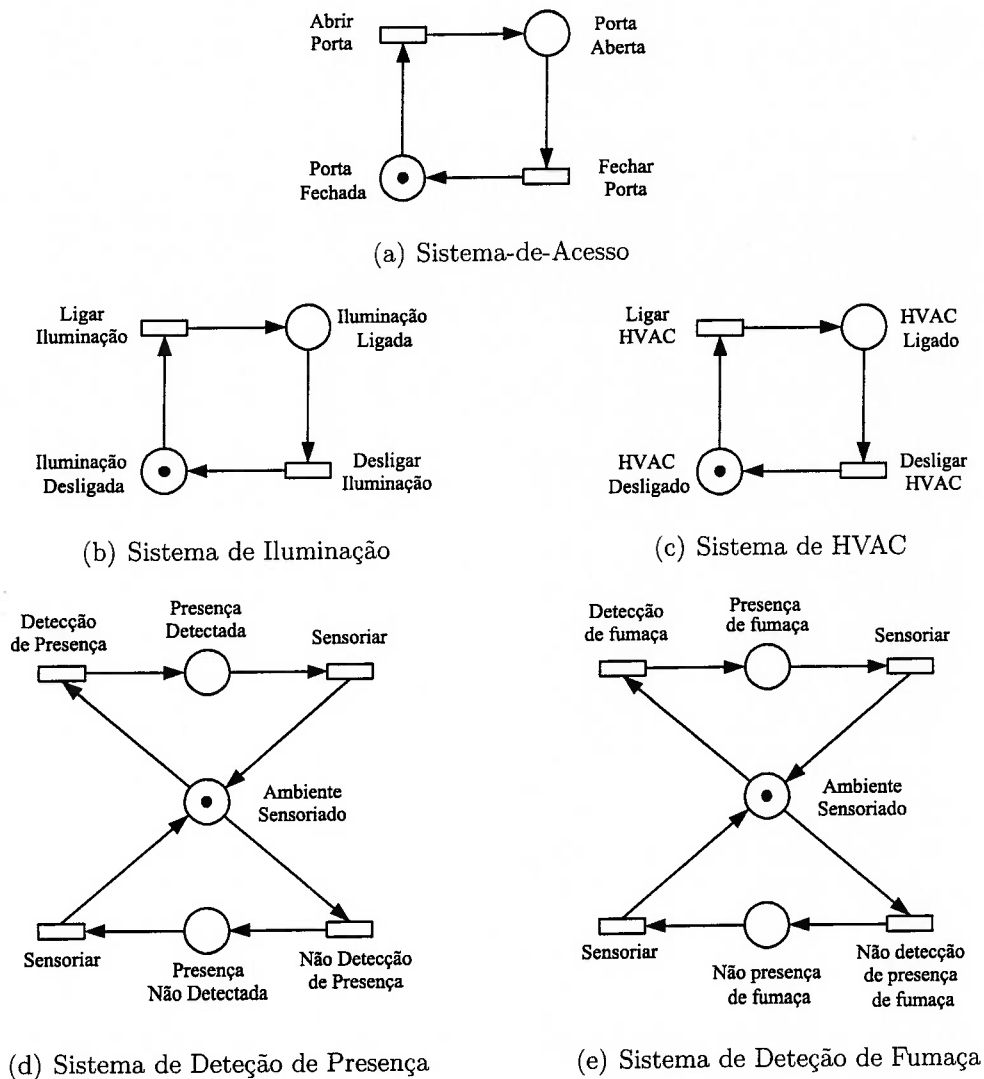
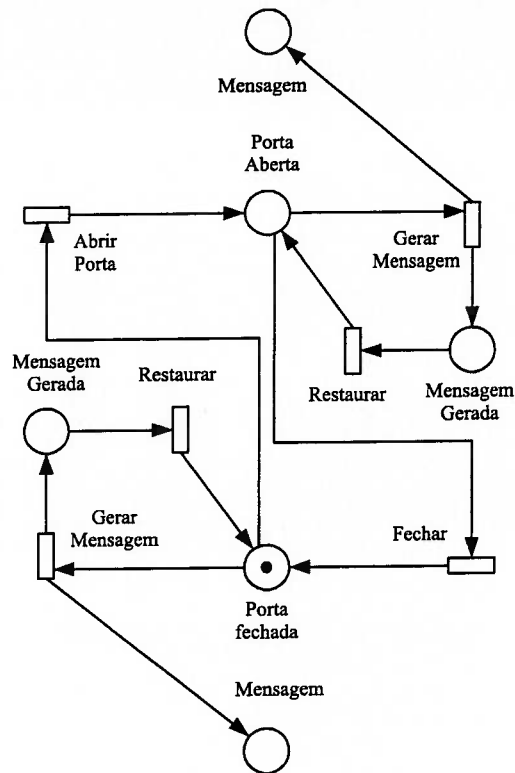


Figura 6.1: Modelos dos Sistemas de Automação do Prédio

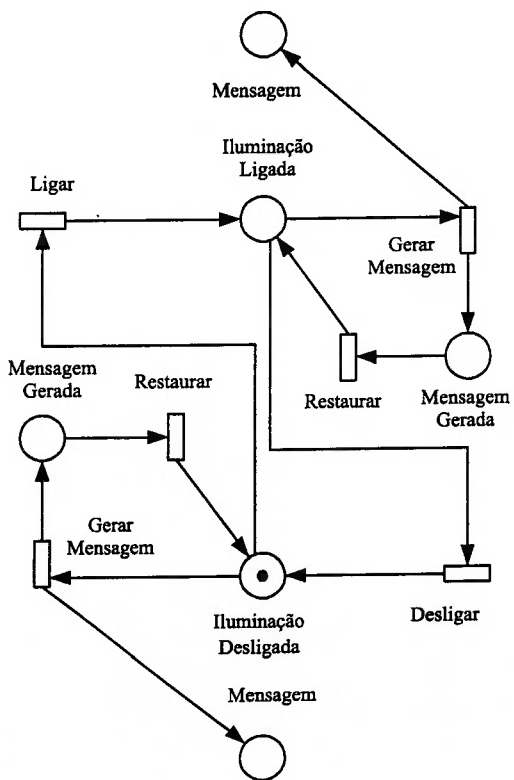
### 6.4.1 Modelos dos Objetos com o Sistema de Mensagens

A figura 6.2 apresenta os modelos dos Objetos do prédio com o correspondente sistema de mensagens.

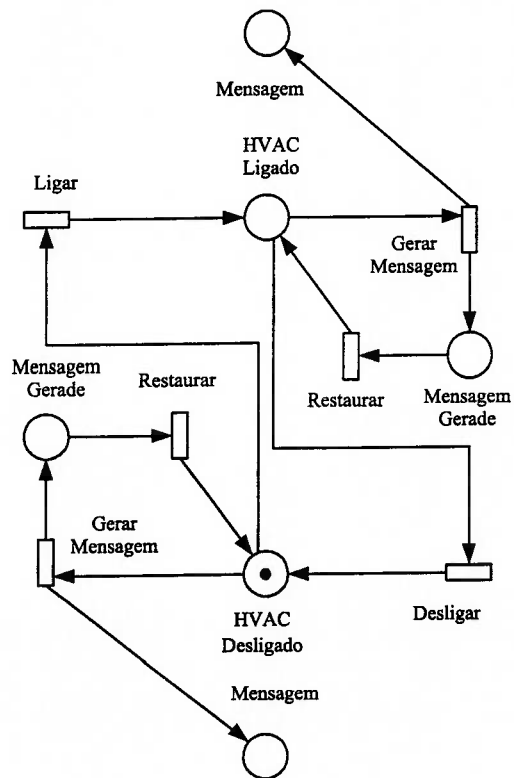




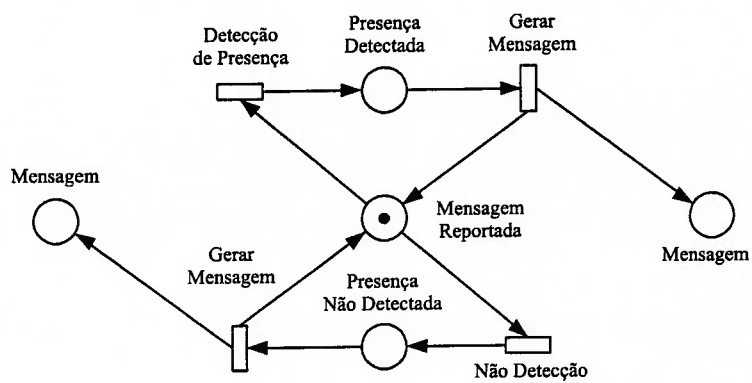
(a) Sistema de Acesso



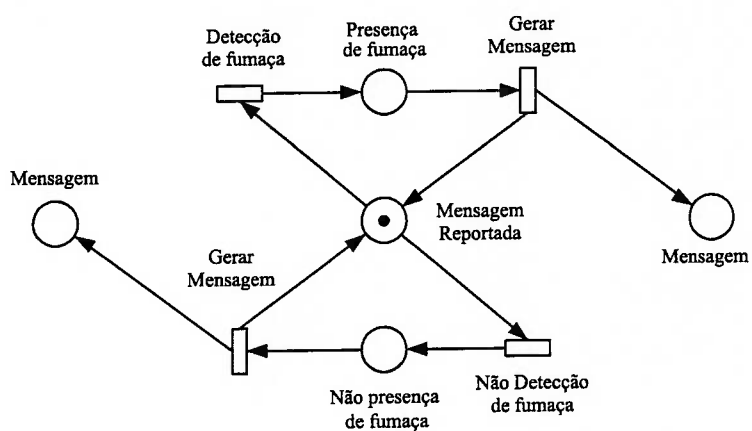
(b) Sistema de Iluminação



(c) Sistema de HVAC



(d) Sistema de Presença



(e) Sistema de Fumaça

Figura 6.2: Modelos dos Sistemas de Automação do Prédio com o Sistema de mensagens

## 6.4.2 Modelos dos Objetos de Controle

Realiza-se o controle em cada área do prédio utilizando as regras de controle, com base nas sinais dos sistemas de sensores (deteção de presença e fumaça), causando ou inibindo eventos nos dispositivos do prédio. Cada objeto de controle apresenta um subsistema *Planta-Controlre* do prédio, por tanto é possível considerar o controle do prédio como um conjunto de instâncias dos objetos de controle. A seguir apresentam-se os modelos dos objetos de controle do sistema.

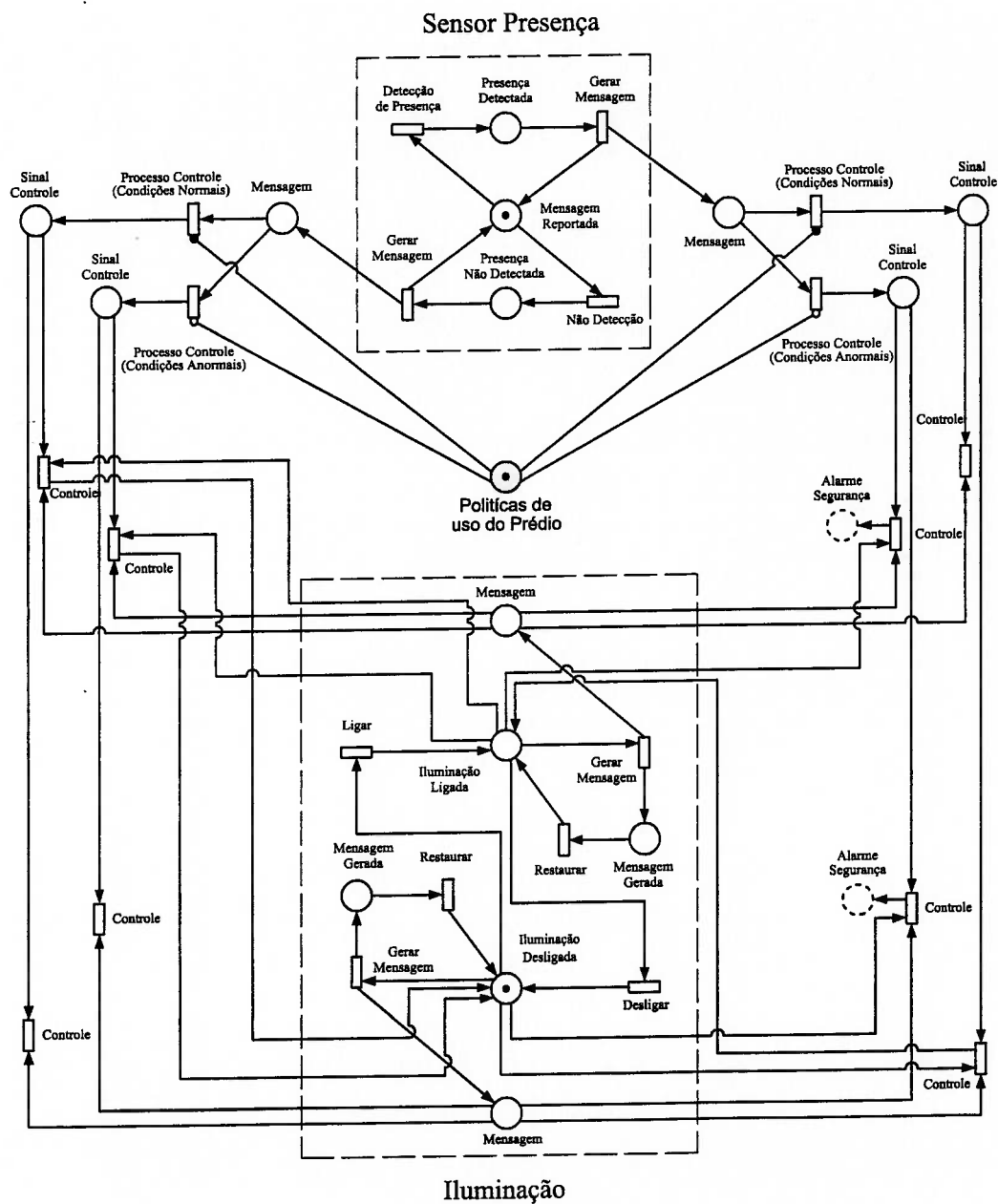


Figura 6.3: Modelo do Objeto Presença Iluminação Interior

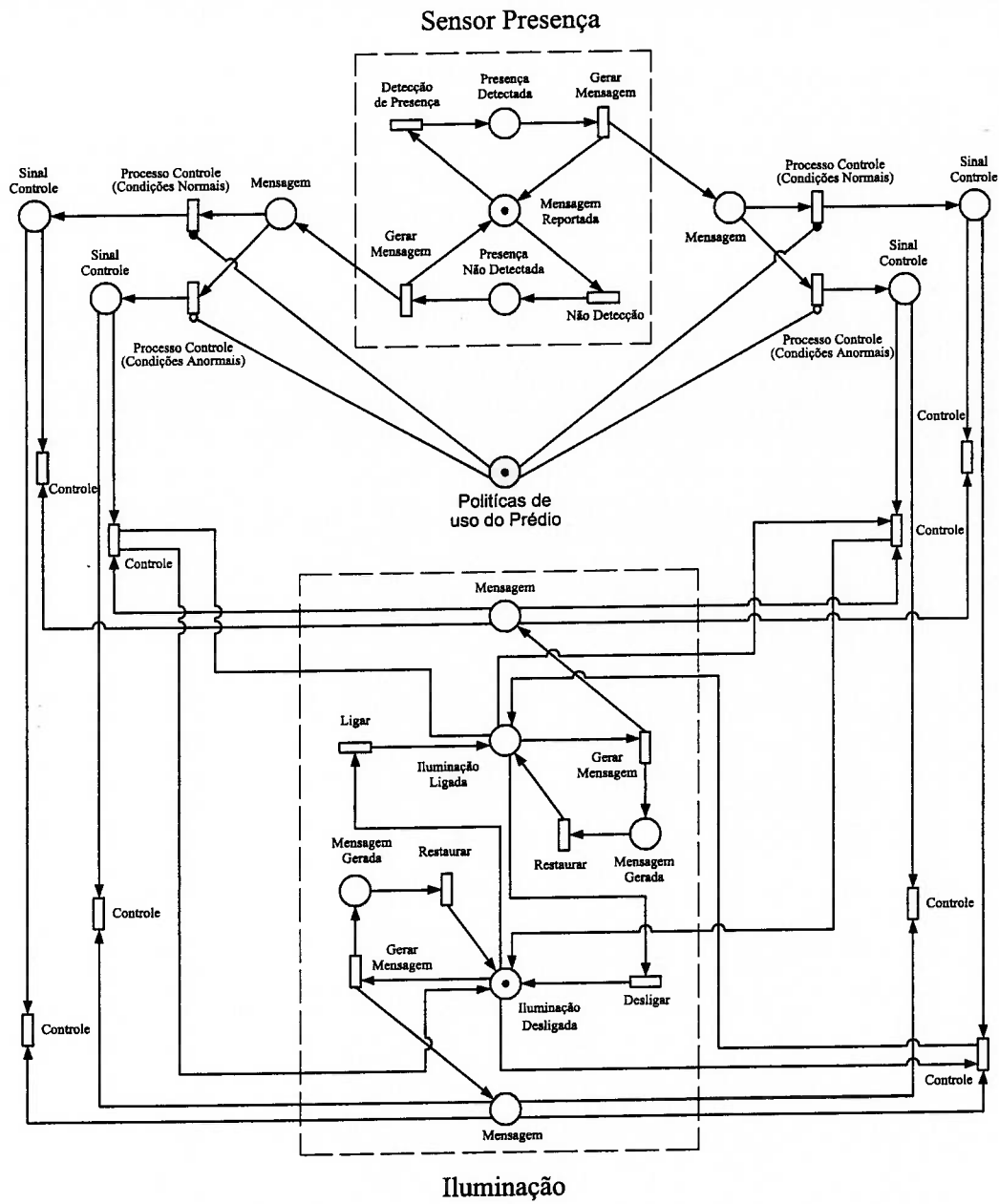


Figura 6.4: Modelo do Objeto Presença Iluminação Exterior

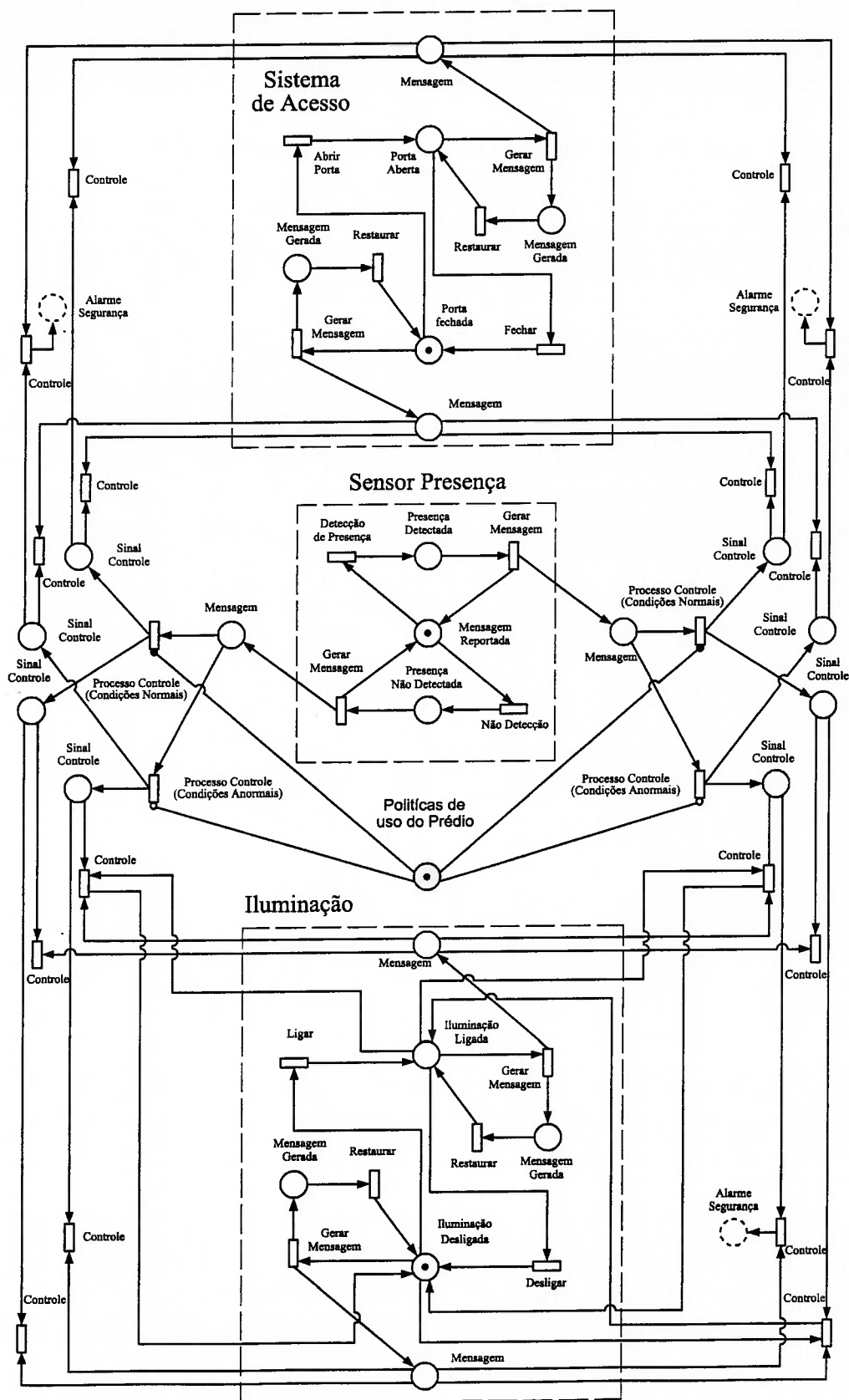


Figura 6.5: Modelo do Objeto Presença Acesso Iluminação

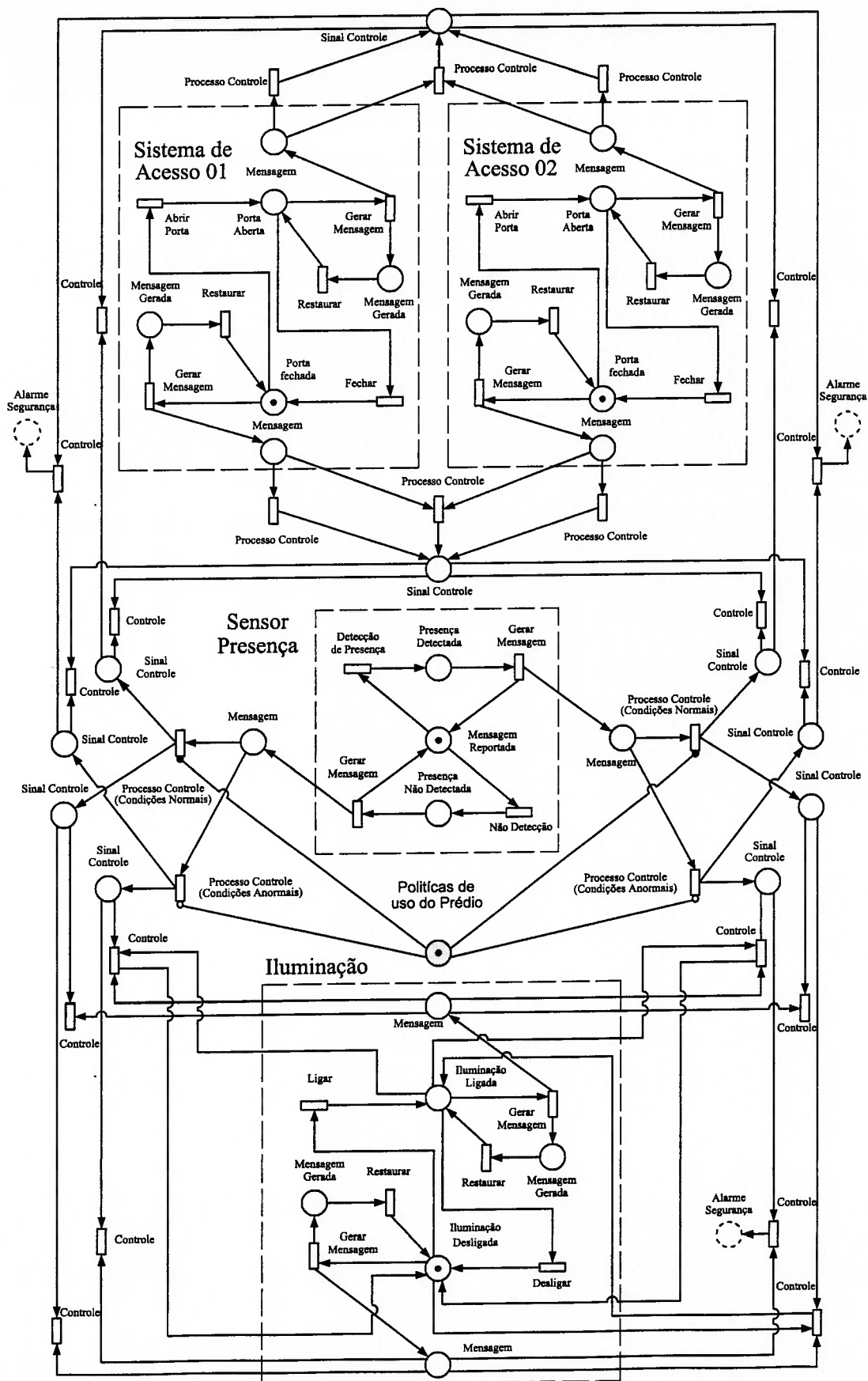


Figura 6.6: Modelo do Objeto Duplo Acesso Iluminação Presença

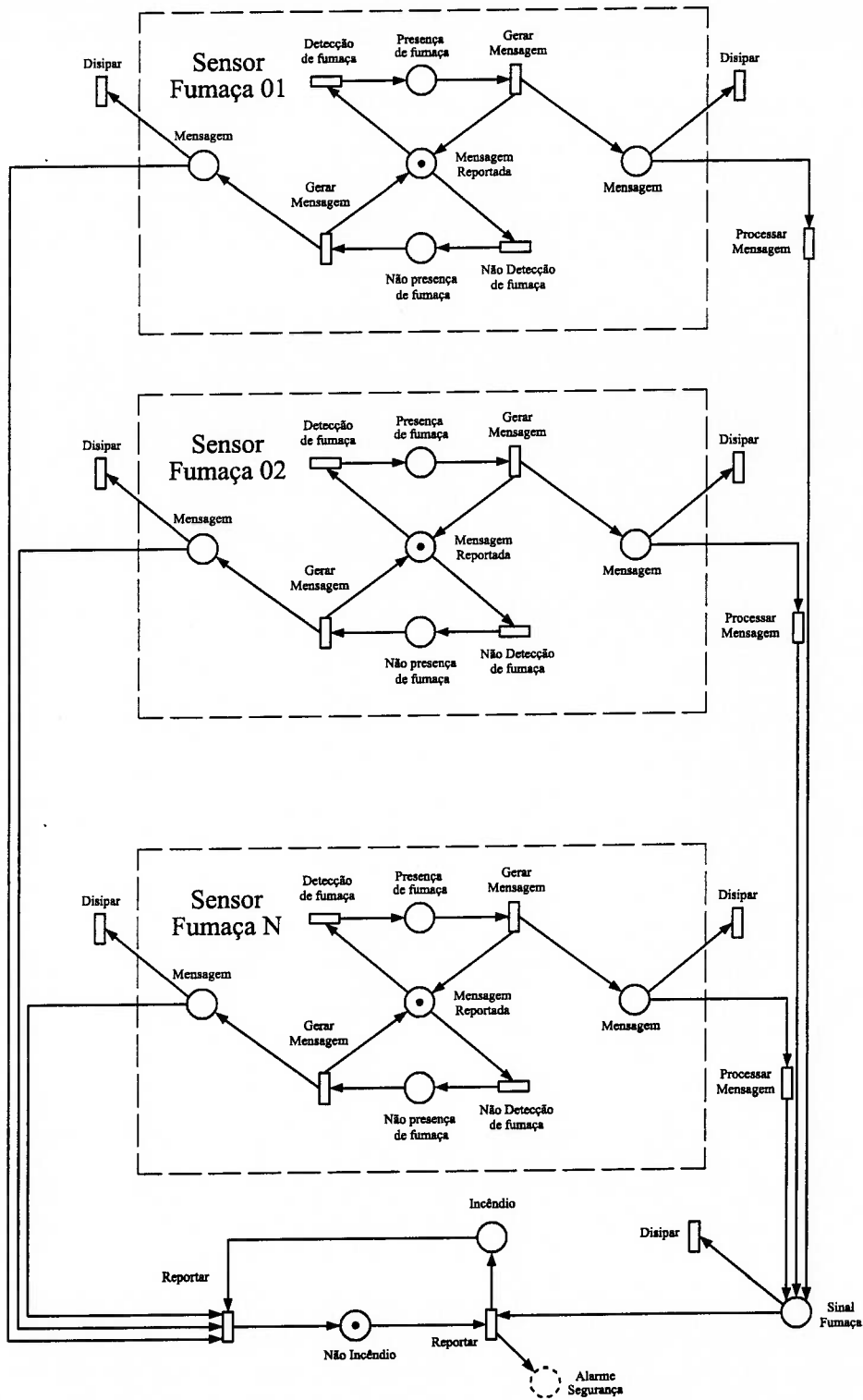


Figura 6.7: Modelo do Objeto Detecção de Incêndios

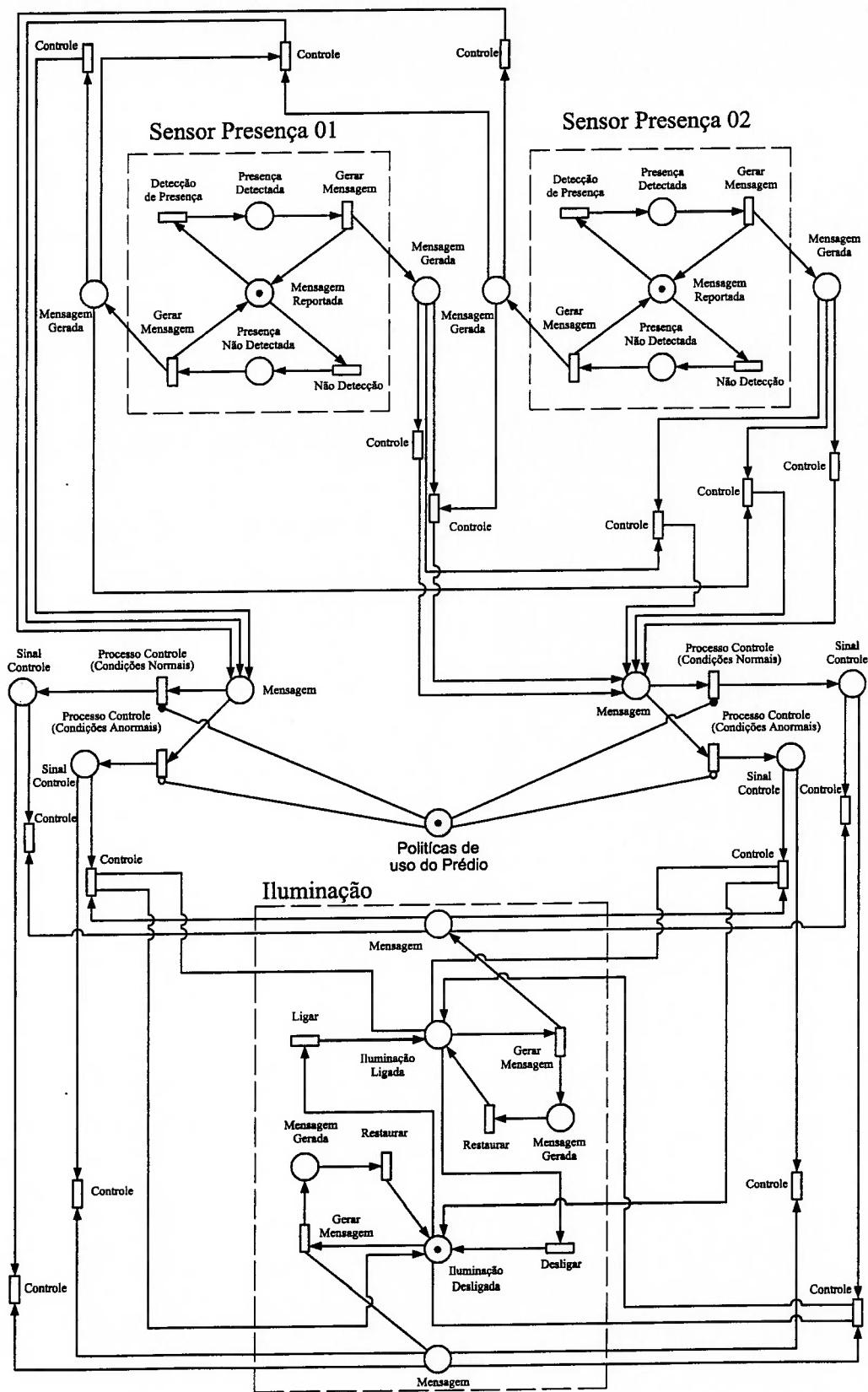


Figura 6.8: Modelo do Objeto Duplo Presença Iluminação Exterior



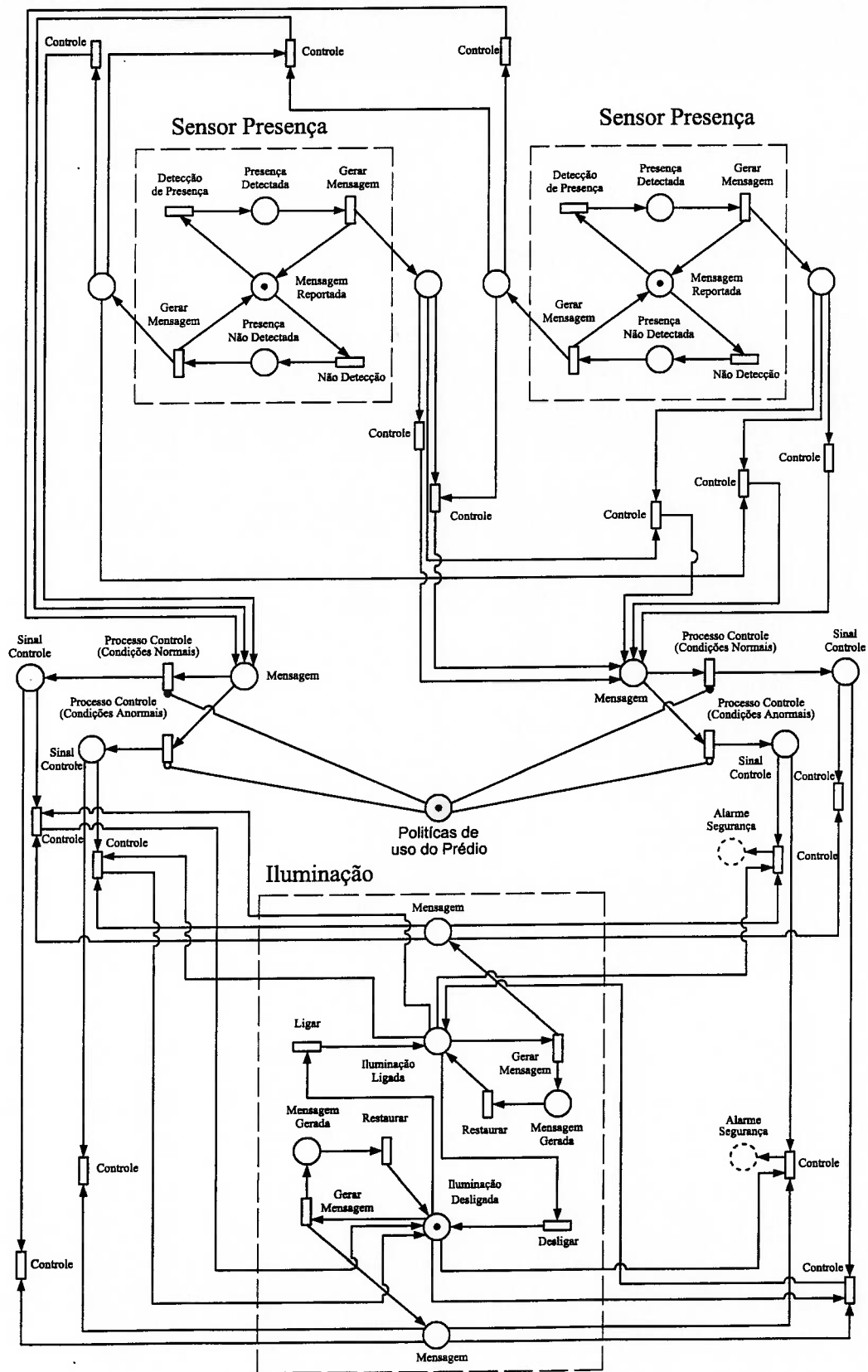


Figura 6.9: Modelo do Objeto Duplo Presença Iluminação Interior

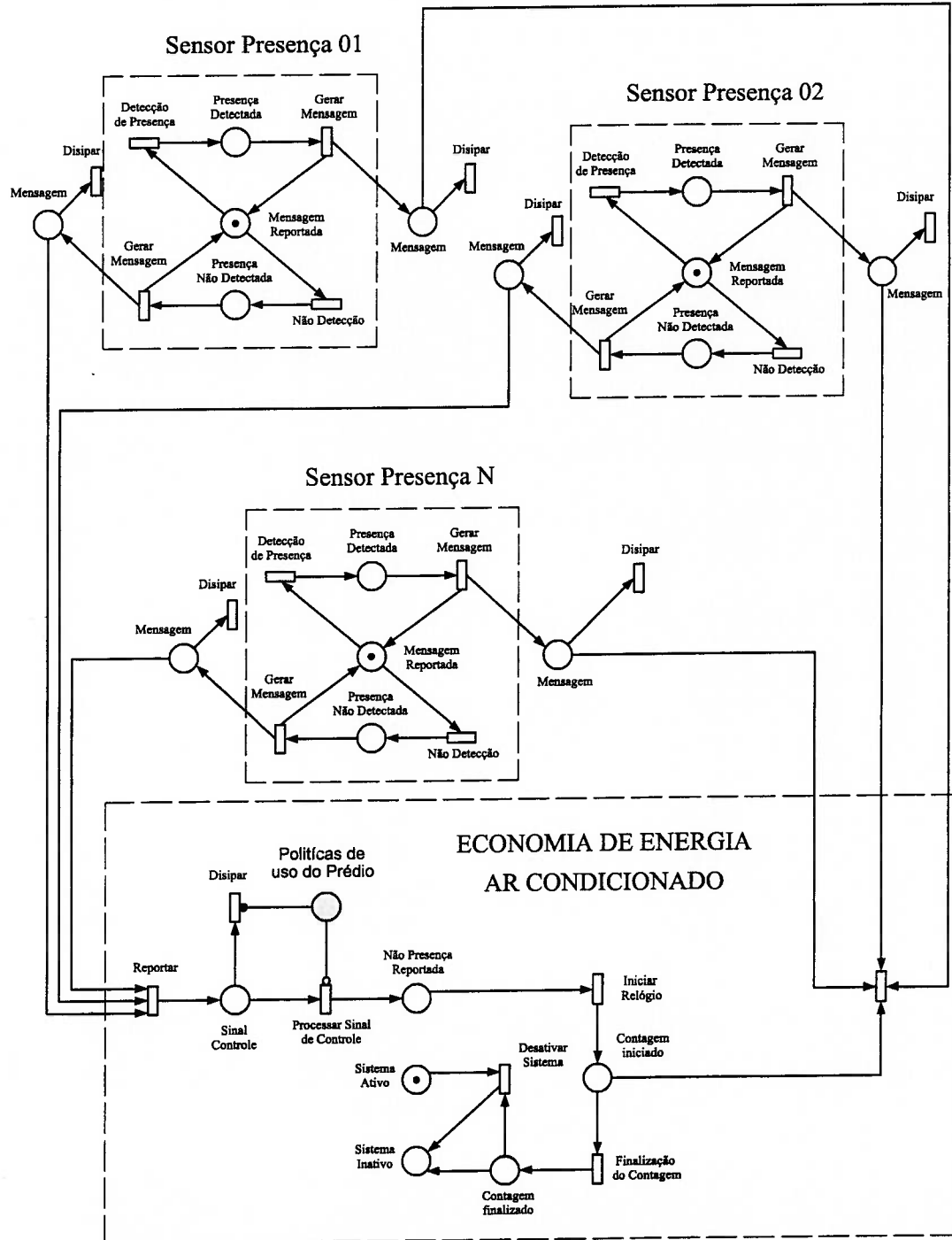


Figura 6.10: Modelo do Objeto Economia de Energia do HVAC

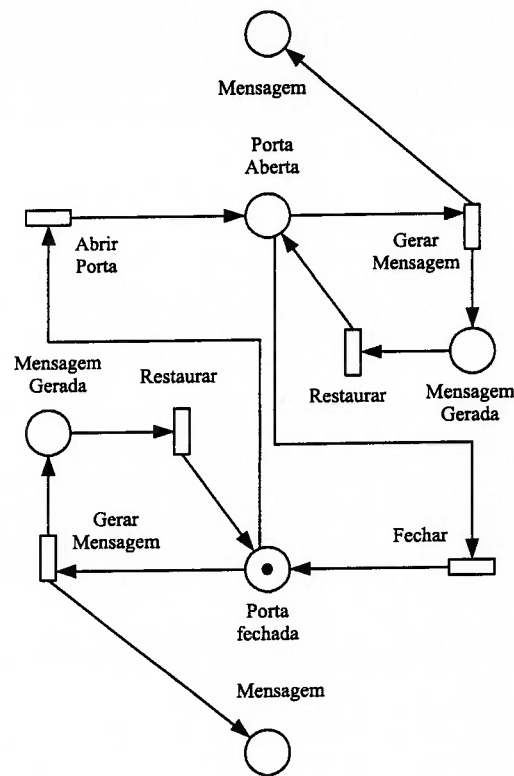


Figura 6.11: Modelo do Objeto Sistema Acesso

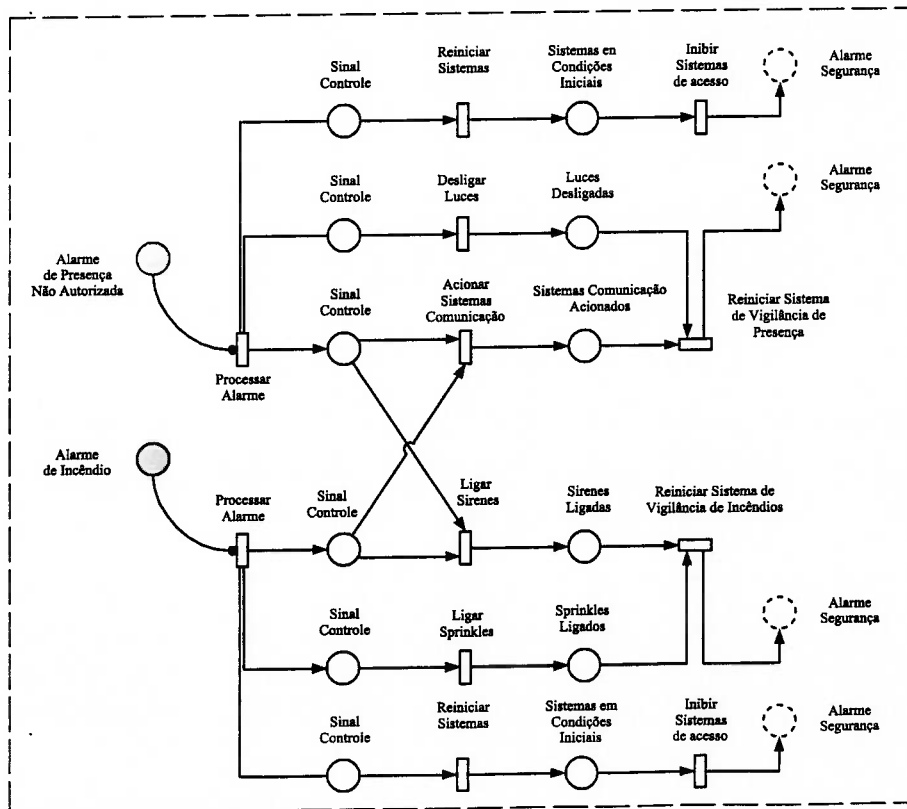


Figura 6.12: Modelo do Objeto Sistema Vigilância

O Sistema de Vigilância gera alarmes que bloqueiam a ocorrência de certos eventos, é dizer inabilita algumas transições, assim alguns modelos dos objetos de control precisam incorporar mecanismos de resposta às alarmes do sistema de vigilância. Na *GHENeSys* o método natural para fazer isto é com um PseudoBox cuja marcação depende de condições externas, neste caso da ocorrência de alarmes. Os Modelos dos Objetos Incorporando o mecanismo de comunicação das alarmes se apresentam a seguir.

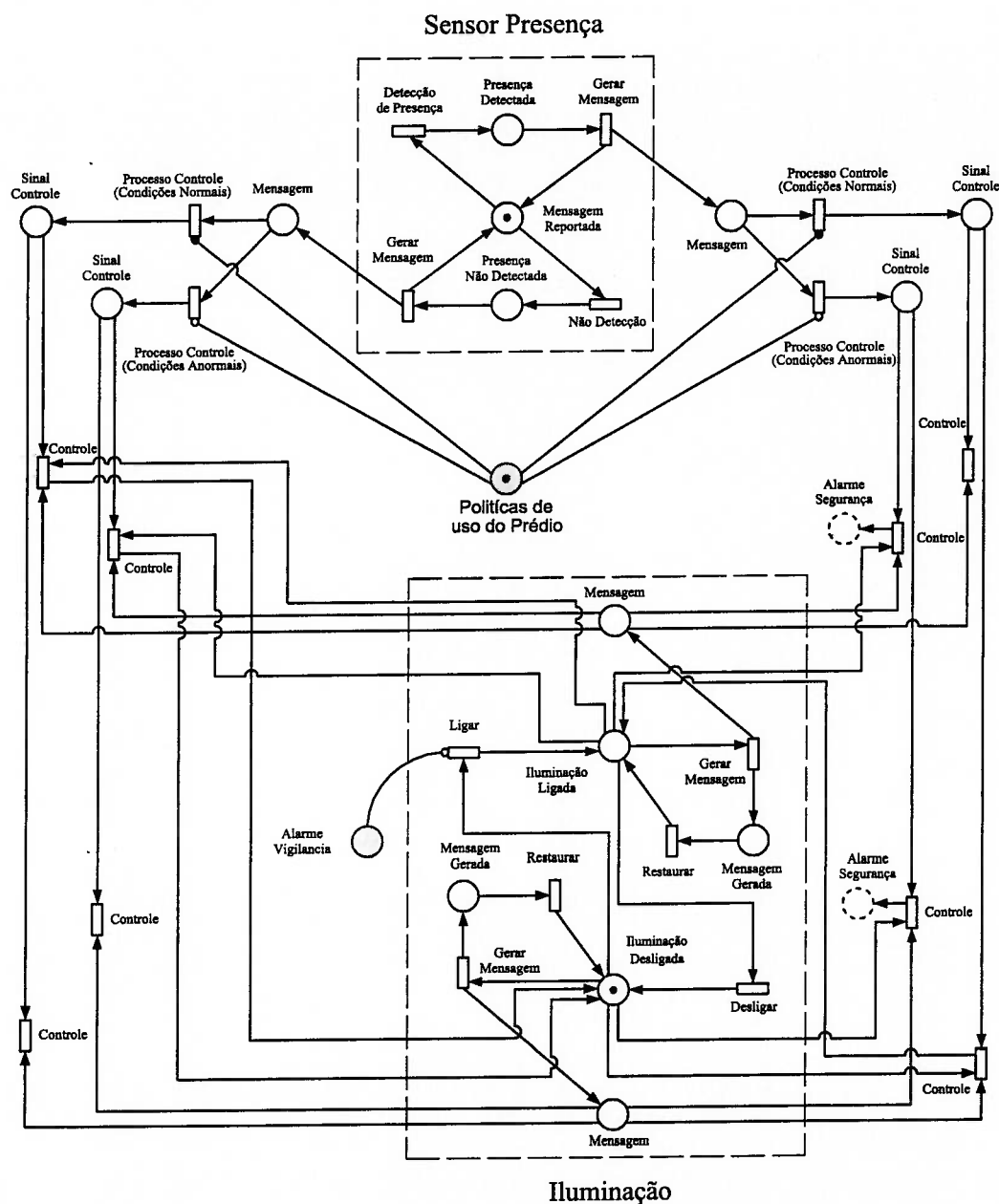


Figura 6.13: Modelo do Objeto Presença Iluminação Vigilância

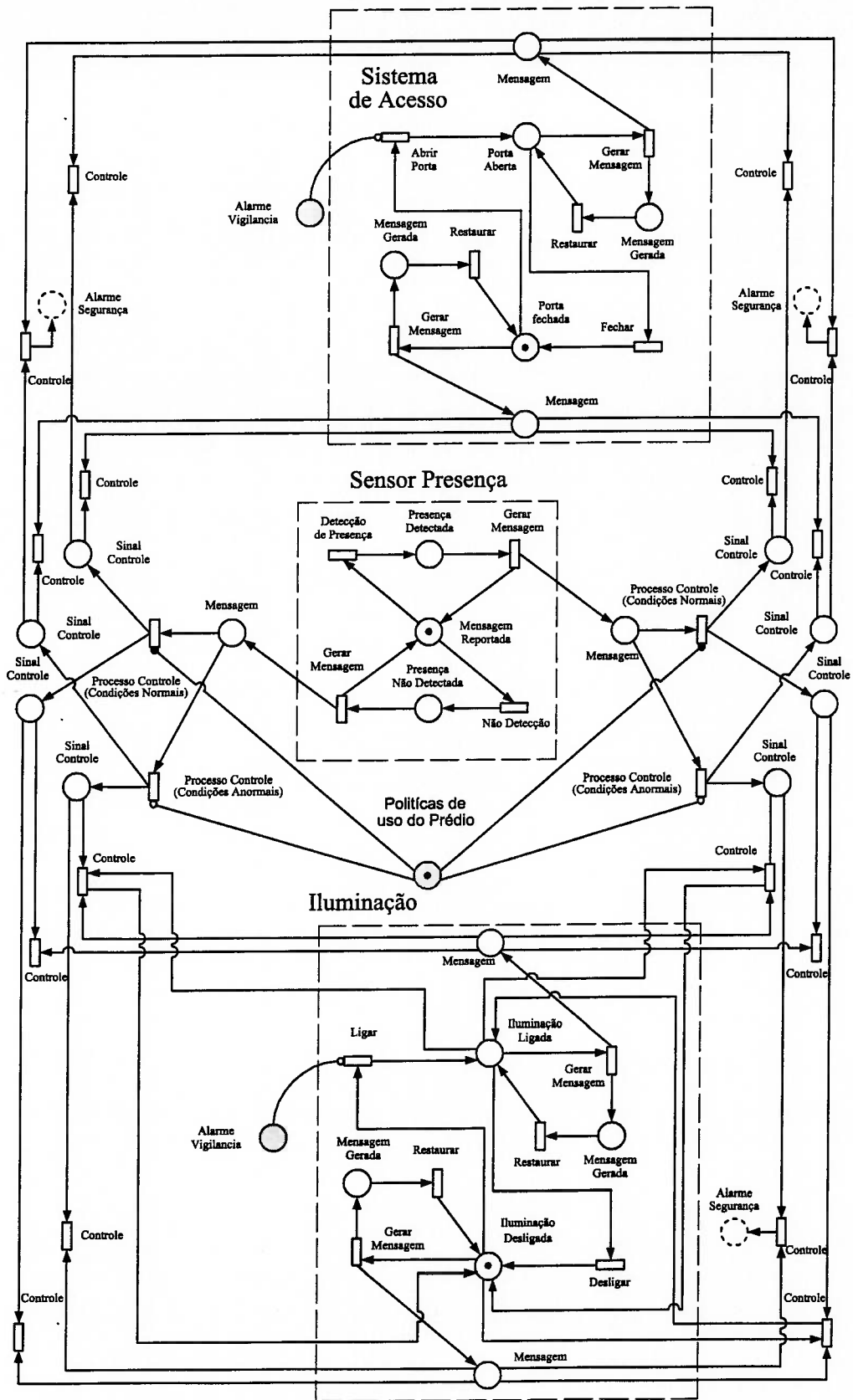


Figura 6.14: Modelo do Objeto Presença Iluminação Acesso Vigilância

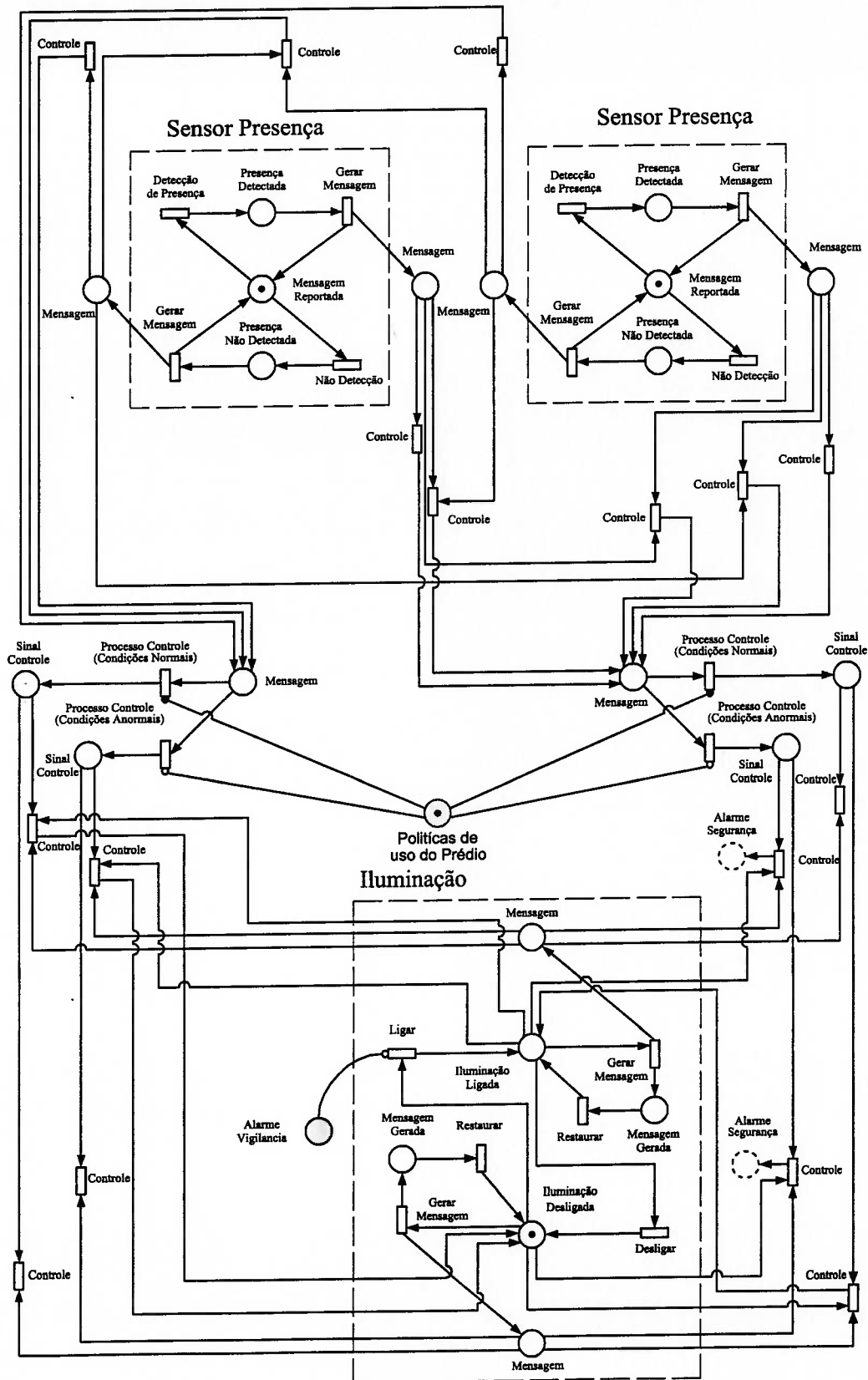


Figura 6.15: Modelo do Objeto Duplo Acesso Iluminação Presença Vigilância

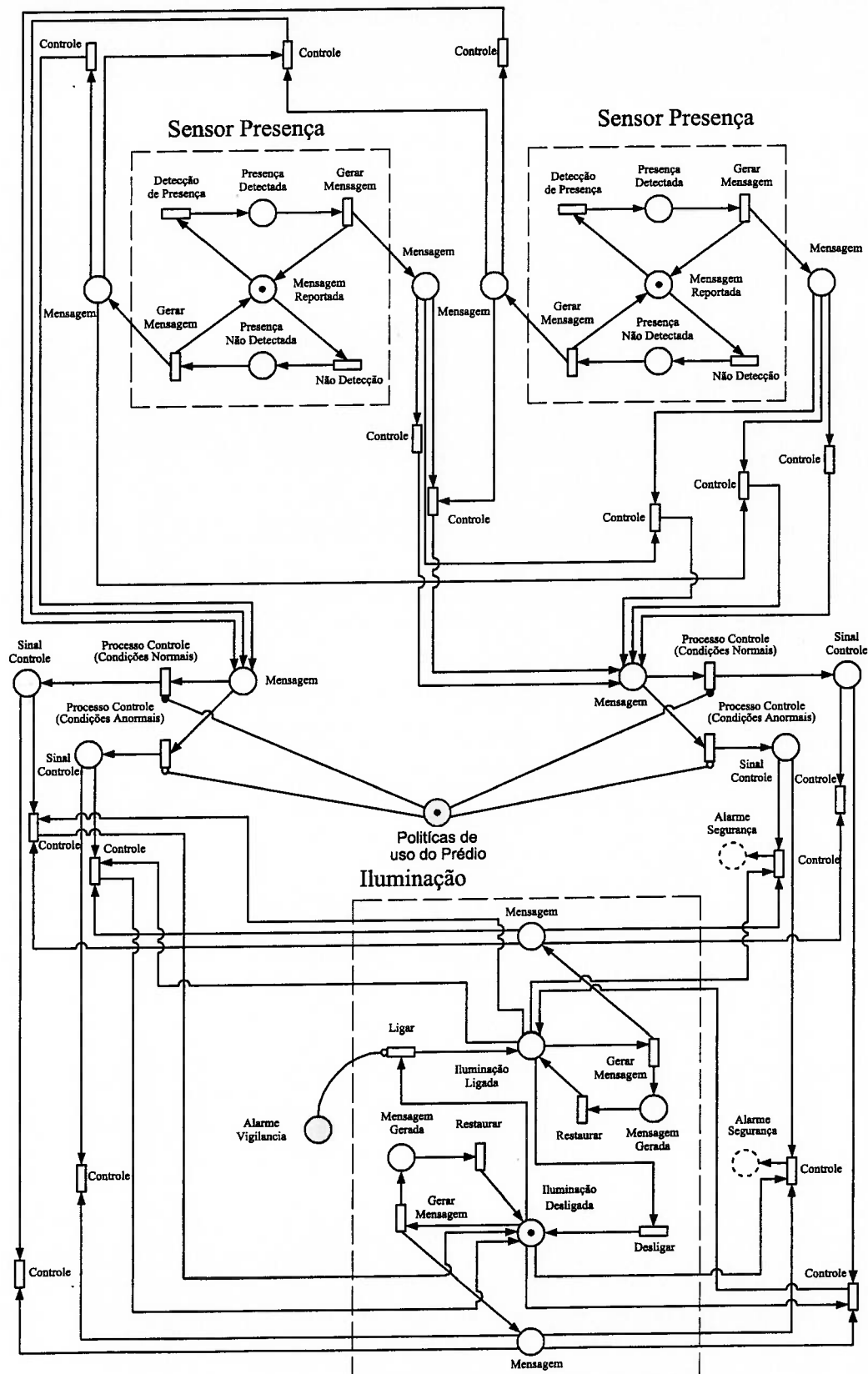


Figura 6.16: Modelo do Objeto Duplo Presença Iluminação Interior Vigilância

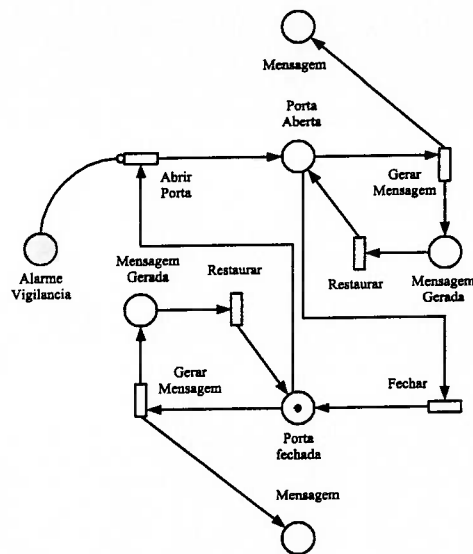


Figura 6.17: Modelo do Objeto Acesso Vigilância

## 6.5 Encapsulamento dos Objetos em MacroElementos

O Encapsulamento permite isolar uma rede em um MacroElemento, a seguir apresentam-se os modelos dos objetos do controle do prédio.



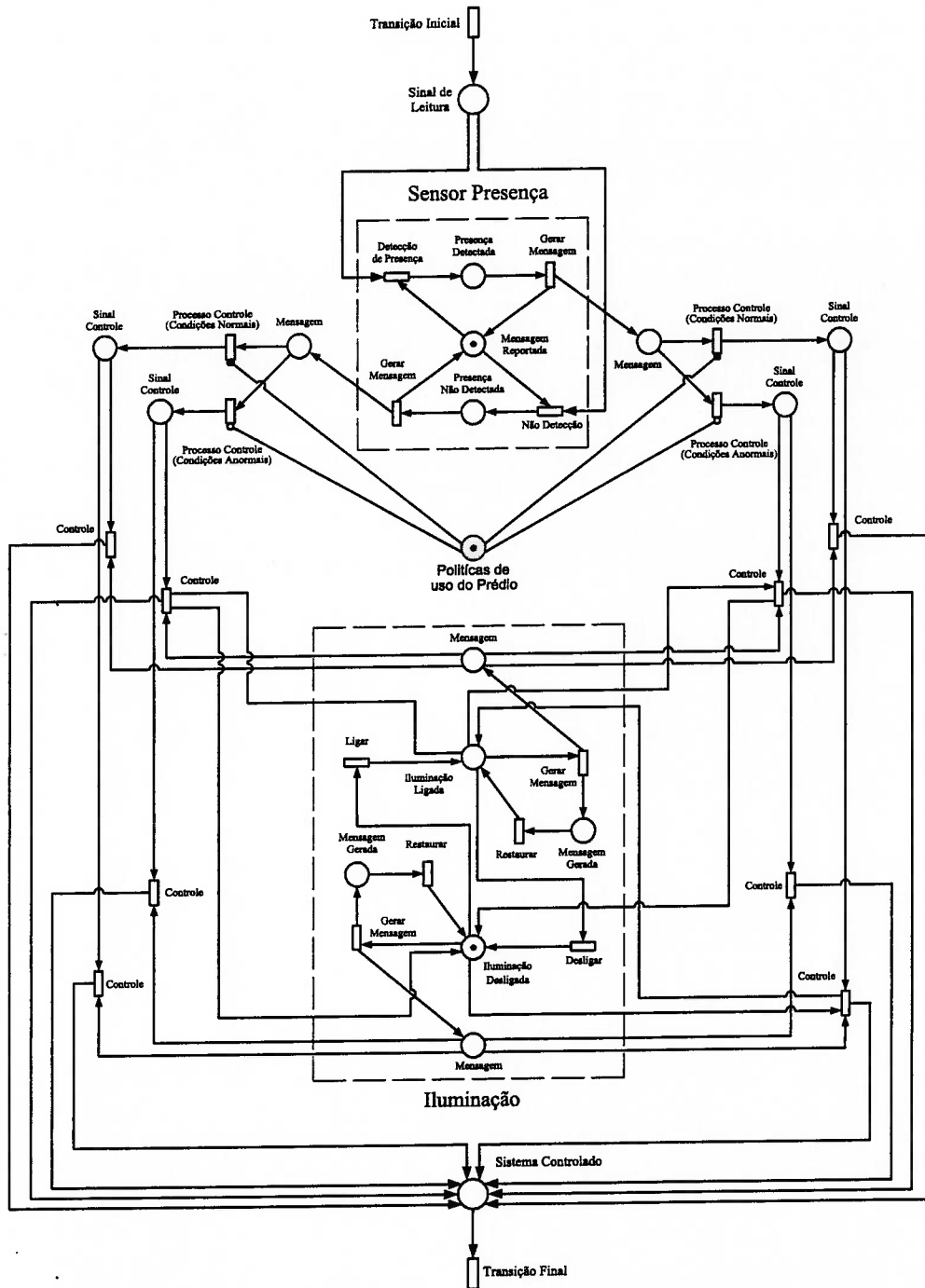


Figura 6.18: Encapsulamento do Objeto Presença Iluminação Exterior

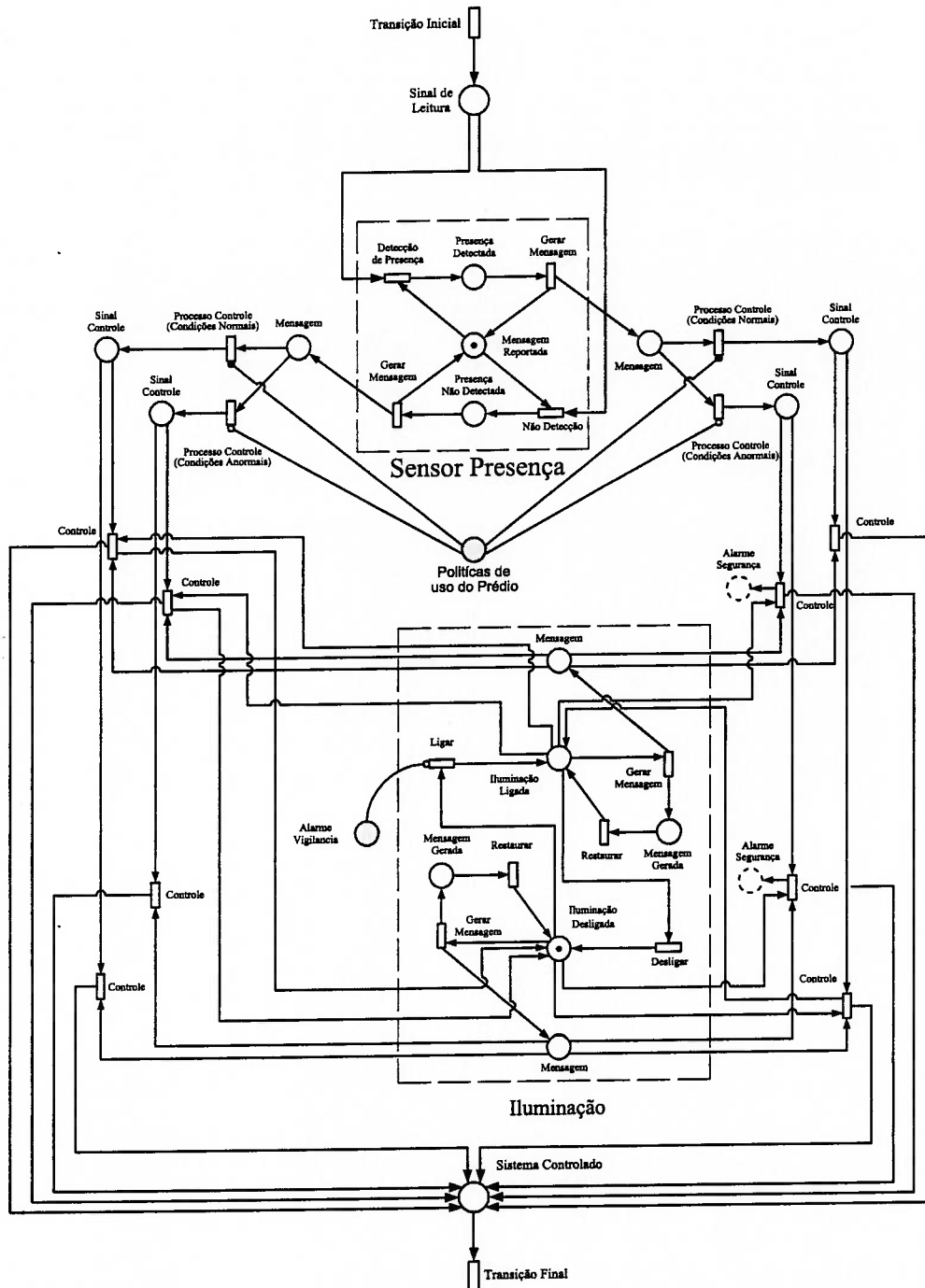


Figura 6.19: Encapsulamento do Objeto Presença Iluminação Interior Vigilância

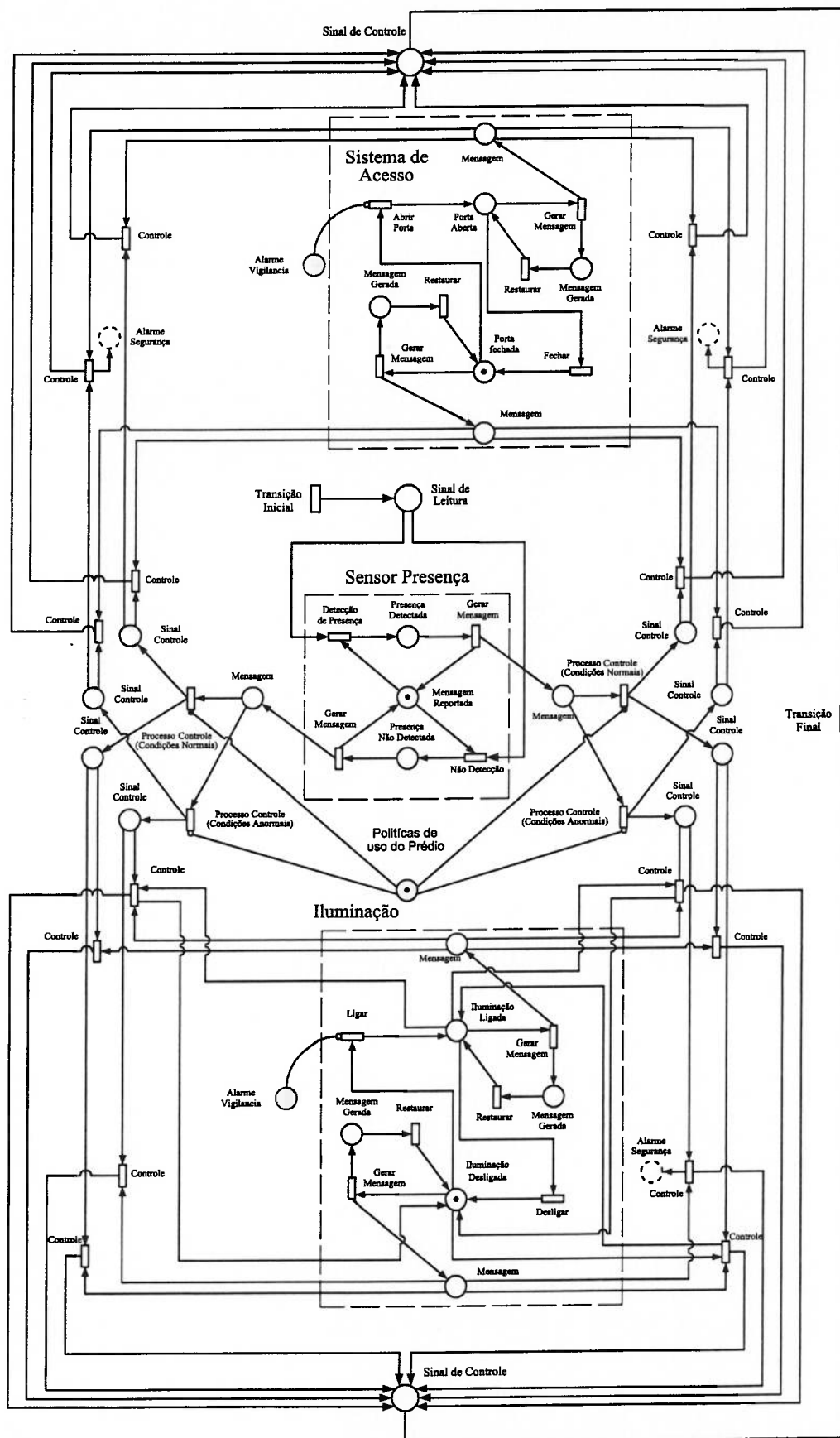


Figura 6.20: Encapsulamento do Objeto Presença Iluminação Acesso Vigilância

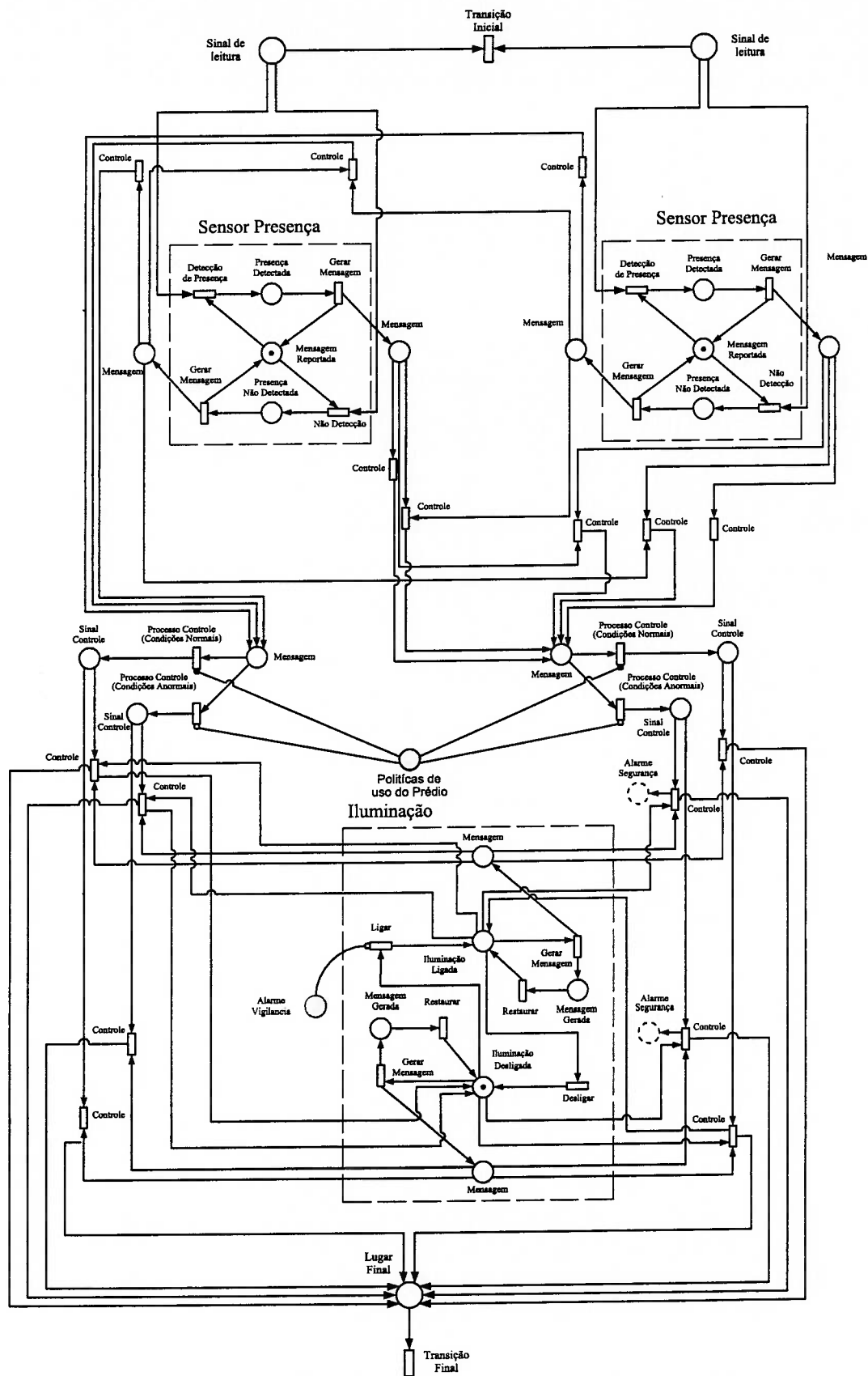


Figura 6.21: Encapsulamento do Objeto Duplo Presença Iluminação Vigilância

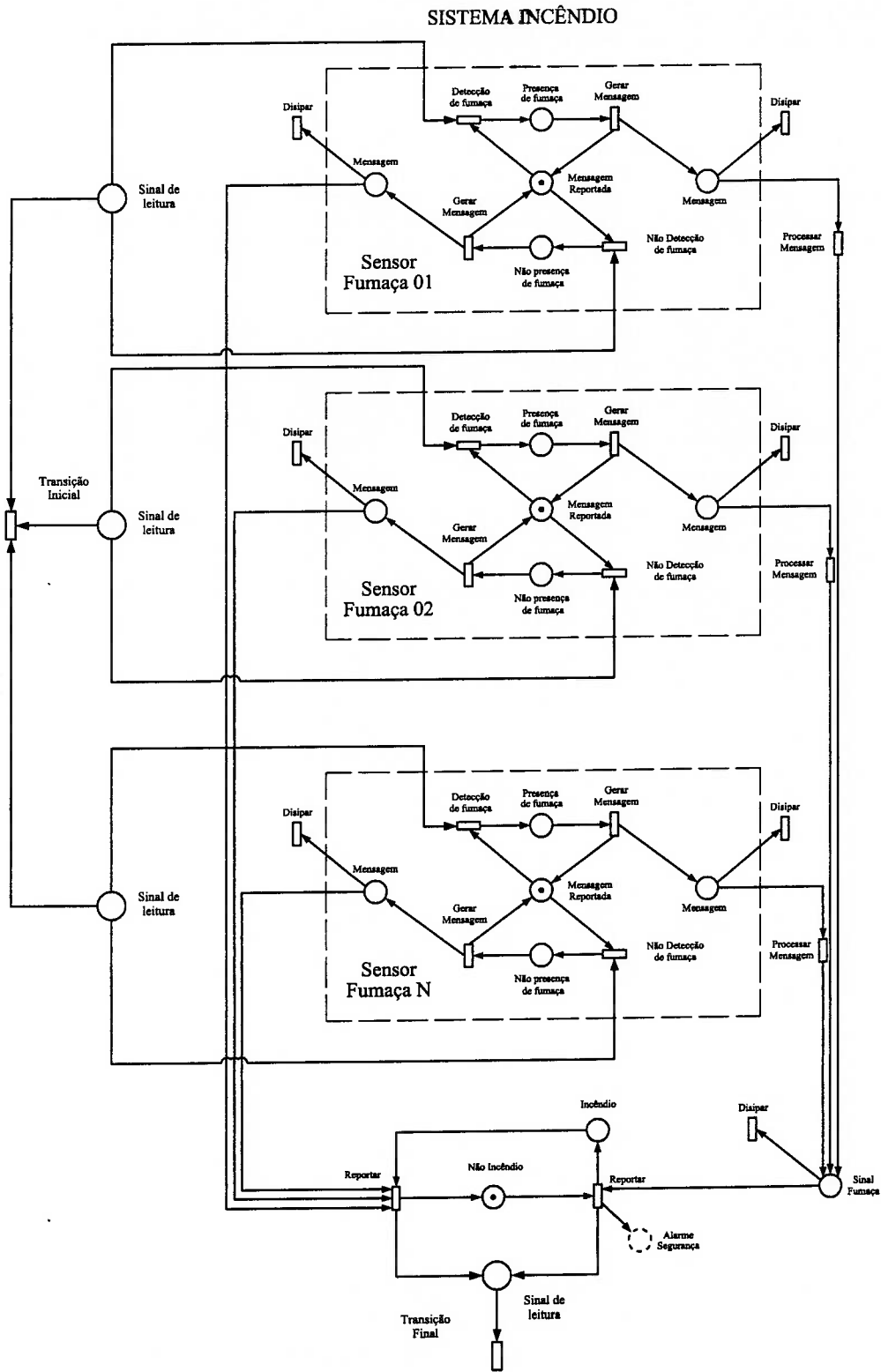


Figura 6.22: Encapsulamento do Objeto de Detecção de Incêndios

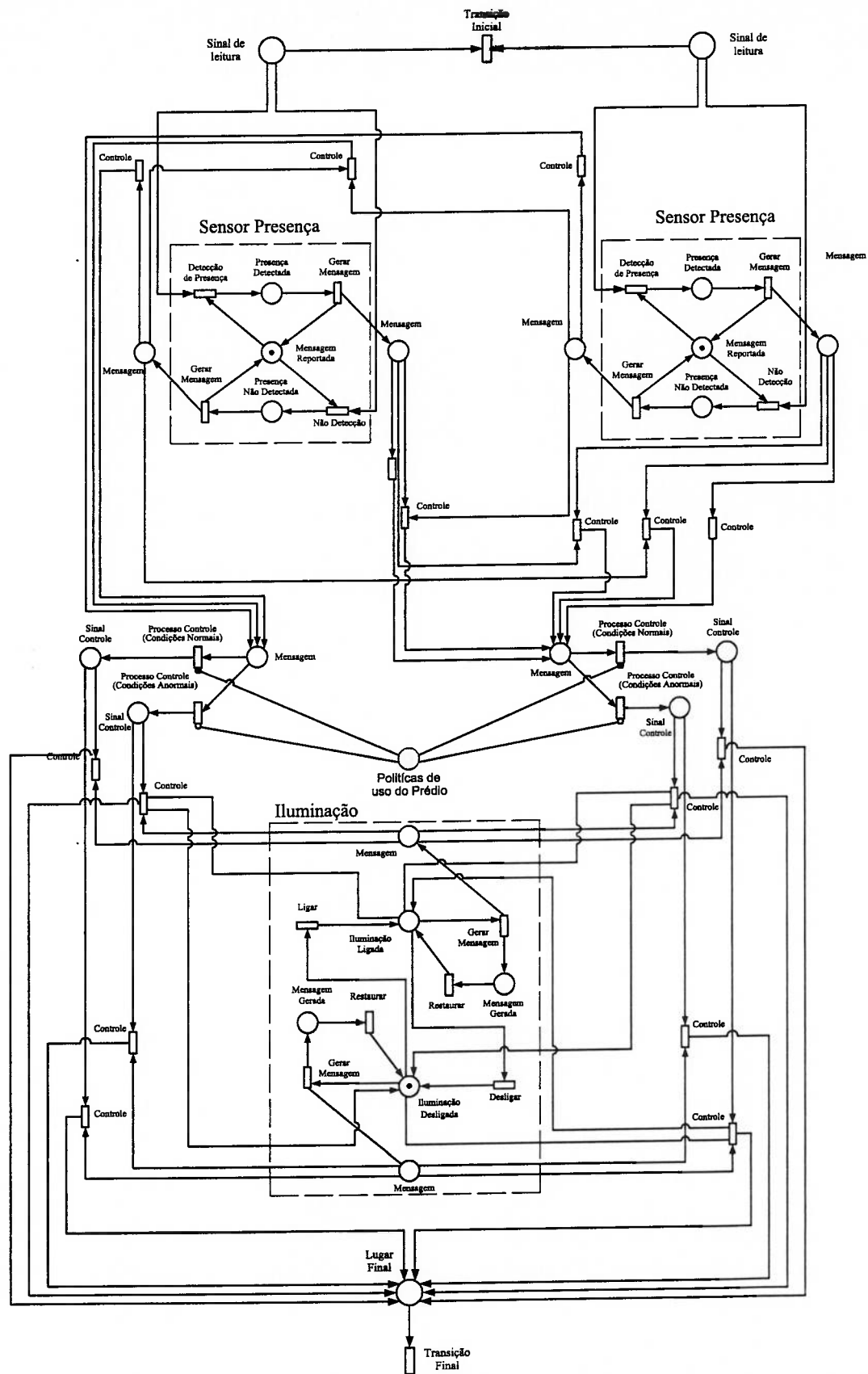


Figura 6.23: Encapsulamento do Objeto Duplo Presença Iluminação Exterior

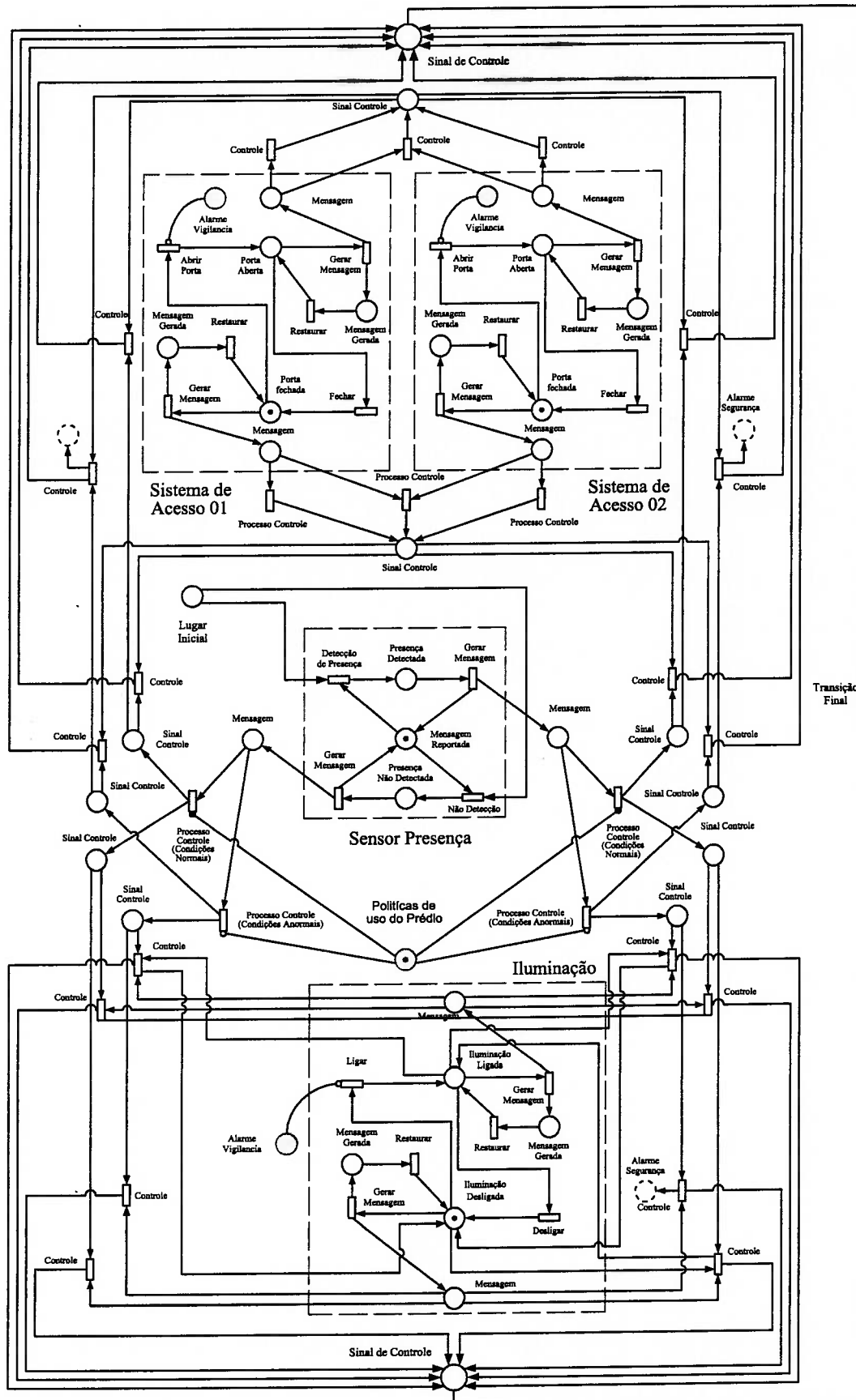


Figura 6.24: Encapsulamento do Objeto Duplo Acesso Iluminação Presença Vigilância

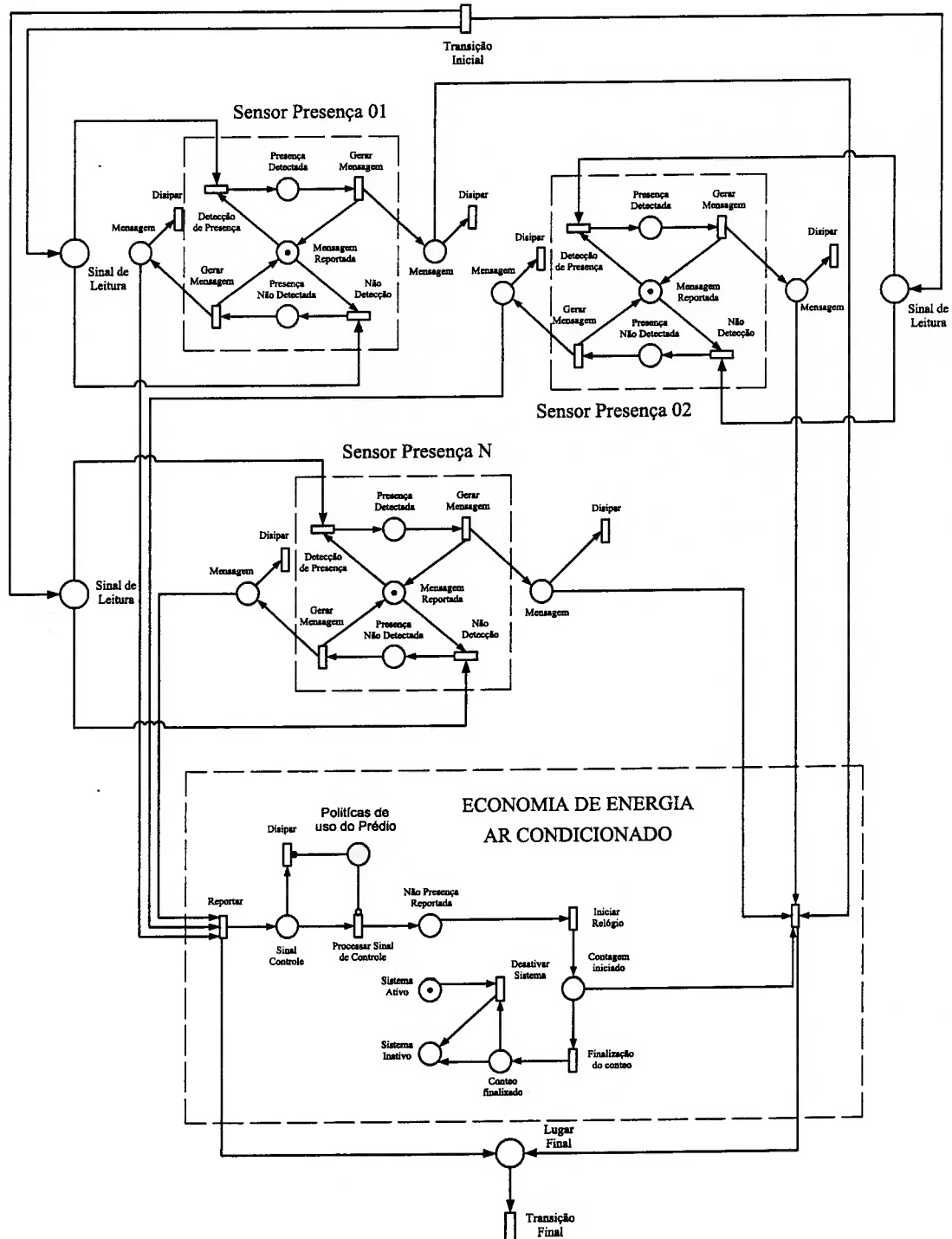


Figura 6.25: Encapsulamento do Objeto Economia de Energia do HVAC



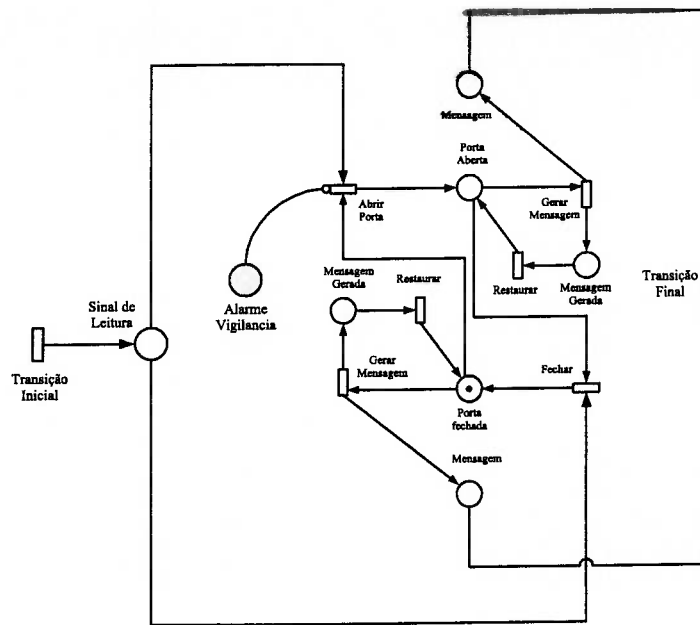


Figura 6.26: Encapsulamento do Objeto Acesso

## 6.6 Árvore de Hierarquia

Se construi com base nos objetos de controle definidos para o prédio, procurando estabelecer a hierarquia do sistema de controle, a seguir são determinadas as instâncias dos objetos de controle necessárias em cada andar.

A tabela 6.2 apresenta a hierarquia das instâncias dos objetos de controle e do andar terreo descrito nos planos A4-01, A4-05, A4-08 e A4-011. A figura 6.27 ilustra o sistema de comunicação dos MacroElementos.

A tabela 6.3 apresenta a hierarquia das instâncias dos objetos de controle do andar Subsolo 1 descrito nos planos A4-03, A4-05, A4-08 e A4-011. A figura 6.29 ilustra o sistema de comunicação dos MacroElementos.

A tabela 6.4 apresenta a hierarquia das instâncias dos objetos de controle e do andar Subsolo 2 descrito nos planos A4-03, A4-07, A4-010 e A4-13. A figura 6.29 ilustra o sistema de comunicação dos MacroElementos.

<b>Elemento</b>	<b>Tipo de Objeto</b>	<b>Referencia</b>
MA <sub>1</sub>	Sistema Acesso Vigilância	T_SA_02
MA <sub>2</sub>	Presença Iluminação Acesso Vigilância	T_PLA_01
MA <sub>3</sub>	Presença Iluminação Interior Vigilância	T_PL_I.01
MA <sub>4</sub>	Sistema HVAC	T_HVAC_01
MA <sub>5</sub>	Presença Iluminação Interior Vigilância	T_PL_I.02
MA <sub>6</sub>	Presença Iluminação Interior Vigilância	T_PL_I.03
MA <sub>7</sub>	Presença Iluminação Acesso(2)Vigilância	T_PLA(2)_01
MA <sub>8</sub>	Presença Iluminação Exterior	T_PL_E.01
MA <sub>9</sub>	Presença(2) Iluminação Exterior	T.SP(2)_L.03
MA <sub>10</sub>	Presença Iluminação Exterior	T_PL_E.02
MA <sub>11</sub>	Sistema Acesso Vigilância	T_SA_02
MA <sub>12</sub>	Sistema Acesso Vigilância	T_SA_03
MA <sub>13</sub>	Presença Iluminação Exterior	T_PL_E.03
MB <sub>14</sub>	Sistema Acesso Vigilância	T_SA_03
MA <sub>15</sub>	Sistema HVAC	T_HVAC_02
MA <sub>16</sub>	Presença Iluminação Exterior	T_PL_E.04
MA <sub>17</sub>	Presença Iluminação Exterior	T_PL_E.05
MA <sub>18</sub>	Sistema Detecção Fumaça	T_DF_01

Tabela 6.2: Objetos de Controle do Andar Terreo

<b>Elemento</b>	<b>Tipo de Objeto</b>	<b>Referencia</b>
MA <sub>1</sub>	Sistema HVAC	S1_HVAC.01
MA <sub>2</sub>	Presença(2) Iluminação Interior Vigilância	S1.SP(2)_L.I.03
MA <sub>3</sub>	Sistema Detecção Fumaça	S1_DF_01
MA <sub>4</sub>	Presença Iluminação Interior Vigilância	S1_PL_I.01
MA <sub>5</sub>	Sistema HVAC	S1_HVAC.02
MA <sub>6</sub>	Presença Iluminação Interior Vigilância	S1_PL_I.02
MA <sub>7</sub>	Presença Iluminação Interior Vigilância	S1_PL_I.03
MA <sub>8</sub>	Presença Iluminação Acesso Vigilância	S1_PLA_01
MA <sub>9</sub>	Presença Iluminação Acesso(2) Vigilância	S1_PLA(2)_01

Tabela 6.3: Objetos de Controle do Subsolo 1

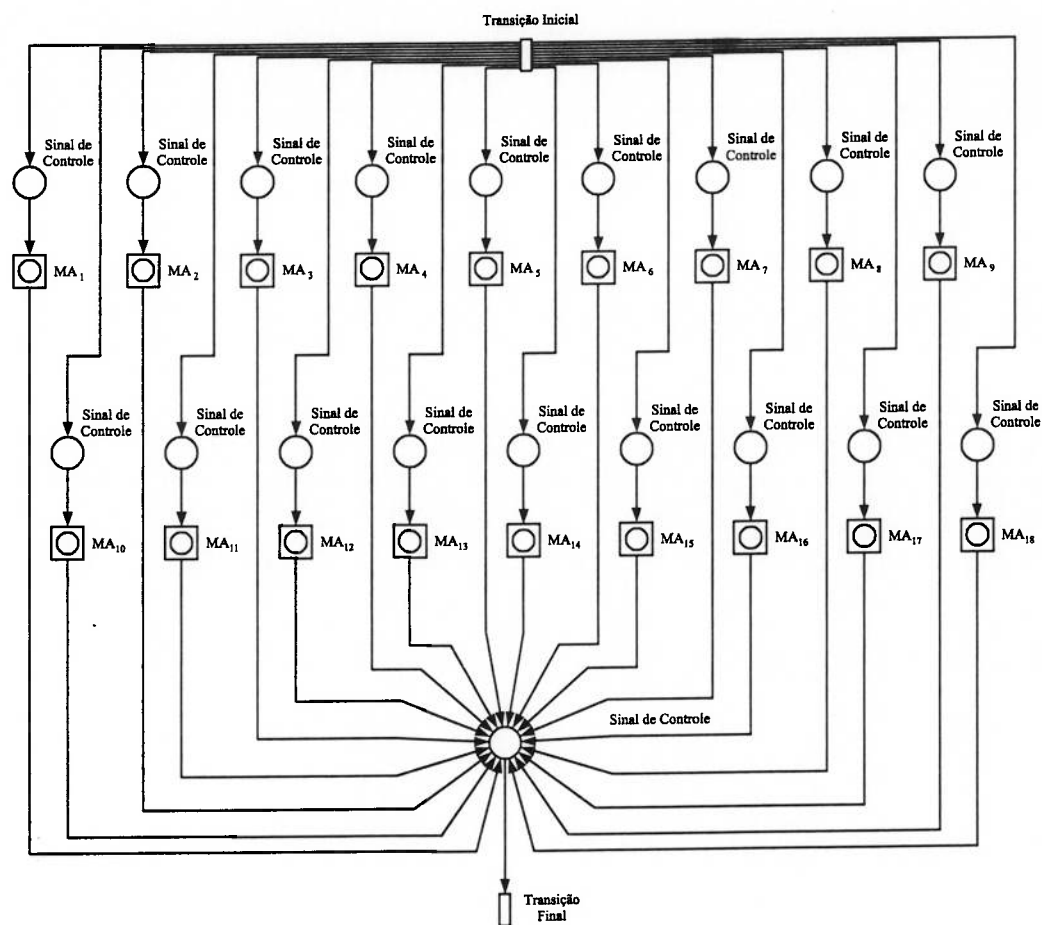


Figura 6.27: Sistema de Comunicação dos Objetos de Controle do Andar Terreo

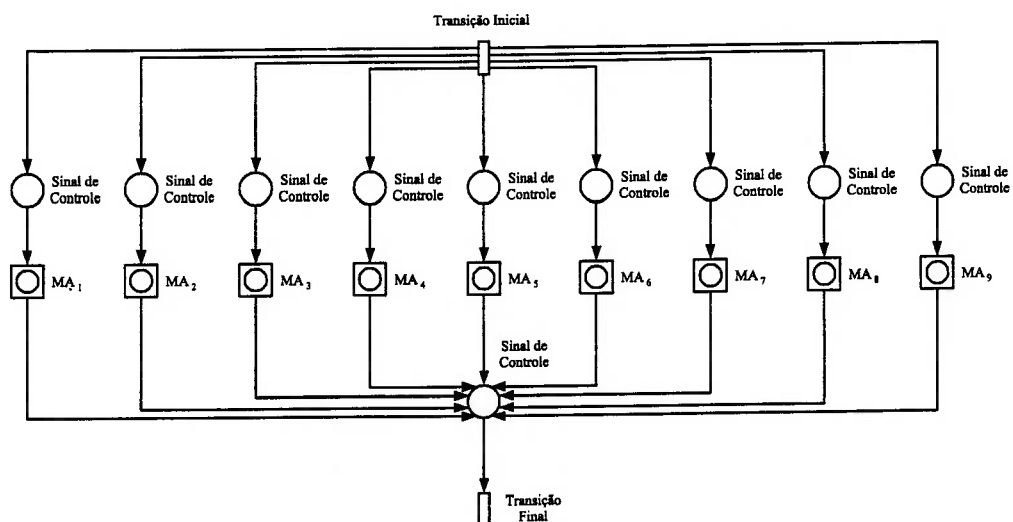


Figura 6.28: Sistema de Comunicação dos Objetos de Controle Subsolo 1

Elemento	Tipo de Objeto	Referencia
MA <sub>1</sub>	Presença Iluminação Acesso Vigilância	S2_PLA_01
MA <sub>2</sub>	Presença Iluminação Interior Vigilância	S2_PL_I.01
MA <sub>3</sub>	Presença Iluminação Acesso Vigilância	S2_PLA_02
MA <sub>4</sub>	Sistema HVAC	S2_HVAC_01
MA <sub>5</sub>	Sistema Detecção Fumaça	S2_DF_01
MA <sub>6</sub>	Presença Iluminação Interior Vigilância	S2_PL_I.02
MA <sub>7</sub>	Presença Iluminação Interior Vigilância	S2_PL_I.03
MA <sub>8</sub>	Sistema Acesso Vigilância	S2_SA_02

Tabela 6.4: Objetos de Controle do Subsolo 2

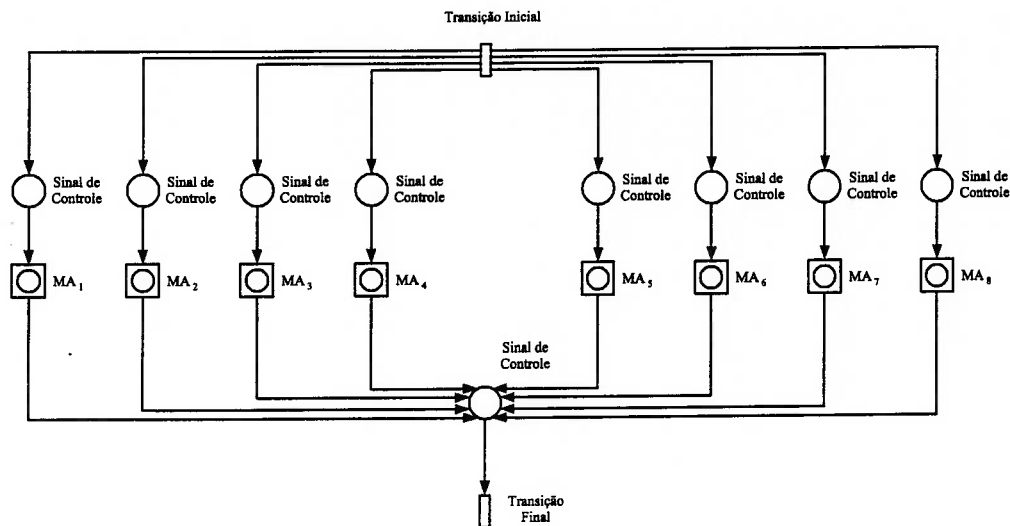


Figura 6.29: Sistema de Comunicação dos Objetos de Controle Subsolo 2

Assim a árvore de hierarquia da rede *GHENeSys* que modela o controle do prédio automatizado objeto de estudo neste trabalho apresenta-se na figura 6.30. O nó inicial da rede se apresenta na figura 6.31

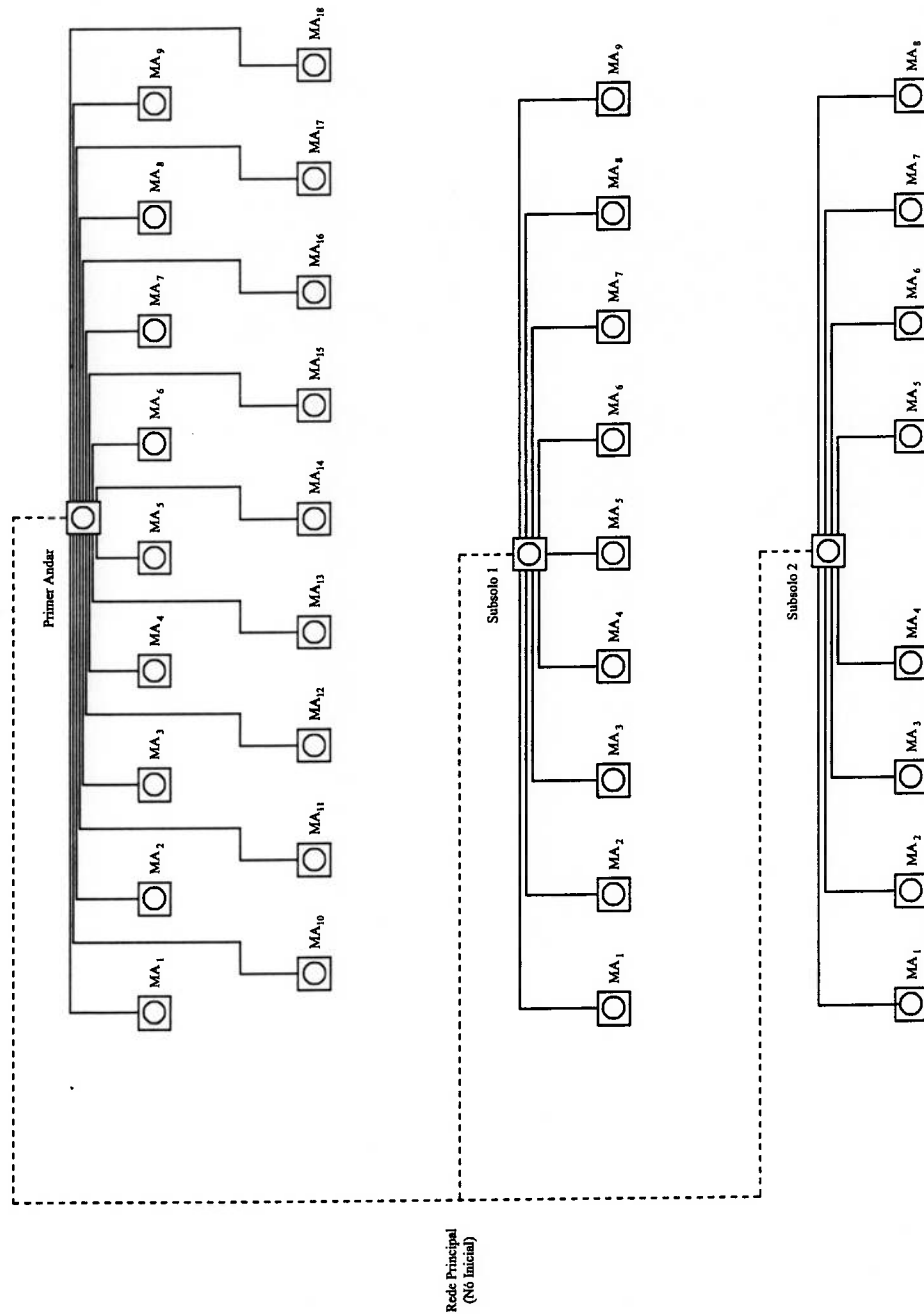


Figura 6.30: Árvore de Hierarquia do Estudo de Caso

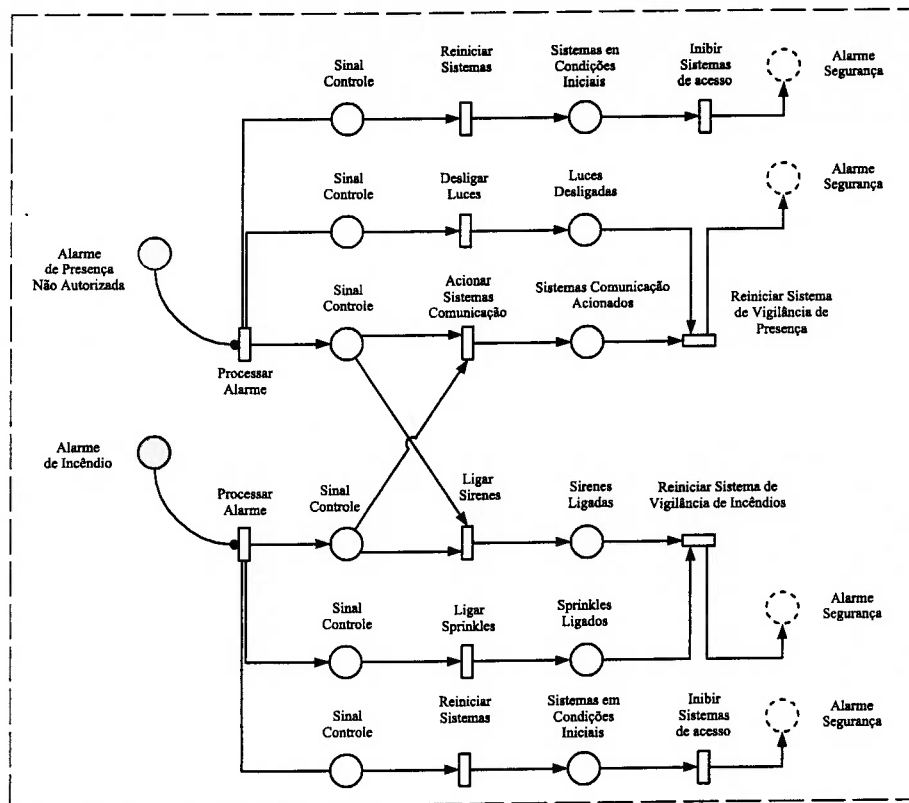


Figura 6.31: Nó Inicial do Modelo de Controle

## 7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 7.1 Conclusões

Neste trabalho foi apresentado um tipo de rede estendida que permite a modelagem Orientada a Objetos de sistemas a eventos discretos. A rede utilizou o refinamento e a composição hierarquicos como um método para romper a complexidade na construção de modelos de grande porte.

Neste abordagem, foi possível utilizar as redes como Objetos, permitindo a reutilização e o intercâmbio de mensagens entre redes. Assim, a construção de bibliotecas de modelos para o projeto de sistemas foi viável, com o consequente aumento na produtividade e a confiabilidade do processo de modelagem.

O trabalho apresentado foi dirigido para fusão do *Petri Net Inside Objects* e do *Object Inside Petri Nets*, não obstante, a rede não é considerada ainda de alto nível, permitindo entretanto a representação algébrica e a utilização dos métodos de análise das redes já consagrados.

Um jogador de marcas incorporando os algoritmos para a execução da rede foi apresentado, permitindo o uso da rede *GHENeSys* para a construção e execução de modelos de sistemas a eventos discretos. A utilização de métodos de refinamento hierarquico, intercâmbio de mensagens e uso de redes como objetos são algumas das características desenvolvidas.

No estudo de caso em questão foi apresentado o conceito de *Elemento de Controle*, onde as regras heurísticas originadas de política de uso de um prédio são modeladas mediante o intercâmbio de mensagens entre objetos. O sistema supervisorio, assim construído, permitiu obter o comportamento desejado da planta (o prédio). Conclui-se que o estudo de caso pode ser considerado como não trivial.

## 7.2 Trabalhos Futuros

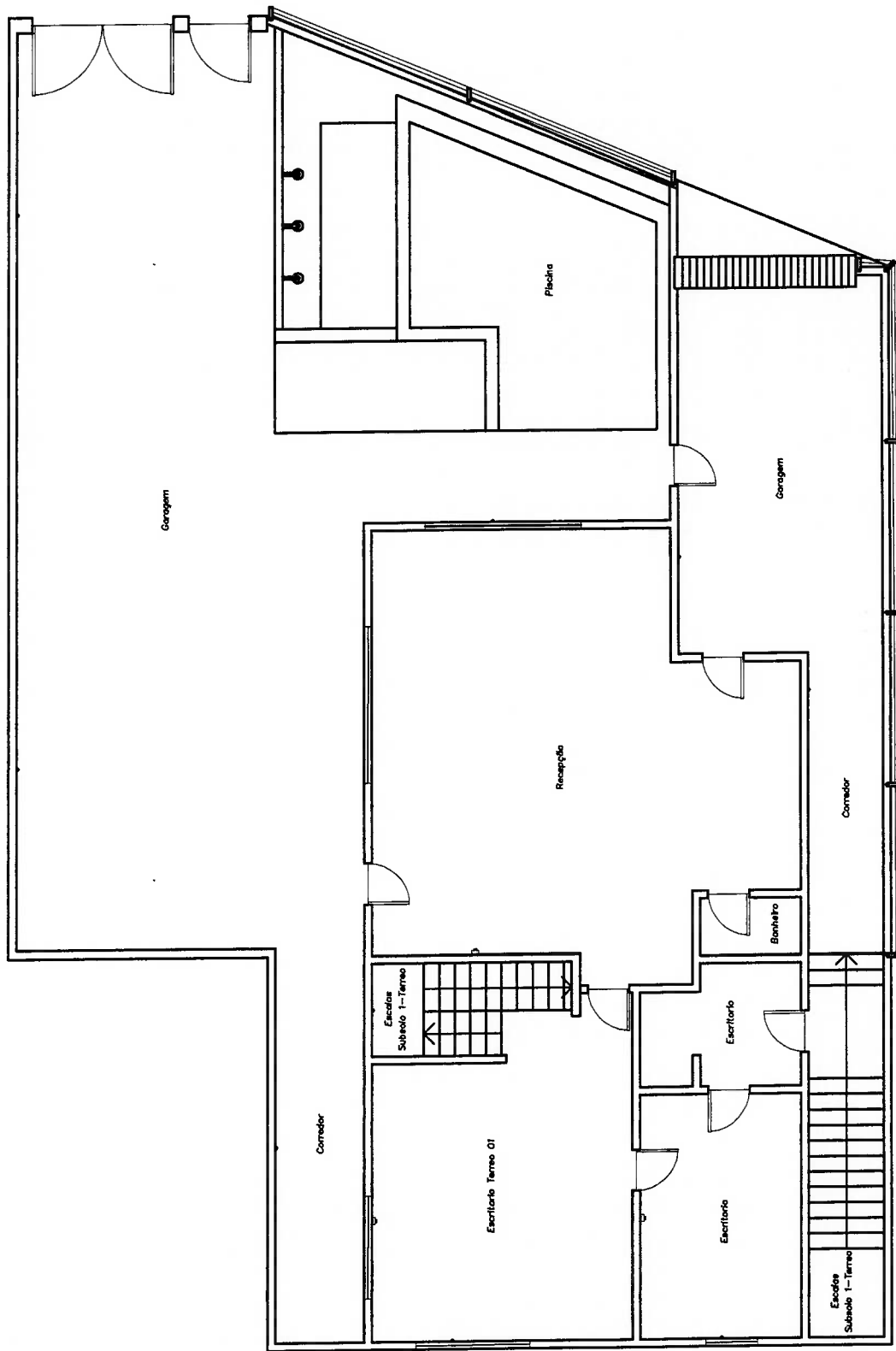
Em trabalhos futuros procura-se-a mostrar que a rede *GHENeSys* pode ser transformada em uma rede de alto nível, incluindo as marcas no diagrama de classes. Se o conjunto de cores for pouco sofisticado teremos uma rede ainda simples para proceder à análise de invariantes dispensando a transformação em uma rede básica de alto nível (*Basic High Level Net*) e daí para uma rede ordinária. Neste caso é preciso tratar o problema da criação e destruição do objeto marca. Com isto poderia-se tratar a síntese de sistemas supervisórios com uma representação formal mais simples de ser interpretada.

O fato da rede apresentada permitir a composição hierarquica, abre algumas questões sobre a utilização do conceito de hierarquia na modelagem de sistemas a eventos discretos que poderiam ser tratados no futuro, tais como: a conveniência de implementar sistemas que permitam a avaliação do estado de nós na rede com prioridade sobre os demais, a reestruturação do sistema de mensagens apresentado para que permita desmarcar elementos *PseudoBox* e a utilização de diferentes métodos de avaliação da estrutura hierarquica do projeto, além do apresentado nesta proposta (*Deep First*).

O jogador de Marcas apresentado entra no processo de uso prático, com o qual o ciclo de vida do Software entra na fase de correção de *Bugs* inevitáveis num software de certa complexidade. Além disso, alguns módulos secundários podem ser implementados.



# PLANTAS



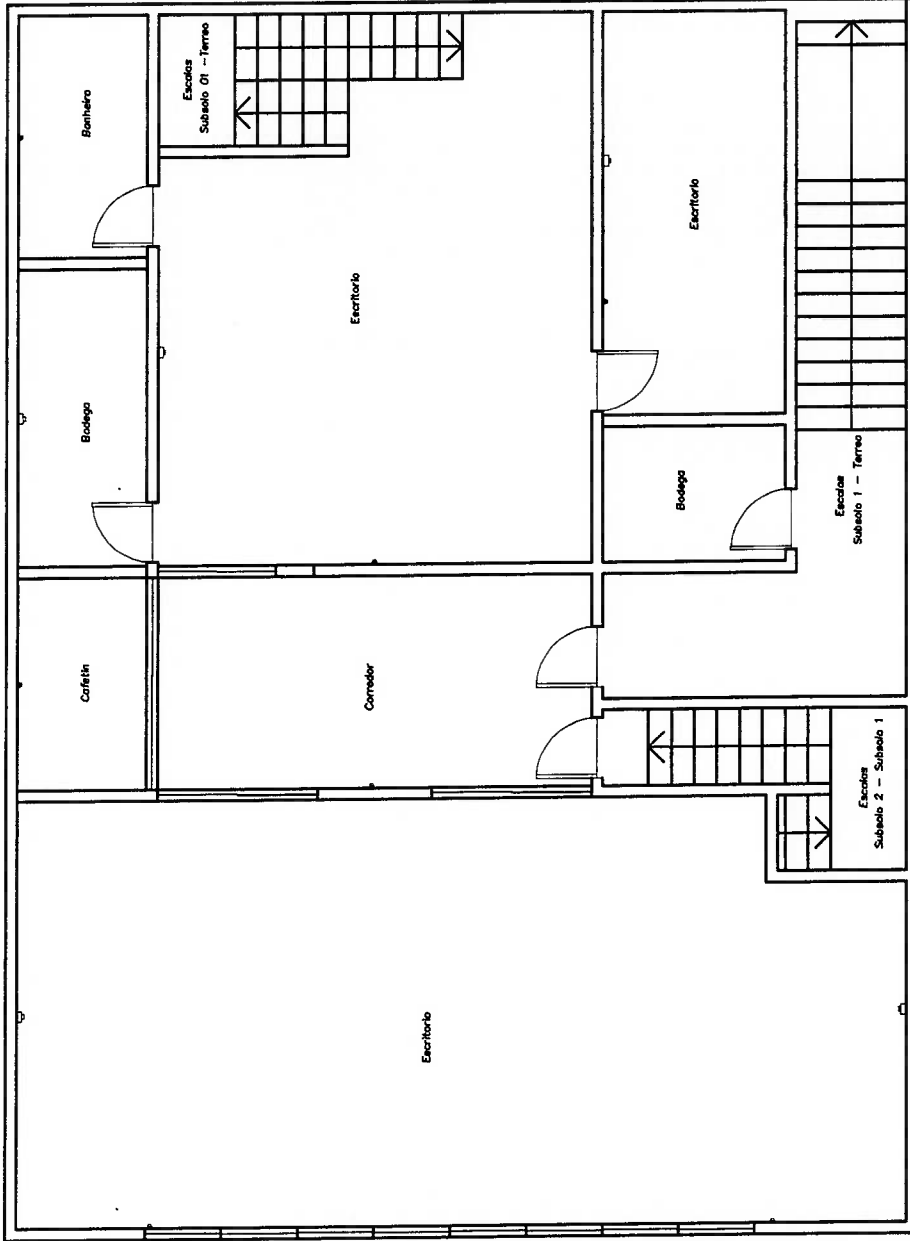
ESCOLA POLITECNICA DA UNIVERSIDADE DE SAO PAULO

PLANTA ANDAR TERREO

PL: A4-01



PROFETA PEDRO L. ANSEL RESTREPO  
 DESENHISTA PEDRO L. ANSEL RESTREPO  
 SUPERVISOR Prof. Dr. JOSE RENAALDO SILVA  
 ESCALA: 1:125  
 DATA: 19-Fev-04



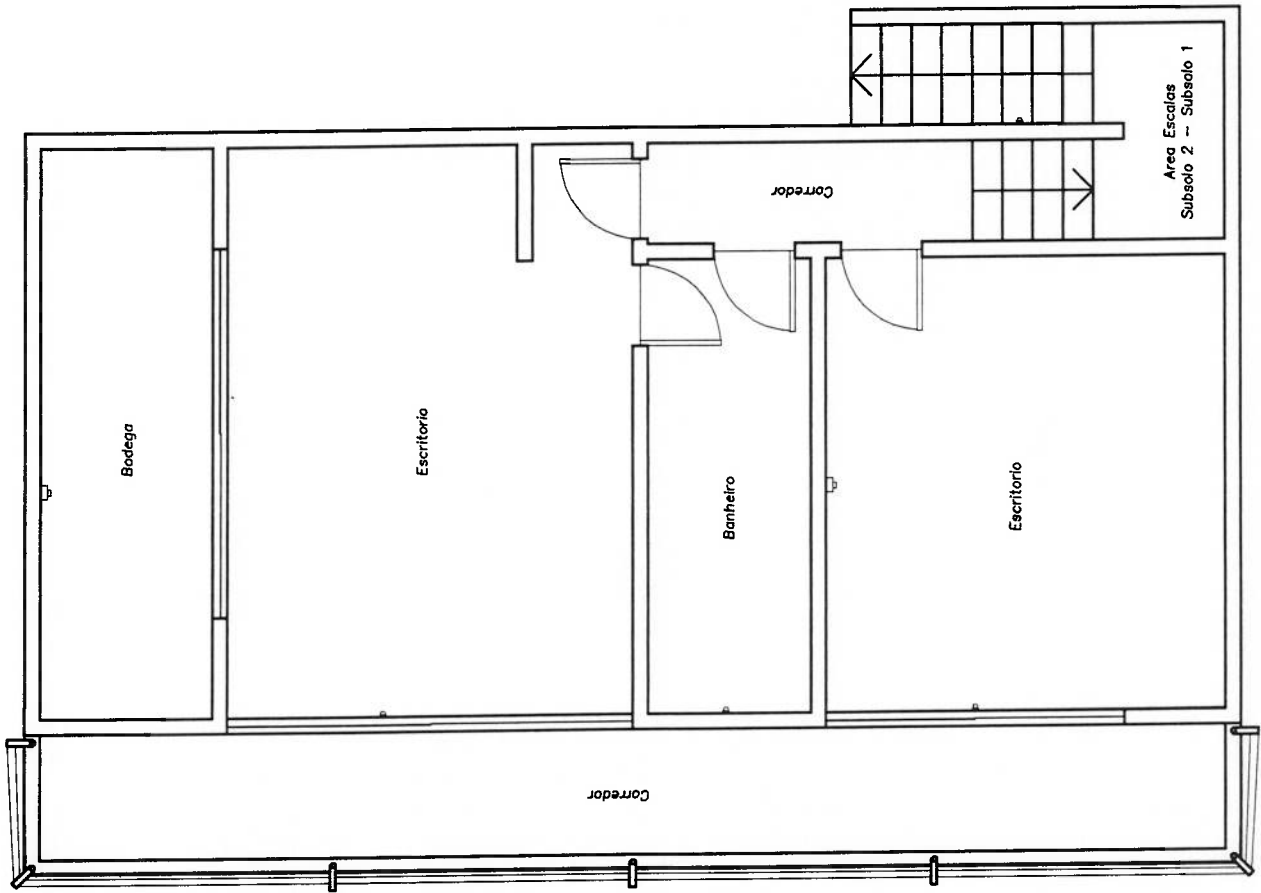
ESCOLA POLITECNICA DA UNIVERSIDADE DE SAO PAULO

PLANTA ANDAR SUBSUELO 1

PL: A4-02

PROFETA PEDRO L. ANSEL RESTREPO  
 SUPERVISOR: Prof. Dr. JOSE RENALDO SILVA  
 ESCALA: 1:100  
 DATA: 19-Fev-04





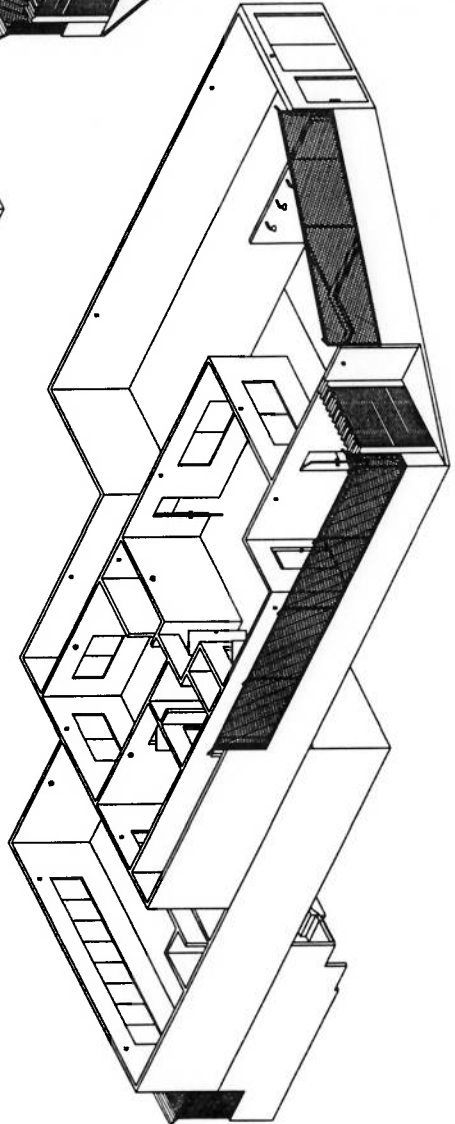
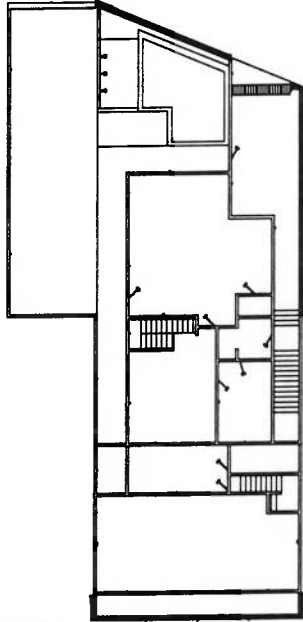
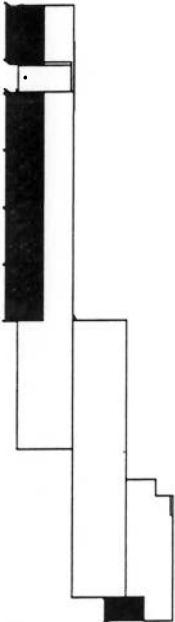
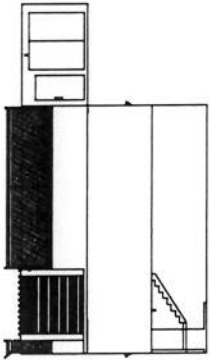
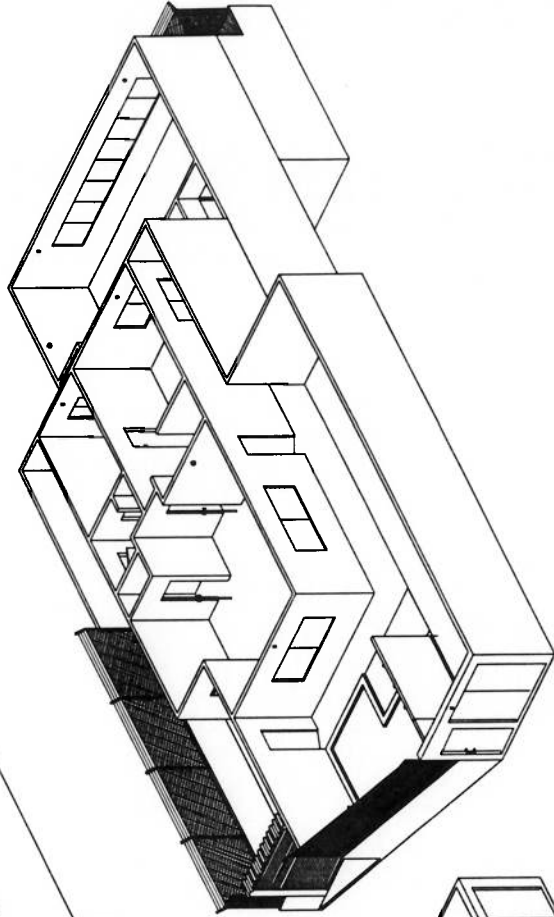
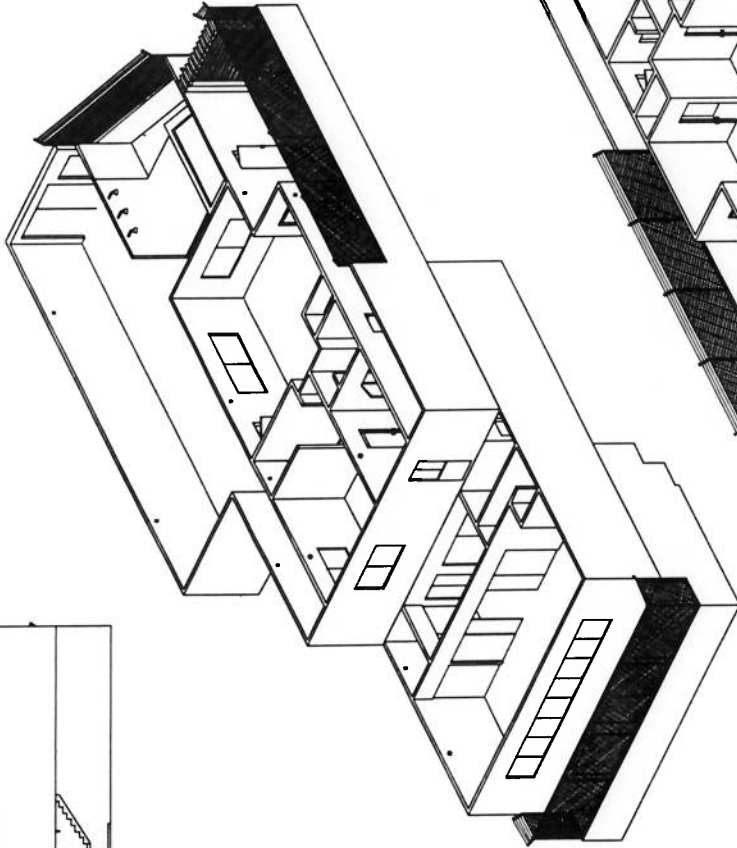
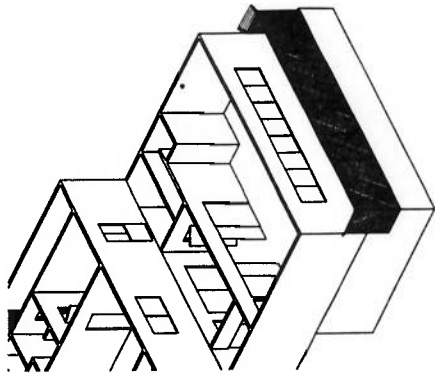
ESCOLA POLITECNICA DA UNIVERSIDADE DE SAO PAULO

PLANTA ANDAR SUBSUELO 2

PL.: A4-03

PROJETA	PROF. DR. ANSEL RESTREPO	DESENHO	PEDRO L. ANSEL RESTREPO	ESCALA	1:75
REVISOR	PROF. DR. JOSE RENALDO SILVA	SUPERVISOR	PROF. DR. JOSE RENALDO SILVA	DATA	19-Fev-04





ESCOLA POLITECNICA DA UNIVERSIDADE DE SAO PAULO

VISTAS DESCRITIVAS DO PREDIO

PL: A4-04

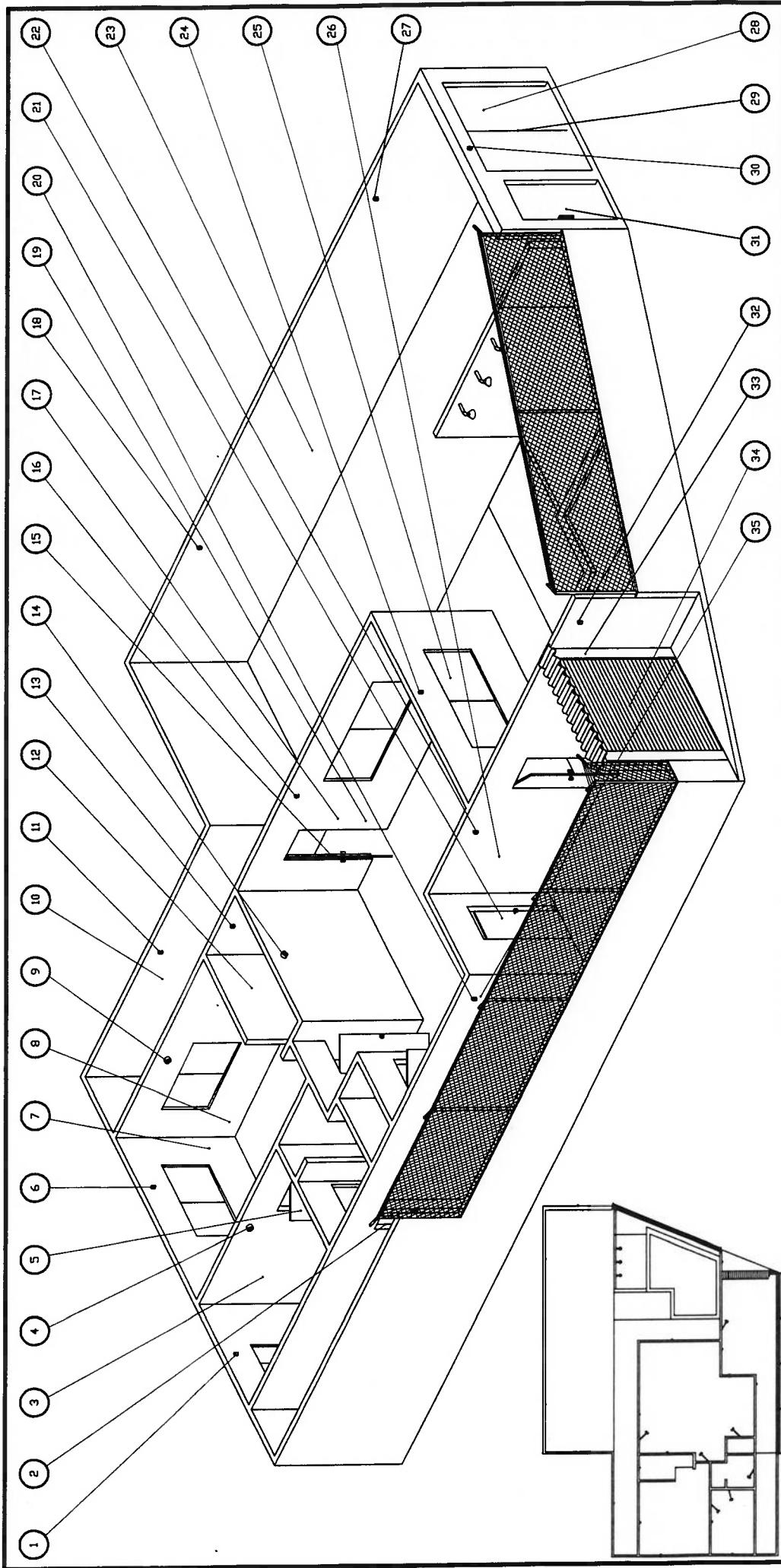


PROFESSOR PEDRO L. ANGEL RESTREPO  
REVISOR Prof. Dr. JOSE RENALDO SILVA

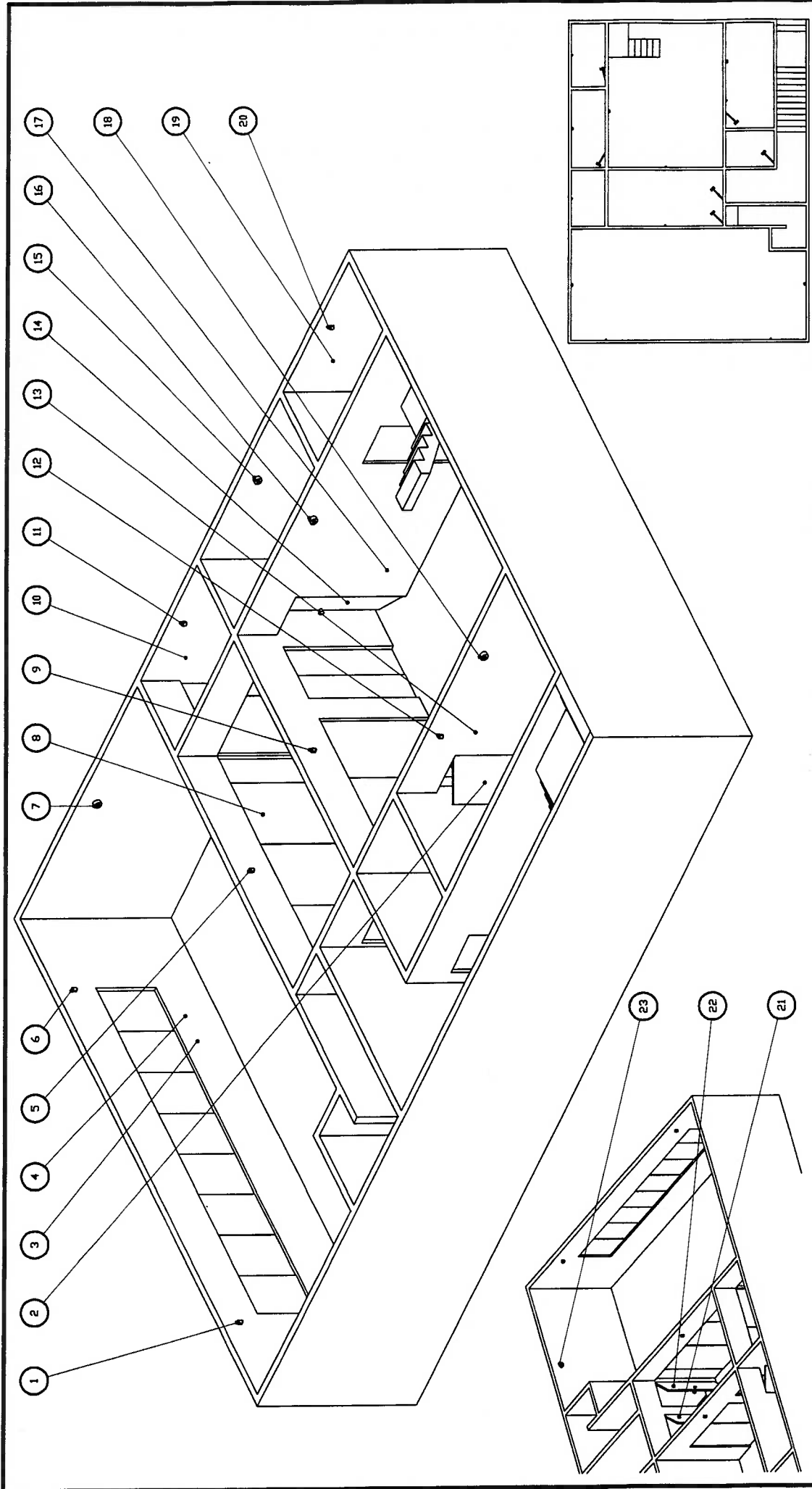
DESENHADOR PEDRO L. ANGEL RESTREPO  
SUPERVISOR Prof. Dr. JOSE RENALDO SILVA

ESCALA

DATA 19-FEV-04



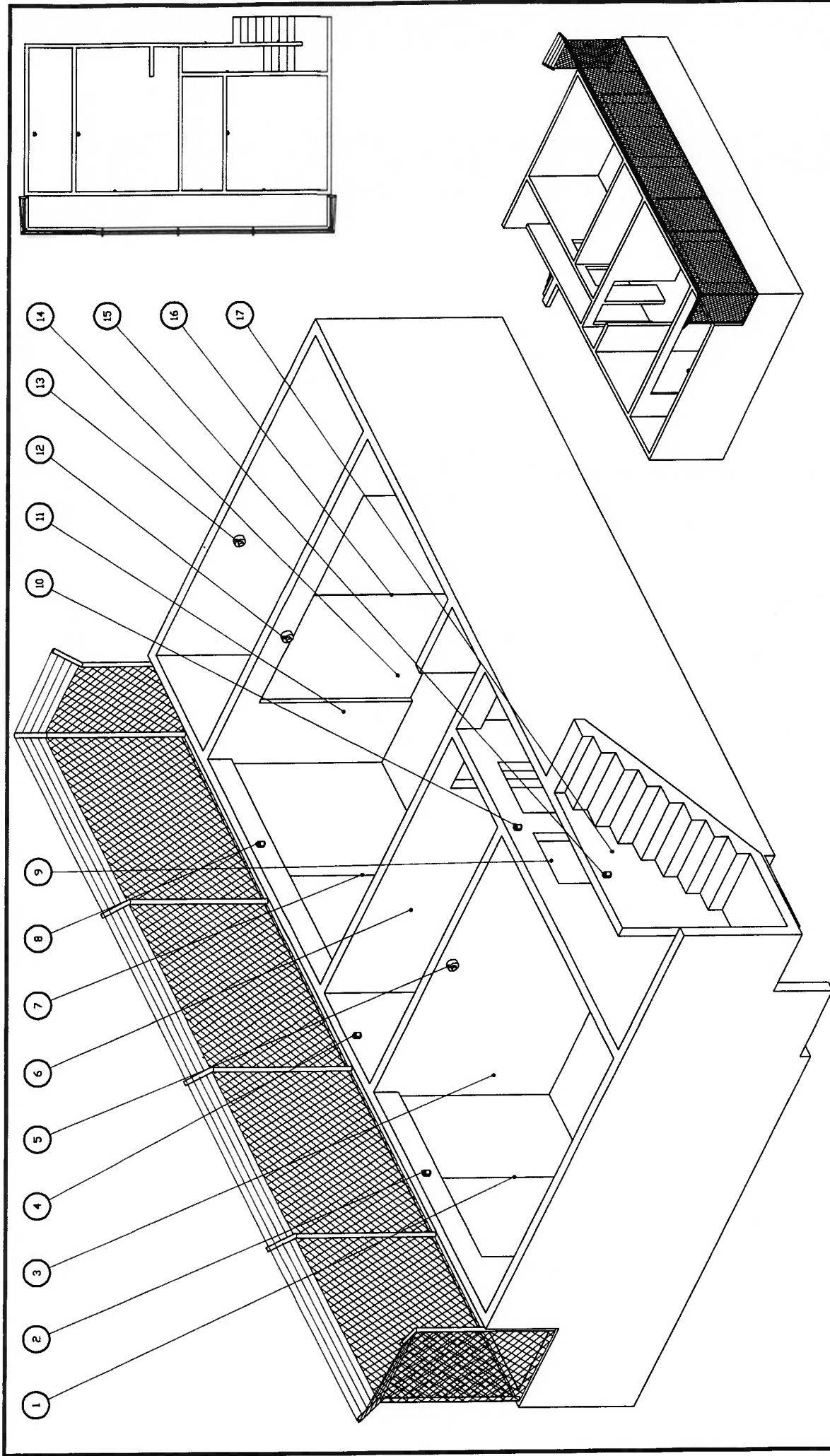
35	Sistema de Luminosidade	T_S-11	21	Sistema de Acesso	T_SA-04	7	Sistema de Luminosidade	T_S-02
34	Sistema de Acesso	T_SA-07	20	Sensor de Presença	T_SP-07	6	Sensor de Presença	T_SP-02
33	Sistema de Luminosidade	T_S-10	19	HVAC - Insulador	T_HVAC-02	5	Sistema de Acesso	T_SA-02
32	Sensor de Presença	T_SP-11	18	Sensor de Presença	T_SP-08	4	Sensor de Fumaça	T_SF-01
31	Sistema de Acesso	T_SA-06	17	Sistema de Luminosidade	T_S-05	3	Sistema de Luminosidade	T_S-01
30	Sensor de Presença	T_SP-11	16	Sensor de Presença	T_SP-06	2	Sistema de Acesso	T_SA-01
29	Sistema de Acesso	T_SA-05	15	Sistema de Acesso	T_SA-03	1	Sensor de Presença	T_SP-01
28	Sistema de Luminosidade	T_S-08	14	Sensor de Fumaça	T_SF-03			
27	Sensor de Presença	T_SP-10	13	Sensor de Presença	T_SP-04			
26	Sistema de Luminosidade	T_S-06	12	Sistema de Luminosidade	T_S-04			
25	Sistema de Luminosidade	T_S-07	11	Sensor de Presença	T_SP-03			
24	Sensor de Presença	T_SP-09	10	Sistema de Luminosidade	T_S-03			
23	Sistema de Luminosidade	T_S-08	9	Sensor de Fumaça	T_SF-02			
22	Sensor de Presença	T_SP-08	8	HVAC - Insulador	T_HVAC-01			
<b>ESCOLA POLITECNICA DA UNIVERSIDADE DE SAO PAULO</b>								
<b>OBJETOS ANDAR TERREO</b>								
PROF. PEDRO L. ANGEL RESTREPO			PROF. PEDRO L. ANGEL RESTREPO			PROF. DR. JOSE RENALDO SILVA		
SUPERVISOR			SUPERVISOR			SUPERVISOR		
BOMBA			BOMBA			BOMBA		
PL: A4-05			DATA: 19-fev-04			DATA: 19-fev-04		




23	Sensor de Fumaça	SI_SF-05	Sistema de Luminosidade	SI_SI-07	3	Sistema de Luminosidade	SI_SI-01
22	Sistema de Acesso	SI_SA-04	Sensor de Presença	SI_SF-06	2	Sistema de Acesso	SI_SA-01
21	Sistema de Acesso	SI_SA-03	Sensor de Presença	SI_SF-05	1	Sensor de Presença	SI_SF-01
20	Sensor de Presença	SI_SF-07	Sistema de Luminosidade	SI_SI-03		Indicador	
18	Sistema de Luminosidade	SI_SI-06	Sensor de Presença	SI_SF-04			
18	Sensor de Fumaça	SI_SF-04	Sistema de Luminosidade	SI_SI-02			
17	Sistema de Luminosidade	SI_SI-03	Sensor de Fumaça	SI_SF-01			
17	Sensor de Fumaça	SI_SF-03	Sensor de Presença	SI_SF-03			
15	Sensor de Fumaça	SI_SF-02	Sensor de Presença	SI_SF-02			
14	Sistema de Acesso	SI_SA-02	HVAC - Ina/Fodor	SI_IVAC-01			

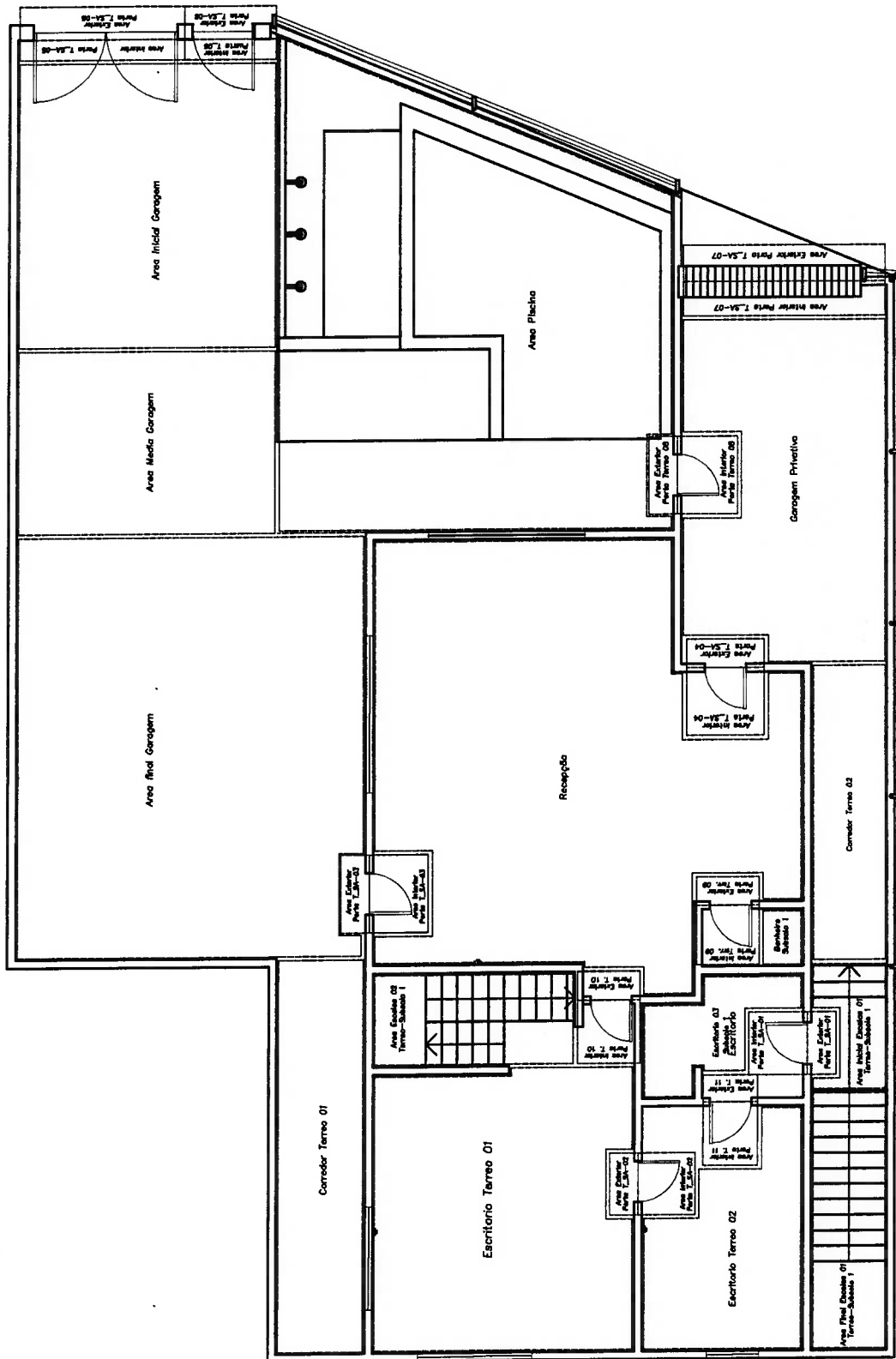
  

<b>ESCOLA POLITECNICA DA UNIVERSIDADE DE SAO PAULO</b>	
<b>OBJETOS SUBSOLO 1</b>	PL: A4-06
PROFESSOR PEDRO L. ANGEL RESTREPO	DESEMNHO PEDRO L. ANGEL RESTREPO
SUPERVISOR Prof. Dr. JOSE RENALDO SILVA	SUPERVISOR Prof. Dr. JOSE RENALDO SILVA
ARQUITETA JAP. ANA OKAMURA	BENEFICIARIA
DATA: 19-Fev-04	



17	Sistema de Luminosidade	S2_SL-05	9	Sistema de Luminosidade	S2_SL-03	1	Sistema de Acesso	S2_SA-01
16	Sistema de Acesso	S2_SA-03	8	Sensor de Presença	S2_SP-03			Referência
15	Sensor de Presença	S2_SP-05	7	Sistema de Alcega	S2_SA-02			
14	Sistema HVAC	S2_HVAC-01	6	Sistema de Luminosidade	S2_SL-02			
13	Sensor de Fumo	S2_SF-03	5	Sensor de Fumo	S2_SF-01			
12	Sensor de Fumo	S2_SF-02	4	Sensor de Presença	S2_SP-02			
11	Sistema de Luminosidade	S2_SL-04	3	Sistema de Luminosidade	S2_SL-01			
10	Sensor de Presença	S2_SP-04	2	Sensor de Presença	S2_SP-01			
<b>ESCOLA POLITECNICA DA UNIVERSIDADE DE SAO PAULO</b>								
<b>OBJETOS SUBSOLO 2</b>								
								
			PROF. PEDRO L. ANGELO RESTREPO			REVISOR: Prof. Dr. JOSE RENALDO SILVA		
			REVISOR: Prof. Dr. JOSE RENALDO SILVA			DATA: 19-Fev-04		





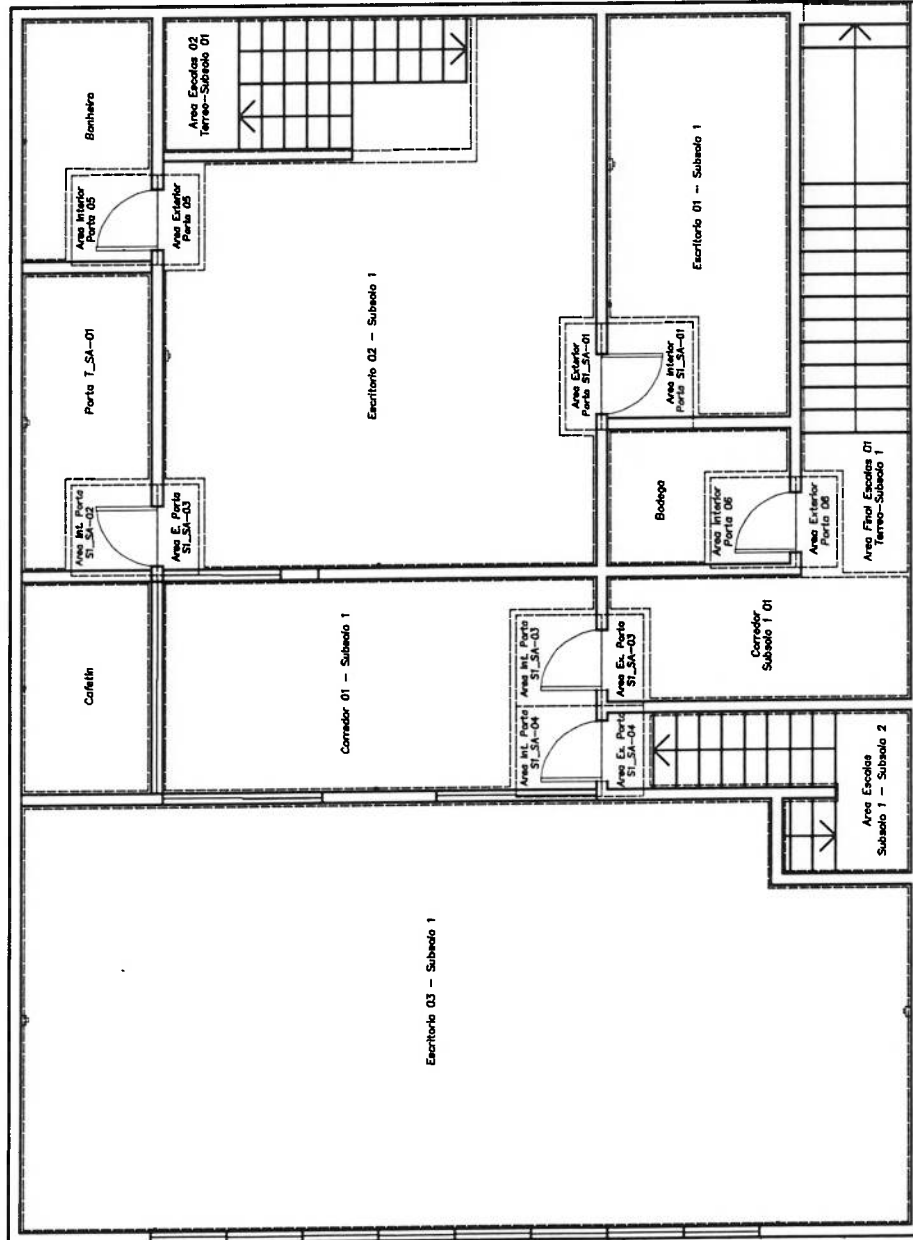
ESCOLA POLITECNICA DA UNIVERSIDADE DE SAO PAULO

ÁREAS ANDAR TERREO

PL: A4-08



PROJETA: PEDRO L. ANGELO RESTREPO  
 REVISOR: Prof. Dr. JOSE REINALDO SILVA  
 SUPERVISOR: Prof. Dr. JOSE REINALDO SILVA  
 ESCALA: 1:125  
 DATA: 18-Fev-04



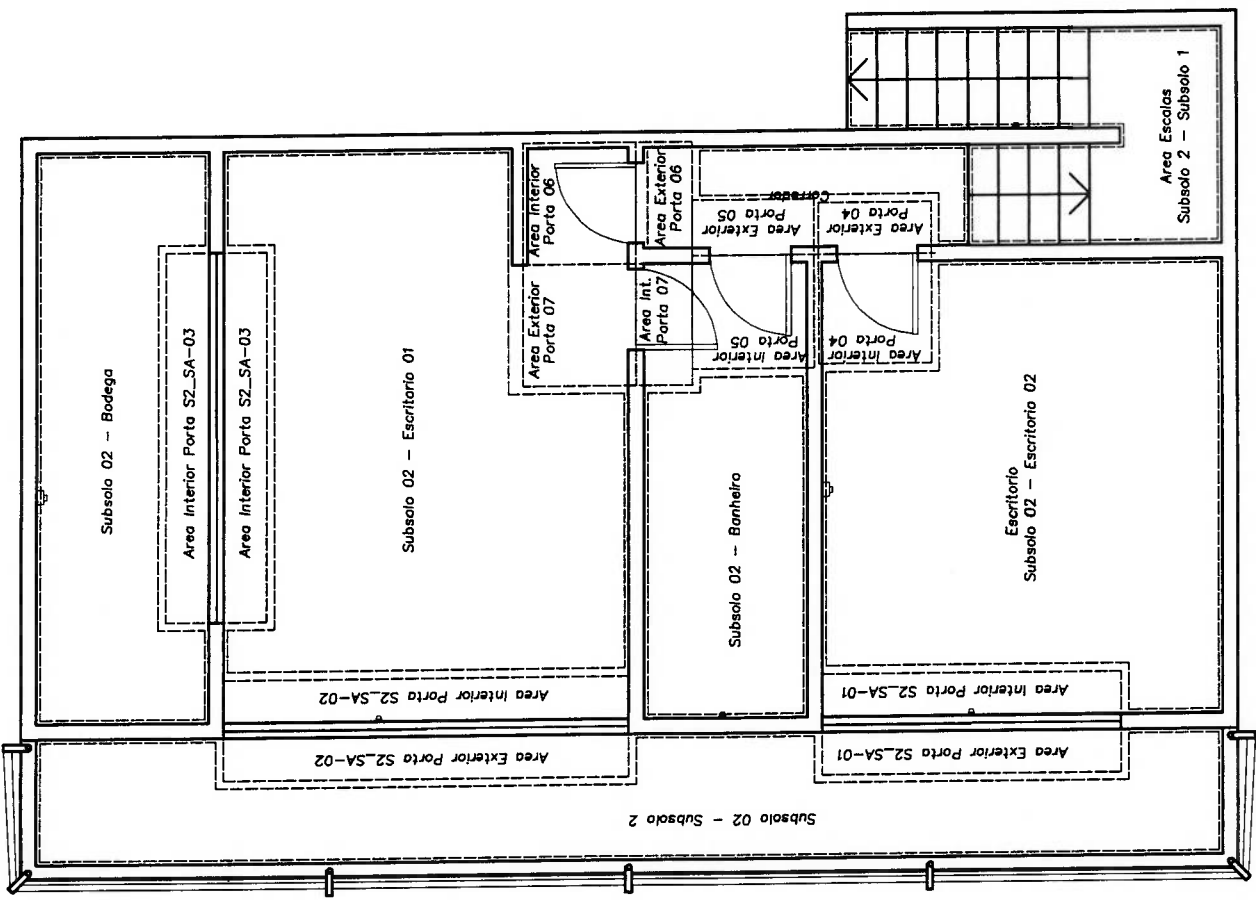
**ESCOLA POLITECNICA DA UNIVERSIDADE DE SAO PAULO**

**AREAS SUBSUELO 1**

PL.: 44-09

PROFETOR: PEDRO L. ANGEL RESTREPO      DESENHADOR: PEDRO L. ANGEL RESTREPO      ESCALA: 1:100

SUPERVISOR: Prof. Dr. JOSE RENALDO SILVA      SUPERVISOR: Prof. Dr. JOSE RENALDO SILVA      DATA: 19-Fev-04



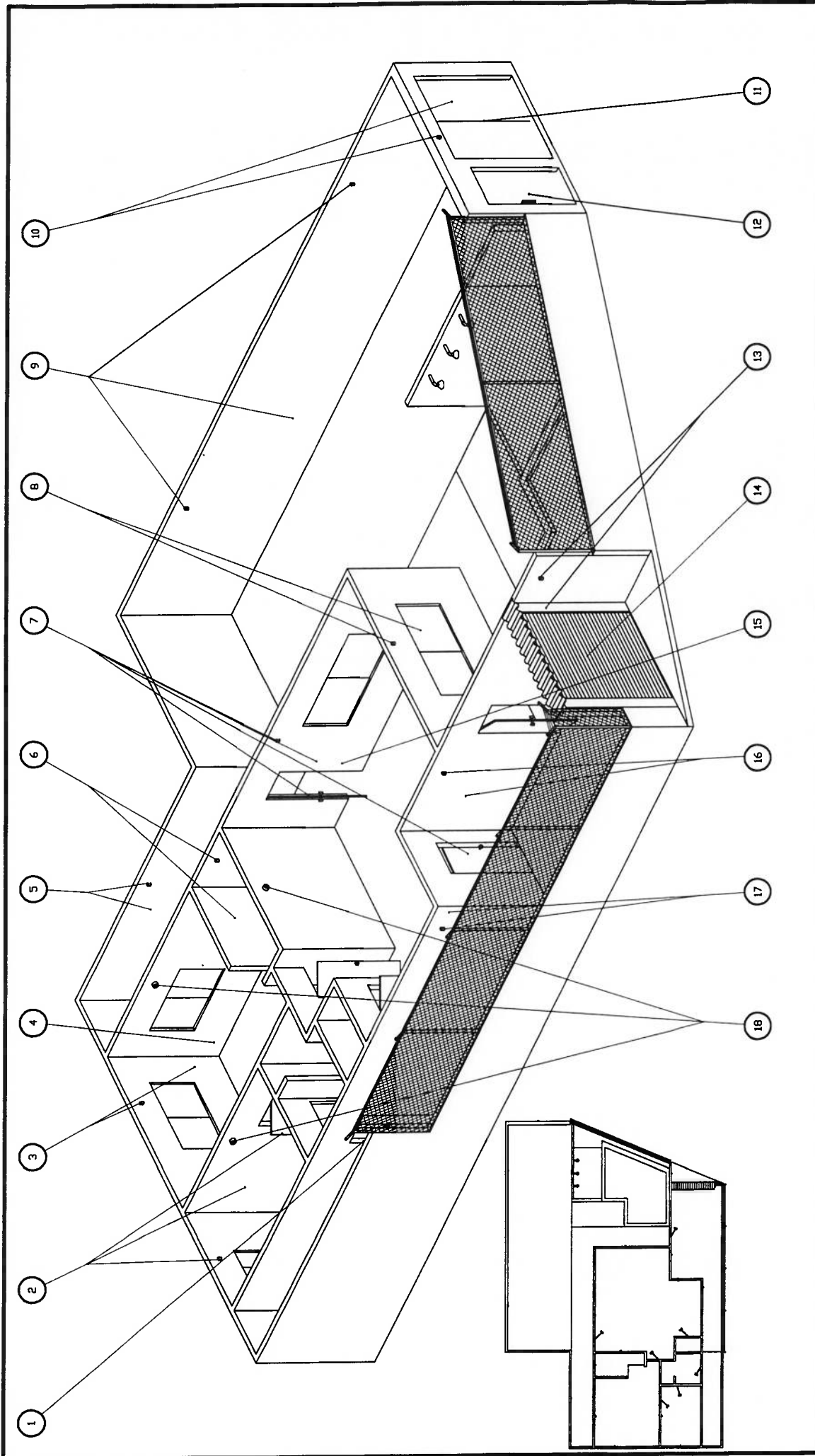
ESCOLA POLITECNICA DA UNIVERSIDADE DE SAO PAULO



AREAS SUBSUELO 2

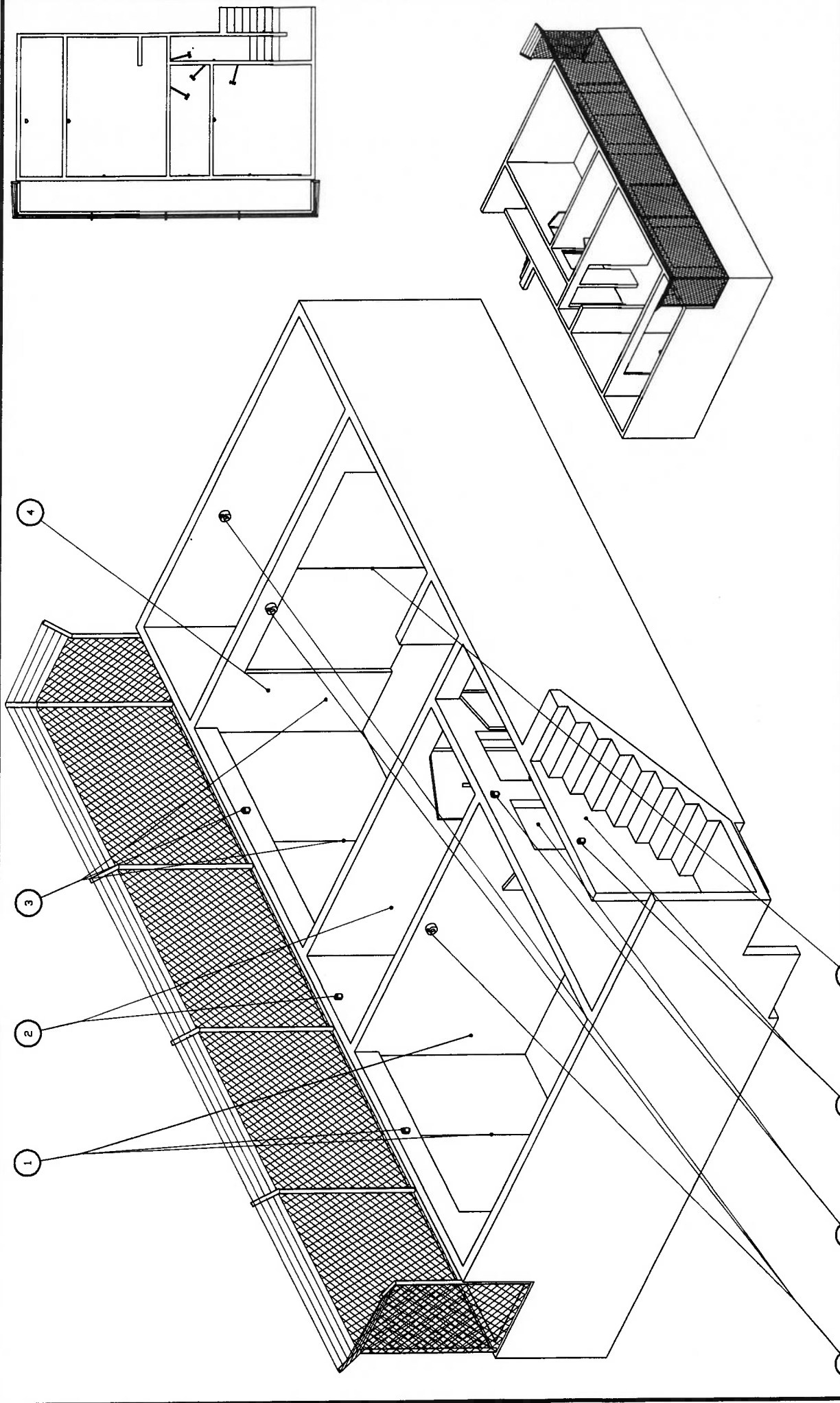
PL.: A4-10

PROJETO: PEDRO L. ANGEL RESTREPO	DESENHO: PEDRO L. ANGEL RESTREPO	ESCALA: 1:75
REVISOR: Prof. Dr. JOSE RENALDO SILVA	SUPERVISOR: Prof. Dr. JOSE RENALDO SILVA	DATA: 19-Fev-04



Item	Descrição	Referência	Item	Descrição	Referência
18	Sistema de Detecção Fumaça	T_SF-01, T_SF-02, T_SF-03	2	Sistema Pressão-Luminosidade-Acesso	T_SP-01, T_SP-01, T_SA-02
17	Sistema Pressão-Luminosidade Exterior	T_PL_F-05	1	Sistema Acesso	T_SA-01
16	Sistema Pressão-Luminosidade Exterior	T_SF-06, T_SF-07	Elementos Complementares		
15	Sistema HVAC	T_HVAC-02	Reservatório		
14	Sistema Acesso	T_SA-03	ESCOLA POLITECNICA DA UNIVERSIDADE DE SAO PAULO		
13	Sistema Pressão-Luminosidade Exterior	T_SF-11, T_SF-10	OBJETOS ACREGADOS TERREO		
12	Sistema Acesso	T_SA-03	PROFESSOR PEDRO L. ANGEL RESTREPO		
			SUPERVISOR Prof. Dr. JOSE RENALDO SILVA		
			PL: A4-11		
			DATA: 18-Fer-04		





ESCOLA POLITECNICA DA UNIVERSIDADE DE SAO PAULO		OBJETOS AGREGADOS SUBSOLO 2		PL: A4-13	
PROFETA PEDRO L. ANGEL RESTREPO		PROFETA PEDRO L. ANGEL RESTREPO		PROFETA PEDRO L. ANGEL RESTREPO	
REVISOR Prof. Dr. JOSE REVALDO SILVA		REVISOR Prof. Dr. JOSE REVALDO SILVA		REVISOR Prof. Dr. JOSE REVALDO SILVA	
SUPERVISOR Prof. Dr. JOSE REVALDO SILVA		SUPERVISOR Prof. Dr. JOSE REVALDO SILVA		SUPERVISOR Prof. Dr. JOSE REVALDO SILVA	
DATA: 19-Fev-04		DATA: 19-Fev-04		DATA: 19-Fev-04	
5	Sistema de Detecção Fumaça	SZ_SF-01, SZ_SF-02, SZ_SF-03	SZ_DF-01		
4	Sistema HVAC	SZ_HVAC-01	SZ_HVAC-01		
3	Sistema Presença-Limitação-Acesso	SZ_SA-02, SZ_SP-03, SZ_SA-04	SZ_PL-02		
2	Sistema Presença-Limitação Interior	SZ_SP-02, SZ_SA-02	SZ_PL-01		
1	Sistema Presença-Limitação-Acesso	SZ_SA-01, SZ_SP-01, SZ_SA-01	SZ_PLA-01		
	Relatório Descrição	Elementos Complementares	Relatório		
8	Sistema Acesso	SZ_SA-03	SZ_SA-01		
7	Sistema Presença-Limitação Interior	SZ_SP-05, SZ_SA-06	SZ_PL-03		
6	Sistema Presença-Limitação Interior	SZ_SA-03, SZ_SP-04	SZ_PL-02		

# APÊNDICES

## A.1 Critérios para a Seleção do Compilador

Os compiladores, aspectos avaliados e as notas associadas para a seleção do compilador para a construção do sistema computacional *GHENESYS* são apresentadas na tabela A.1. O compilador selecionado foi o Delphi.

AGENTE	FATOR	Escala da Calificacion
Compilador	Nível de Dificuldade	0-5
	Bibliotecas Gráficas	0-5
	Suporte	0-5
Produto	Estabilidade	0-5
	Portabilidade	0-10
	Consumo de Hardware	0-5
	Desempenho	0-5
	Manutenção	0-5
	Ampliação Posterior	0-5
	Interação com o Hardware	0-5
Desenvolvedor	Conhecimento da Ferramenta	0-10

Tabela A.1: Critérios e Escala de Avaliação

És preciso considerar que aspectos como custos do compilador e do hardware, não foram avaliados pois o laboratório de automatização (DLAB) tem disponível o hardware e software necessários.

SOFTWARE FATOR	C	C++	Visual C++	JAVA	Visual Basic	Visual Fortran	Delphi	Power Builder
	Nível de Dificuldade	1	3	3	3	4	3	4
Bibliotecas Gráficas	0	2	3	5	3	3	4	4
Suporte	3	4	3	5	4	2	3	2
Estabilidade	4	3	1	5	3	4	5	3
Portabilidade	8	6	0	9	0	0	7	5
Consumo de Hard- ware	5	5	3	1	2	3	4	4
Desempenho	10	10	8	3	4	9	8	6
Manutenção	2	3	3	4	3	5	4	4
Ampliação Posterior	2	2	3	4	3	3	4	3
Interação com o Hard- ware	5	5	5	2	4	5	4	3
Conhecimento da Fer- ramenta	2	2	2	2	5	5	1	2
Total	42	45	34	43	35	42	48	40

Tabela A.2: Escolha do Ambiente de desenvolvimento para a Construção da Ferramenta Computacional *GHENESYS*



## Referências Bibliográficas

- [Anisimov, 1994] Anisimov N., Kovalenko A., Postupalski P.; Compositional Petri Net Environment, **IEEE Symposium on Emerging Technologies**, 1994
- [Akimaru, 1991] Akimaru, H. Intelligent Buildings: Myth, Reality, or Wishful Thinking ?, **IEEE Communications Magazine**, U.S.A. 1991
- [Basten, 2001] Basten, T., van der Alst, W. M. P. ; Inheritance of Dynamic Behaviour: Development of a Grupware Editor, in Lecture Notes in Computer Science 2001, Advances in Petri Nets, Springer-Verlag, 2001.
- [Bastide, 1995] Bastide R., Approaches in unifying Petri nets and the object-orientation approach, **Proceedings of the Application and Theory of Petri Nets 1995**, Workshop on Object-Oriented Programming and Models of Concurrency, Torino, Italy, June 1995.
- [Booch, 1994] Booch, G.; Object Oriented Analysis and Design with Applications, Benjamin-Cummings, 1994.
- [Booch, 1994] Booch, G. **Object-Oriented Analysis and Design** Addison-Wesley Publishing Menlo Park, California, 1994. 589p.
- [Brandin, 1992] Brandin B. A. Wonham W. M., The Supervisory Control of timed Discrete Event System, **Proceedings of the 31st Conference on decision and control**, p. 3357-3362. Tucson Arizona 1992.
- [Brandin, 1992a] Brandin B. A. Wonham W. M., Benhabib B. Manufacturing Cell Supervisoruy Control A timed Discrete Event System, **Proceedings of the 1992 International Conference on Robotics and Automation**, p. 931-936, Nice France, 1992.
- [Brauer, 1990] Brauer W., Gold R. Vogler W.; A survey of Behaviour and Equivalence Preserving Refinements of Petri Nets, **Advances in Petri Nets 1990, LNCS 483**, p. 1-46. SpringerVerlag, 1990.
- [Bourdon, 2002] Bourdon S. E., Lawford M, Wonham W. M. Robust Nonblocking Supervisory Control of Discrete-Event Systems, **Proceedings Of the American Control Conference Anchorage**, p. 730-735. Alaska 2002.

- [Burdea, 1994] Burdea, G., Coiffet P. **Virtual Reality Technology** John Wiley and Sons Inc, New York. 1994. 400p.
- [Basten, 2001] Basten, T., van der Alst, W. M. P., Inheritance of Dynamic Behaviour: Development of a Grupware Editor, **Lecture Notes in Computer Science 2001, Advances in Petri Nets**, Springer-Verlag, 2001.
- [Cassandras, 1993] Cassandras, C.G.; **Discret Event Systems: Modeling and Performnce Analysis**, Aksen Associates Incorporated Publishers, Burr Ride, Illinois, USA. 1993. 790p.
- [Calkin, 1998] Calkin, D.W.; Parkin, R.M.; Safaric, R.; Czarnecki, C.A.; Visualisation, simulation and control of a robotic system using Internet technology, **Proceedings of the 5th International Workshop on Advanced Motion Control**, Coimbra, Portugal June-July 1998.
- [Cerdeja, 1989] Instituto Cerda - Area de Telecomunicaciones, **Prédios y Areas Inteligentes - Definición de un concepto emergente**, Ildefons Cerda, 1ra Edición, Octubre 1989, Barcelona, España.
- [Cortés, 2001] Cortés L.A., Eles P., Peng Z.; Hierarchical Modeling and Verification of Embedded Systems, **Proceedings Euromicro Symposium on Digital Systems Design, 2001**, 2001.
- [Crook, 1998] Crook, S.; The use of simulation and virtual reality in the design and operation of airport terminals, **Proceedings of International Conference on Simulation '98**, York, U.K. October, 1998.
- [Fabian, 1995] Fabian M., Lennartson B., Applying Supervisory Control to Discrete Event Systems Modeled by Object Oriented Principles, **Proceedings ETFA '95**, Paris, France, Oct 1995.
- [Finley, 1991] Finley, Jr.,M. R., Karakura, A. , Nbogni, R., Survey of Intelligent Building Concept, **IEEE Communications Magazine**, p. 18-23, 1991.
- [Freund, 2001] Freund, E.; Rossmann, J.; Multimedia and Virtual Reality Techniques for the Control of ERA, the First Free Flying Robot in Space, **Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation**, p. 1921 -1926 vol.2, Seoul, Korea. May, 2001.

- [Frost, 2000] Frost, P.; Warren, P.; Virtual Reality Used in a Collaborative Architectural Design Process, **Proceedings IEEE International Conference on Information Visualization, 2000.**, p. 568-573. USA, 2000.
- [Forte, 2001] Forte, M.; Pietroni, E.; Rufa, C.; Bizzarro, A.; Tilia S. DVR-Pompei Project: Reconstructions of Archaeological Contexts in Desktop-OpenGL Environments, **Proceedings of the 2001 conference on Virtual reality, archeology, and cultural heritage, 2001**, p. 307-314. ACM Press, New York, NY, USA, 2001.
- [Fujie, 1991] Fujie, S. , Mikami, Y., Construction Aspects of Intelligent Buildings, **IEEE Communications Magazine**, p. 50-57. 1991.
- [Genrich, 1981] Genrich, H. J., Lautenbach. K, **System modelling with high-level Petri nets**, Theoretical Computer Science, p. 109-136, 1981.
- [Girauld, 2003] Girauld C., Valk R., **Petri Net for System Engineering**, Springer, Germany 2003.
- [Giua, 1991] Guia A., DiCesare F.; Supervisory Design Using Petri Nets, **Proceedings of the 30th Conference on Decision and Control** p. 92-97. Brighton, England, 1991.
- [Giua, 1994] Guia A., DiCesare F.; Blocking and Controllability of Petri Nets in Supervisory Control, **IEEE Transactions on Automatic Control** Vol. 39 No. 4, p. 818-823. Abril 1994.
- [Holloway, 1994] Holloway, L. E., Krogh, H.; Controlled Petri Nets: a Tutorial Survey, **Lecture Notes in Control and Information Sciences 1994, 11th International Conference on Analysis and Optimization of Systems**, p. 158-168. 1994.
- [Hix, 1999] Hix, D.; Swan, J.E., II; Gabbard, J.L.; McGee, M.; Durbin, J.; King, T.; User-centered design and evaluation of a real-time battlefield visualization virtual environment, **Proceedings Virtual Reality, 1999.** , P. 96-103, March, 1999.
- [Jaworski, 1997] Jaworski, J **JAVA Guia de Desarrollo** Prentice Hall, Madrid. 1997. 718p.

- [Jensen, 1997] Jensen, K. **Coloured Petri Nets; Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use** EATCS Monographs on Theoretical Computer Science, Springer, 1992.
- [Lakos, 1991] Lakos C.A., Keen C.D.; Simulation with Object-Oriented Petri Nets, **Australian Software Engineering Conference**, Sydney, Australia 1991.
- [Lakos, 1995] Lakos C.A.; The Object Orientation of Object Petri Nets, Department of Computer Sciences, University of Tasmania. 1995.
- [Li, 2002] Li Fung-Chun; Angelier, J.; Defontaine, B.; Hu Jyr-Ching; Hsu Shih-Hao; Lee Chin-Hui; Huang Chia-Hui; Chen Cheng-Hung; A virtual Reality Application for Distance Learning of Taiwan Stream Erosion in Geosciences, **Proceedings. International Conference on Computers in Education, 2002**, P. 1156 -1160 vol.2, Dec. 2002.
- [Lind, 1996] Lind M., Status and Challenges of Intelligent Plant Control, **Proceedings Of the 4th IFAC Symposium on Dynamics and Control of Chemical Reactors, Distillation Columns and Batch Processes**, Helsinki, P. 23-41. 1996.
- [Malhotra, 1993] Malhotra M., Trivedi K. S.; A Methodology For Formal Expression of Hierarchy in Model Solution, **Proceedings 5th International Workshop on Petri Nets and Performance Models**, Toulouse, pages 258-267. October 1993
- [Marca, 1988] Marca D. A., McGowan C. L; **SADT : Structured Analysis and Design Techniques**, McGraw-Hill, New York, 1988.
- [Modjeska, 2000] Modjeska D., Waterworth J.; Effects of Desktop 3d World Design on User Navigation and Search Performance, **Proceedings IEEE International Conference on Information Visualisation, IV2000**, London, England, 2000.
- [Moody, 2000] Moody J. O., Antsaklis P. J.; Petri net supervisors for DES with uncontrollable and unobservable transitions, **IEEE Trans. Automatic Control**, vol. 45, pp. 462-476, Mar. 2000.
- [Murata, 1989] Murata, T. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications, **Proceedings of the IEEE**, Vol. 77, No. 4, p. 541, 1989.

- [Navinchandra, 2002] Navinchandra K. P., Simon P.C, Terrance F. Evaluating the use of Virtual Reality as a tool for briefing clients in architecture, **Proceedings of the Sixth Conference on Information Visualisation IV'02** p. 657-664. London, England, 2002.
- [Peters, 1993] Peters L., Schultz R.; The Application of Petri-Nets in Object-Oriented Enterprise Simulations. **Proceedings of the 27th Annual Hawaii Conference 1993**, Hawaii, 1993.
- [Pilgrim, 2001] Pilgrim M., Bouchlaghem D., Loveday D., Holmes M.; A Mixed Reality System for Building Form and Data Representation. **Proceedings of Fifth International Conference on Information Visualisation, 2001** London, England, 2001.
- [Pilgrim, 2000] Pilgrim M., Bouchlaghem D., Loveday D., Holmes M. Abstract Data Visualisation in the Built Environment. **Proceedings. IEEE International Conference on Information Visualization** p. 126 - 134, Julio 2000.
- [Peterson, 1981] Peterson, J.L. **Petri Net Theory and the Modeling of Systems** Englewood Cliffs, N.J. Prentice-Hall Inc. 1981. 290p.
- [Ramadge, 1989] Ramadge P. J. G., Wonham W. M, The Control of Discrete Event Ssystems, **Proceedings of the IEEE Communications Magazine**, January 1989, , Pags 81-97.
- [Ramos, 1998] Ramos, R.B., Silva, J.R. A Formal Model for Integrated Complex Dynamic Systems, **IMS'98, Workshop on Intelligent Manufacturing Systems**, Gramado (Brasil), December, 1998.
- [Ramos, 1999] Ramos, R.B., Silva, J.R. An Integron-Based Architecture for the Modeling of Complex Dynamic Systems, **SBAI'99, Brazilian Symposium of Automation**, São Paulo, September, 1999.
- [Ramos, 2001] Ramos, R.B., Silva, J.R. Integron Based Control Architecture for AUV's, **11th International Offshore and Polar Engineering Conference**, Stabanger, Norway, June, 2001.
- [Rumbaugh, 1991] Rumbaugh, J. Blaha, M., Premerlani, W., Eddy, F., Lorensen, W.; **Object-Oriented Modeling and Design**, Prentice-Hall, 1991.

- [Satava, 1998] Satava, R.M.; Jones, S.B.; Current and Future Applications of Virtual Reality for Medicine, **Proceedings of the IEEE**, Volume: 86 Issue: 3, P. 484 -489, March 1998.
- [Satava, 1997] Satava, R.M.; Jones, S.B.; Virtual Reality for Medical Applications, Information Technology Applications in Biomedicine. **Proceedings of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Region 8 International Conference 1997. ITAB '97**, P. 19 -20, Sept. 1997.
- [Schiel, 1990] Schiel U.; Net Hierarchies **Proceedings of the International Conference on Databases, Parallel Architectures and Their Applications**, Los Alamitos, CA, USA: IEEE Comput. Soc. Press, 1990.
- [Shelbourn, 1998] Shelbourn, M.; Aouad, G.; Hoxley, M.; An Integrated Virtual Reality and Case-Based Reasoning Model for Training in Building Pathology. **Proceedings of the IEEE Conference on Information Visualization, 1998**, P. 44 -49, July 1998.
- [Silva, 1995] Silva, J.R.; Afsarmanesh, H., Lucena, C. J. P., Cowan, D.; An Object Oriented Approach To The Design Of Flexible Manufacturing, **Balanced Automation Systems : Architectures and Design Methods**, p. 91-106, ed.London, Chappman and Hall, 1995.
- [Silva, 1996] Silva, J.R.; Ramos, R. L.; Miyagi, P. E.; Supervisory Control Of Integrated Building Systems: A Balanced Approach, **Balanced Automation II : Implementation Challenges for Antropocentric Manufacturing**, ed.London, Chappman and Hall, 1996.
- [Silva, 1998] Silva, J.R.; Interactive Design of Integrated Manufacturing Systems, **Proceedings of IFIP Conference on Balanced Automation Systems**, Praga, 1998.
- [Silva, 2003a] Silva, J.R.; Poli M.; Restrepo, P.A.; Towards a Modeling Discipline for Building and Residence Automation, **Analns of 17th International Conference in Mechanical Engineering**, São Paulo, 2003.
- [Silva, 2003b] Silva, J.R.; Foyo, P. M. G; Towards a Unified View of Petri Nets and Object Oriented Modeling, **Analns of 17th International Conference in Mechanical Engineering**, São Paulo, 2003.

- [Stipidis, 1998] Stipidis, E., Li Shuming., Powner E.T., Intelligent Building Systems: System Integration using ATM, **IEEE Conference** p. 349-358. 1998.
- [Tait, 1992] Tait A.; Desktop virtual reality, **Proceedings of the IEE Colloquium on Using Virtual World**, pp. 5/1-5/5, London, UK, 1992.
- [Tianmiao, 2001] Tianmiao W., Da L., Lei H., Hongbo Lv, Zingang W., Zesheng T.; A Simulation and Training Systems of Robot Assisted Surgery Based on Virtual Reality, **Proceedings of the International Workshop on Medical Imaging and Augmented Reality (MIAR '01)**, Shatin, N.T., Hong Kong, June 2001.
- [Valette, 1979] Valette R.; Analysis of Petri Nets by Stepwise Refinement, **Journal of Computer and System Sciences**, Vol. 18, p 35-46, Fevereiro 1979.
- [Whyte, 1999] Whyte, J.; Bouchlaghem, D.; Thorpe, T.; Visualization and information: a building design perspective, **Proceedings. 1999 IEEE International Conference on Information Visualization** p. 104-109. Nice France, July 1999.
- [Whyte, 1998] Whyte, J.; Bouchlaghem, D.; Thorpe, T.; Visualising Residential Development Using Desktop Virtual Reality, **Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Information Visualization** p. 40-43. July 1998.
- [Wong, 1995] Wong R.; Advanced Object-Oriented techniques for Modeling Robotic Systems, **Proceedings. 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation** p. 1099-1104, 1995.
- [Zapf, 1999] Zapf M.; Heintl A.; Techniques for Integrating Petri-Nets and Object Oriented Concepts **Working papers in Information Systems**, Agosto 1999.
- [Zhou, 1995] Zhou M., Wang D. T.; Design of Petri Net Objects and their application in command and Control Systems, **Proceedings IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetic**, Vol. 5, p. 3463-3468, Vancouver, Canada, 1995.
- [Zuzuki, 1983] Zuzuki I., Murata T.; A method for Stepwise Refinement and Abstraction of Petri Nets, **Journal of Computer and Systems Sciences** Vol. 27, p. 51-76. , Agosto 1983.

**Cláudio Gomes Fernandes**

**“ESTUDO DE UM MODELO ARQUETÍPICO DA  
DINÂMICA DE UNIDADES FLUTUANTES”**

Dissertação apresentada ao Departamento de  
Engenharia Naval e Oceânica da Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Mestre em Engenharia

São Paulo

2004



**Cláudio Gomes Fernandes**

**“ESTUDO DE UM MODELO ARQUETÍPICO DA  
DINÂMICA DE UNIDADES FLUTUANTES”**

Dissertação apresentada ao Departamento de  
Engenharia Naval e Oceânica da Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração  
Engenharia Naval e Oceânica

Orientador  
Prof. Dr. Jessé Rebello de Souza Júnior

São Paulo  
2004

FERNANDES, Cláudio Gomes  
Estudo de um modelo arquetípico da dinâmica de unidades  
flutuantes. São Paulo, 2003.  
130p.

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

1. Dinâmica não-linear 2. Modelo arquetípico 3. Sistemas  
flutuantes

I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento  
de Engenharia Naval e Oceânica II. t

À Daniele.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais pelo apoio e suporte por todo meu período de formação acadêmica.

Ao meu orientador por suas idéias que motivaram e contribuíram muito para esse trabalho.

*"Pensar que a natureza é formada por fenômenos previsíveis e imprevisíveis é, até certo ponto, sentir o Criador. A previsibilidade dos fatos, sua lógica e razão nos conduz facilmente à Matemática, enquanto a imprevisibilidade, o caos, nos atola no pântano da escuridão."*

**Descartes, 1637**

*"Depois de muito refletir, calcular e suar, concluí paradoxalmente que o mundo é composto de uma desordem organizada."*

**Lorenz, 1970**

Resumo .....	2
Abstract.....	3
LISTA DE FIGURAS.....	4
1. INTRODUÇÃO.....	7
2. DINÂMICA NÃO-LINEAR .....	12
2.1. Teoria qualitativa de equações diferenciais .....	13
2.2. Funções de Liapunov .....	18
2.3. Ciclos limite.....	23
2.4. Bifurcações .....	25
2.4.3. Bifurcação Fold .....	27
2.4.2. Bifurcações do tipo Hopf .....	30
3. MODELAGEM MATEMÁTICA.....	34
3.1. Modelagem do Sistema .....	35
3.1.1. Forças e Momentos Atuantes Sobre o Sistema .....	39
3.1.1.1. Forças e Momento devidos à Corrente.....	39
3.1.1.2. Amortecimento devido ao yaw.....	40
3.1.1.3. Amarras .....	41
3.1.1.4. Hawser.....	43
3.1.1.5. Forças e Momento devidos ao vento .....	44
3.2. Poços Potenciais.....	48
3.3. Modelo Arquetípico .....	55
3.4. Validação .....	75
4. RESULTADOS .....	79
4.1 Exploração do modelo arquetípico.....	88
4.1.1 Sistema de amarração DICAS.....	88
4.1.2 Sistema de amarração Turret .....	94
4.1.2.1 Parâmetros de projeto .....	107
4.1.2.2 Offloading.....	110
5. CONCLUSÕES.....	114
6. APÊNDICE .....	120
6.1 Derivação das funções modulo de seno e coseno .....	120
6.3 Algoritmo para construção de bacias de atração.....	123
7. BIBLIOGRAFIA.....	126

## Resumo

Com a crescente utilização de navios convertidos em unidades de produção e armazenamento, surgiu a necessidade de modelos numéricos que simulem a movimentação dinâmica da embarcação sob a influência de agentes ambientais, tais como vento e corrente.

Modelos matemáticos que representam a dinâmica do sistema de forma realista são geralmente complexos. Tal complexidade é ainda maior quando se consideram dois navios conectados, como verifica-se na operação de descarga de petróleo de um FPSO (navio-mãe) para um navio "shuttle" (aliviador). Os modelos matemáticos envolvidos são difíceis de serem tratados analiticamente. Em algumas análises, mesmo simulações numéricas tornam-se custosas em termos de tempo de simulação, inviabilizando certas análises.

Este trabalho consiste na elaboração de um modelo arquetípico (simplificado) que mantém as principais características do modelo completo. Dessa forma, análises qualitativas do sistema tornam-se mais fáceis de serem realizadas, através de, por exemplo, criação de mapas de bifurcação e bacias de atração.

O modelo arquetípico foi utilizado para realizar análises mais profundas da operação de descarregamento, até então não efetuadas para o modelo completo, assim como análise da influência da variação de alguns parâmetros de projeto do sistema sobre sua dinâmica.

## **Abstract**

The growing use of converted tankers as deep-water floating production, storage and offloading (FPSO) units has prompted the need for mathematical models capable of predicting accurately the dynamical behavior of these systems under the combined action of environmental agents such as wind and ocean currents.

Mathematical models representing the dynamics of FPSOs realistically are usually complex. Complexity increases when two interconnected ships (for example, the FPSO unit and a shuttle vessel in tandem configuration) are considered, as is the case when offloading operations are investigated. The resulting mathematical models are difficult to study by analytical means, and even numerical simulations can become time-consuming, precluding in-depth investigations.

The present work describes the development of an analytical (simplified) mathematical model for the dynamics of one or two vessels; it is shown that this model retains the main qualitative dynamical features of more complete models, such as their bifurcation diagrams and basins of attraction. The model has been also validated against experimental results.

The archetypal model proposed here has been used for in-depth analysis of the dynamics of offloading operations, not previously made with more sophisticated models. A qualitative parametric study was also carried out to assess the influence of some key design parameters upon the overall system dynamics.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ponto de equilíbrio estável .....	15
Figura 2.2 - Ciclo limite estável.....	23
Figura 2.3 - Diagrama de fase para $m = 0.5$ .....	27
Figura 2.4 - Diagrama de fase para $m = 0.0$ .....	28
Figura 2.5 - Diagrama de fase para $m = -0.5$ .....	28
Figura 2.6 - Bifurcação de Hopf supercrítica.....	31
Figura 2.7 - Bifurcação de Hopf subcrítica.....	31
Figura 2.8 - Trajetórias típicas da bifurcação de Hopf .....	32
Figura 3.1 - Referenciais empregados: sistema Turret (esquerda) e DICAS (direita) .....	34
Figura 3.2 - Comparação dos coeficientes do vento na condição lastreado .....	46
Figura 3.3 - Comparação dos coeficientes do vento na condição carregado ....	47
Figura 3.4 - Poço potencial relativo aos aproamentos .....	53
Figura 3.5 - Poço potencial relativo a posição do navio shuttle .....	54
Figura 3.6 - Poço potencial relativo a posição do navio FPSO .....	54
Figura 3.7 - $V < B$ e $\varphi = 0$ .....	59
Figura 3.8 - $V/A = 0.8$ e $\varphi = \pi/2$ .....	60
Figura 3.9 - $V/A = 0.2$ e $\varphi = \pi$ .....	61
Figura 3.10 - Função potencial do modelo arquetípico .....	63
Figura 3.11 - Função potencial do sistema completo.....	68
Figura 3.12 - Vista Lateral da função potencial do sistema completo ( Lhawser = 190m) .....	68
Figura 3.13 - Vista Lateral da função potencial do sistema completo ( Lhawser = 100m) .....	69
Figura 3.14 - Vista Lateral da função potencial do sistema com vento e corrente .....	70
Figura 3.15 - Comparação entre dados experimentais e simulação com modelo .....	76
Figura 3.16 - Comparação entre simulação com modelo completo e arquetípico .....	77
Figura 3.17 - Comparação entre dados experimentais e simulação com modelo .....	77
Figura 3.18 - Comparação entre simulação com modelo completo e arquetípico .....	78
Figura 4.1 - Diagrama de bifurcação para modelo completo ( $\psi_v = 10^\circ$ e $\psi_c = 180^\circ$ ) .....	80
Figura 4.2 - Diagrama de bifurcação para modelo completo ( $\psi_c = 180^\circ$ e $\psi_v = 0^\circ$ ) .....	81
Figura 4.3 - Diagrama de bifurcação para o sistema DICAS ( $\psi_v = 10^\circ$ ).....	83
Figura 4.4 - Diagrama de bifurcação para o sistema DICAS ( $\psi_v = 0^\circ$ ) .....	83
Figura 4.5 - Poço potencial para modelo completo .....	84

Figura 4.6 - Poço potencial para o modelo arquetípico.....	85
Figura 4.7 - Posicionamento com Turret na ponta do navio FPSO .....	85
Figura 4.8 - Turret posicionado à meia nau - Modelo Arquetípico.....	86
Figura 4.9 - Turret posicionado à meia nau - Modelo Completo .....	87
Figura 4.10 - Bacia de atração para sistema DICAS ( $\sigma = 1.3$ , $\psi_v=10^0$ e $\psi_c=180^0$ ).....	89
Figura 4.11 - Diagrama de fase para sistema DICAS ( $\sigma = 1.3$ , $\psi_v=10^0$ e $\psi_c=180^0$ ) .....	90
Figura 4.12 - Sistema de amarração DICAS .....	90
Figura 4.13 - Bacia de atração para sistema DICAS ( $\sigma = 0.3$ , $\psi_v=0^0$ e $\psi_c=180^0$ ) .....	91
Figura 4.14 - Diagrama de fase para sistema DICAS ( $\sigma = 0.3$ , $\psi_v=0^0$ e $\psi_c=180^0$ ) .....	91
Figura 4.15 - Bacia de atração para sistema DICAS ( $\sigma = 1.3$ , $\psi_v=0^0$ e $\psi_c=180^0$ ) .....	92
Figura 4.16 - Diagrama de fase para sistema DICAS ( $\sigma = 1.3$ , $\psi_v=0^0$ e $\psi_c=180^0$ ) .....	93
Figura 4.17 - Diagrama de bifurcação segundo variação de angulo de vento ( $\sigma = 2.0$ ).....	94
Figura 4.18 - Mapas de bifurcação para o navio FPSO ( $\psi_v=\frac{\pi}{4}$ e $\psi_c=\pi$ ) .....	95
Figura 4.19 - Mapas de bifurcação para o navio aliviador ( $\psi_v=\frac{\pi}{4}$ e $\psi_c=\pi$ )... ..	96
Figura 4.20 - Bacia de atração para sistema Turret ( $\sigma = 4.0$ , $\psi_v=\frac{\pi}{4}$ e $\psi_c=\pi$ ) .....	97
Figura 4.21 - Diagrama de fase para sistema Turret ( $\sigma = 4.0$ , $\psi_v=\frac{\pi}{4}$ e $\psi_c=\pi$ ) .....	97
Figura 4.22 - Bacia de atração para sistema Turret ( $\sigma = 6.0$ , $\psi_v=\frac{\pi}{4}$ e $\psi_c=\pi$ ) .....	98
Figura 4.23 - Diagrama de fase para sistema Turret ( $\sigma = 6.0$ , $\psi_v=\frac{\pi}{4}$ e $\psi_c=\pi$ ) .....	98
Figura 4.24 - Mapas de bifurcação para o navio FPSO ( $\psi_v=\frac{\pi}{4}$ e $\psi_c=\pi$ ) .....	100
Figura 4.25 - Mapas de bifurcação para o navio aliviador ( $\psi_v=\frac{\pi}{4}$ e $\psi_c=\pi$ ) .....	101
Figura 4.26 - Mapas de bifurcação para o navio FPSO ( $\psi_v=\frac{\pi}{4}$ e $\psi_c=\pi$ ) .....	103

Figura 4.27 - Mapas de bifurcação para o navio aliviador ( $\psi_v = \frac{\pi}{4}$ e $\psi_c = \pi$ ).	103
Figura 4.28 - Diagrama de fase e de atração do navio FPSO para $\partial = 0.8$ ....	104
Figura 4.29 - Diagrama de fase e de atração do navio FPSO para $\partial = 1.0$ ....	105
Figura 4.30 - Mapas de bifurcação para o navio FPSO ( $\psi_c = \pi$ ).....	106
Figura 4.31 - Mapas de bifurcação para o navio aliviador ( $\psi_c = \pi$ ) .....	106
Figura 4.32 - Mapas de bifurcação para o navio FPSO ( $\psi_c = \pi$ ).....	108
Figura 4.33 - Mapas de bifurcação para o navio FPSO ( $\psi_c = \pi$ ).....	109
Figura 4.34 - Mapas de bifurcação para o navio FPSO ( $\psi_v = \frac{\pi}{4}$ e $\psi_c = \pi$ ) .....	112
Figura 4.35 - Mapas de bifurcação para o navio aliviador ( $\psi_v = \frac{\pi}{4}$ e $\psi_c = \pi$ ).	113
Figura 6.1 - Função $\sin(x) \sin(x) $ (azul) e $\sin^2(x)$ (vermelho) .....	121
Figura 6.2 - Ponto de equilíbrio estável .....	124
Figura 6.3 - Ciclo limite .....	124

## 1. INTRODUÇÃO

Sistemas de exploração de petróleo na plataforma continental, também denominadas *offshore*, têm sofrido várias mudanças tecnológicas com os passar dos anos. A necessidade crescente de exploração em regiões cada vez mais profundas vem pressionando o desenvolvimento de novas tecnologias, na tentativa de tornar tal exploração economicamente viável. Essa tendência tem sido observada em regiões tais como a Bacia de Campos, Brasil, e Golfo do México.

Quando se refere a inovações tecnológicas, tem-se em mente não somente o ferramental submarino necessário às atividades de prospecção, perfuração e exploração, como também a unidade flutuante de exploração. Nesse contexto, navios convertidos para sistemas de produção, tais como FPSO (Floating, Production, Storage e Offloading), e FPDSO (Floating, Production, Drilling, Storage e Offloading) têm sido amplamente utilizados.

Esses navios possuem uma planta de exploração instalada em seu convés, o que lhes permite agregar as funcionalidades de uma plataforma de exploração convencional, com a capacidade de armazenamento de um petroleiro. Uma outra vantagem desses navios é o fator econômico. Alguns dos que estão atualmente operando eram antigos navios-tanque, ainda com casco simples, considerados obsoletos para o transporte marítimo. Assim, sua conversão tornou-se uma alternativa atraente em relação à construção de uma nova unidade de exploração, tal como uma plataforma semi-submersível.

Os navios convertidos também podem possuir diferentes formas de amarração ao leito do mar. Os mais utilizados são os sistemas *DICAS* e *Turret*<sup>1</sup>. O primeiro sistema consiste em amarrações com complacência diferenciada, de forma que o navio possui relativa liberdade de alinhamento com os agentes ambientais (vento, correntes e ondas), ficando, porém, impedido de se deslocar significativamente no plano horizontal, ou mesmo de efetuar grandes variações em seu aproamento. O segundo sistema consiste na utilização de um *turret*, para o qual convergem as linhas de amarração e *risers*. O *turret*, essencialmente um cilindro vertical em torno do qual o navio pode girar, não restringe o movimento de rotação do navio (guinada ou *yaw*), e também permite um maior deslocamento horizontal deste em relação a sua posição de instalação.

Em termos de comportamento dinâmico, esses navios, comparados a plataformas semi-submersíveis, possuem a desvantagem de serem mais "sensíveis" à excitações ambientais, notadamente às ondas. Este fato decorre da grande superfície do casco exposta na altura da linha d'água. Além disso, a geometria de corpo esbelto do navio acarreta uma grande sensibilidade dos esforços ambientais em relação a sua direção relativa de incidência sobre o casco. Isso torna mais difíceis suas operações, tais como perfuração, ou mesmo exploração. Uma das operações que os sistemas de produção realizam freqüentemente é a transferência de petróleo e seus derivados para navios aliviadores. Durante essa operação, o navio principal tem que transferir o óleo através de um duto flexível (*hose*) para um outro navio, que irá levar o óleo a

outras instalações de processamento. Os navios são conectados por um cabo (*hawser*) em uma configuração em *tandem* (proa-pôpa ou proa-proa). É necessário portanto, que, durante esse acoplamento, os navios mantenham entre si posições relativas adequadas, que minimizem riscos de acidentes envolvendo colisão ou rompimento de cabos ou dutos.

O conhecimento da dinâmica de tal sistema, sob ação de agentes ambientais, tais como vento, corrente e ondas, principalmente durante a operação de descarregamento do óleo (*offloading*), representa um importante aspecto em seu projeto. As condições ideais durante essa operação são definidas operacionalmente. Porém o estudo da dinâmica permite analisar, e eventualmente projetar, as características dos navios, e assim o comportamento do sistema de modo a atender as condições ideais pré-definidas.

A dinâmica de sistemas FPSO tem sido objeto de estudos já há alguns anos. Aghamohammadi e Thompson (1990) e Simos et al. (2001) mostram estudos experimentais da dinâmica de um navio tanque, amarrado por um único ponto (Single-Point Mooring), revelando uma variedade de regimes de resposta, tais como ciclo limite e bifurcações, mediante alteração de parâmetros do modelo, tais como comprimento da linha de amarração. Leite et al. (1998) e Bernitas et al. (1999) realizaram estudos também apenas com o navio FPSO, e revelaram que dependendo do modelo de corrente e vento adotados, a dinâmica pode apresentar bifurcações de pontos de equilíbrio, ciclos limite e até movimentos que indiquem caos. Contudo, vale a pena mencionar que o modelo

hidrodinâmico de Bernitas é adaptado de modelos de manobra avante, por isso, valendo apenas para pequenos ângulos de aproamento. Morishita e Cornet (1998) e Souza Junior et al. (2000) investigaram a dinâmica do movimento de dois navios amarrados em configuração *tandem*, (navio FPSO e navio aliviador), representando a operação de *offloading*, mediante ação de vento e corrente. Com seis graus de liberdade acoplados, esse sistema apresenta uma variedade dinâmica enorme, não apenas pelos diferentes regimes de resposta, como pelo número de parâmetros, a cuja variação o modelo apresenta grande sensibilidade. Variando-se também a forma de amarração do navio FPSO obtém-se diferentes comportamentos dinâmicos para o sistema.

Tal sistema possui um nível de complexidade grande, dadas as não linearidades presentes nos modelos de corrente e vento, e principalmente pelo acoplamento dos seis graus de liberdade. Isso torna difícil uma investigação analítica do sistema, no sentido de conhecer os "fenômenos" de sua dinâmica, e, portanto, limitando o poder de síntese de projeto. Até mesmo uma investigação numérica torna-se custosa do ponto de vista de tempo de processamento, visto que para uma simples análise da estabilidade dos pontos de equilíbrio um grande número de simulações deve ser feito.

Nesse contexto, pretende-se buscar um modelo simplificado do sistema navio FPSO e navio aliviador (sistemas de amarração DICAS e *Turret*), modelo este que torne viável um estudo analítico do problema e permita aplicar ferramentas de dinâmica não linear que propiciem um melhor entendimento do sistema, identificando os fenômenos mais importantes de sua dinâmica.

A determinação do modelo simplificado, também denominado "arquetípico", parte do estudo das funções potenciais do modelo completo, no qual verificou-se que os graus de liberdade que representam os aproamentos dos navios são os que regem a dinâmica do sistema. Portanto, pretende-se obter um modelo com apenas esses dois graus de liberdade, que represente, porém, da melhor maneira possível os fenômenos do modelo completo. Com o objetivo de se obter um modelo relativamente simples para os agentes ambientais de vento e corrente, pretende-se verificar quais dentre seus componentes mais influenciam os pontos de equilíbrio do sistema, através do estudo dos zeros das funções que os representam. Assim, através de resultados anteriores obtidos com o modelo completo e também de dados experimentais, pretende-se validar o modelo arquetípico, possibilitando a investigação de fenômenos de interesse no sistema completo.

Pretende-se, dessa forma, realizar um estudo da fenomenologia do problema com o modelo reduzido, investigar características dinâmicas importantes, as quais não seria possível analisar com o modelo completo, a fim de obter um melhor entendimento do sistema real.

---

<sup>1</sup> O termo *Turret* será utilizado em inglês por ser um termo já consagrado dentro da área de aplicação.



## 2. DINÂMICA NÃO-LINEAR

O objetivo de uma revisão no campo da dinâmica não linear é a exposição da teoria envolvida nas ferramentas que serão utilizadas neste trabalho. Pretende-se assim expor o campo de aplicação de tais ferramentas, suas funcionalidades bem como suas limitações.

A principal motivação da dinâmica não-linear é a introdução de idéias geométricas e qualitativas que auxiliem na análise de sistemas não-lineares, cujas equações diferenciais não podem ser resolvidas de maneira analítica e também cuja não-linearidade é fator preponderante na fenomenologia do sistema.

Uma primeira abordagem de dinâmica não-linear é a busca sobre o conhecimento da estabilidade de um sistema em uma região do seu espaço de estado, e mais especificamente, ao redor de um ponto de equilíbrio (também chamado de atrator). O mapeamento dos pontos de equilíbrio de um sistema é de suma importância para o conhecimento de sua dinâmica. Para tanto, uma primeira tentativa de se obter tal mapeamento é um estudo sobre as equações diferenciais envolvidas.

## 2.1. Teoria qualitativa de equações diferenciais

Dado um sistema autônomo representado por uma equação diferencial na forma:

$$\dot{x} = f(x) \quad f : U \rightarrow \mathfrak{R}^n \quad (1)$$

Diz-se que um campo vetorial  $f(x)$  de classe  $\ell^1$  gera o fluxo  $\phi_t : U \rightarrow \mathfrak{R}^n$ , onde  $\phi_t(x) = \phi(x, t)$  é uma função contínua definida para todo  $x \in U \rightarrow \mathfrak{R}^n$  e  $t$  em um intervalo  $(a, b) \subseteq \mathfrak{R}$ . Assim  $\phi_t$  satisfaz:

$$\frac{d}{dt}[\phi(x, t)]|_{t=\tau} = f(\phi(x, \tau)) \quad (2)$$

onde  $\phi_t$  é única segundo o teorema da existência e unicidade. Podemos tomar como exemplo um sistema linear da forma:

$$\dot{x} = Ax \quad x \in \mathfrak{R}^n \text{ e } A_{n \times n} \in \mathfrak{R}^{n \times n} \quad (3)$$

Tem-se  $\phi_t(x) = x_0 \cdot e^{A \cdot t}$  como solução para 3 com base em  $x_0$ . Dessa forma o operador  $e^{A \cdot t}$  define um fluxo sobre  $\mathfrak{R}^n$  e, pensando em termos vetoriais, fazendo com que os autovetores da matriz  $A$  gerem sub-espacos invariantes locais em  $\mathfrak{R}^n$  :

$E^s$  - sub-espço estável (também chamado de variedade estável) : gerado pelos auto vetores cujos auto valores possuam parte real negativa.

$E^u$  - sub-espço instável (também chamado de variedade instável) : gerado pelos auto vetores cujos auto valores possuam parte real positiva.

$E^c$  - sub-espço central : gerado pelos auto vetores cujos auto valores possuam parte real nula.

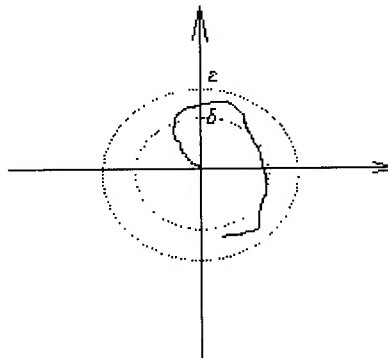
Nesse contexto começa o estudo sobre estabilidade e, principalmente, sobre a estabilidade de um ponto de equilíbrio, ou seja, sobre a estabilidade local.

Como ponto de equilíbrio entende-se por:

$$f(\bar{x}) = 0 \quad \text{onde } \bar{x} \text{ é o ponto de equilíbrio}$$

Segundo Guckenheimer e Holmes (1983)  $\bar{x}$  é ponto de equilíbrio estável  $\xleftrightarrow{\text{def}}$  dado  $\varepsilon > 0$  deve existir  $\delta(\varepsilon)$  tal que:

$$|x_0 - \bar{x}| < \delta \Rightarrow |\phi_t(x_0) - \phi_t(\bar{x})| < \varepsilon \quad \forall t > 0$$



**Figura 2.1 - Ponto de equilíbrio estável**

Para  $\bar{x}$  ser ponto de equilíbrio assintoticamente estável  $\leftarrow^{def} \rightarrow$

1-  $\bar{x}$  é ponto de equilíbrio estável e

2-  $\lim_{t \rightarrow \infty} \phi_t(x_0) = \bar{x}$ .

Tais definições representam condições necessárias e suficientes para definição de estabilidade. Porém não são práticas do ponto de vista algébrico, pois é necessário o conhecimento de  $\phi_t$  para determinação da estabilidade do ponto de equilíbrio.

Nesse contexto utiliza-se os teoremas locais de estabilidade. Um deles é o teorema de Hartman-Grobman (ver Wiggins, 1977). Esse teorema relata que dado um sistema não linear na forma  $\dot{x} = f(x)$  com  $x \in \mathfrak{R}^n$ ,  $f: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^n$  e de classe  $\ell^1$ , com ponto de equilíbrio  $\bar{x}$ , uma boa forma de se caracterizar seu comportamento local é estudar sua dinâmica perto da solução  $\bar{x}$ . Assim fazendo a linearização:

$$\dot{\xi} = [J_f]_{\bar{x}} \cdot \xi \quad (4)$$

onde  $[J_f]_{\bar{x}}$  é a matriz jacobiana de  $f$  e  $x = \bar{x} + \xi$ , com  $|\xi| \leq 1$ .

Assim, segundo o teorema de Hartman-Grobman, se  $[J_f]_{\bar{x}}$  não possui nenhum auto-valor puramente imaginário então existe um homeomorfismo  $h$  definida na vizinhança  $U$  de  $\bar{x}$  em  $\mathfrak{R}^n$  que representa órbitas do fluxo não-linear  $\phi_t$  da equação 1 para o fluxo linear  $e^{[J_f]_{\bar{x}}t}$  de 4. Esse homeomorfismo preserva o sentido das órbitas e pode ser escolhida de maneira a preservar a parametrização do tempo.

Outro teorema local é o teorema da estabilidade linearizada de Liapunov, o qual, de certa forma, sintetiza as idéias principais do teorema anterior. O teorema diz respeito a um sistema  $\dot{x} = f(x)$  com  $x \in \mathfrak{R}^n$ ,  $f: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^n$  e de classe  $\ell^1$ , com ponto de equilíbrio  $\bar{x}$ ,  $A$  a matriz jacobiana de  $f(x)$  e  $\Gamma$  o espectro de  $A$  (conjunto composto por todos os autovalores de  $A$ ). Sendo  $\lambda_i$  o  $i$ ésimo autovalor de  $A$ :

se  $\text{Re}[\lambda_i] < 0, \forall \lambda_i \in \Gamma \Rightarrow \bar{x}$  é assintoticamente estável;

se  $\exists \lambda_i \in \Gamma | \text{Re}[\lambda_i] > 0 \Rightarrow \bar{x}$  é instável e

se  $\exists \lambda_i \in \Gamma | \text{Re}[\lambda_i] = 0$  e para todos os outros  $\lambda_i \in \Gamma \text{Re}[\lambda_i] < 0 \Rightarrow$  nada pode-se afirmar a respeito da estabilidade de  $\bar{x}$ .

Em termos práticos, a principal limitação dos teoremas locais é saber as fronteiras de validade da linearização como também quando se obtém da linearização autovalores com parte real nula, o que como visto no teorema acima, nada consegue-se saber sobre a estabilidade do ponto.

Quando menciona-se de fronteiras de validade da linearização, refere-se, por exemplo, à ocorrência dos chamados ciclos limites os quais serão definidos no item 2.2.

Autovalores cujas partes reais são nulas, refere-se a pontos com estabilidade orbital. E uma forma eficaz que se verificar sua estabilidade é através de mapas de Poincaré, os quais consistem em mapas de tempo discreto que, de forma simplificada, consistem em seções no plano de estados do fluxo  $\phi_t$  do sistema em intervalos  $\Delta t$ .

Pode-se definir mapas de Poincaré através das vizinhanças de uma órbita periódica, de uma maneira mais completa da seguinte maneira:

Considere a seguinte equação diferencial ordinária:

$$\dot{x} = f(x) \quad x \in \mathfrak{R}^n$$

onde  $f:U \rightarrow \mathfrak{R}^n$  é  $C^r$  em algum aberto de  $U \subset \mathfrak{R}^n$ . Seja  $\phi_t$  o fluxo de  $f(x)$  e suponha que a equação diferencial acima tenha uma solução periódica de período  $T$  a qual podemos chamar de  $\phi(t+T, x_0)$ , onde  $x_0 \in \mathfrak{R}^n$  é qualquer ponto pelo qual passa uma solução periódica (ou seja,  $\phi(t+T, x_0) = \phi(t, x_0)$ ). Seja  $\Sigma$  uma superfície de dimensão  $n-1$  transversal ao fluxo em  $x_0$ . Assim é possível encontrar um conjunto aberto  $V \subset \Sigma$  tal que as trajetórias começando em  $V$  retornam para  $\Sigma$  em um tempo fechado  $T$ . O mapa que associa pontos em  $V$  com seus primeiros pontos de retorno para  $\Sigma$  é chamado mapas de Poincaré, o qual denota-se por  $P$ . Sendo mais preciso:

$$P: V \rightarrow \Sigma,$$

$$x \rightarrow \phi(\tau(x), x),$$

onde  $\tau(x)$  é o tempo de primeiro retorno do ponto  $x$  para  $\Sigma$ . Assim:

$$\tau(x) = T \quad e \quad P(x_0) = x_0$$

Assim, uma importante característica de tais mapas é que pontos fixos de  $P$  correspondem a órbitas periódicas da equação diferencial acima citada.

## 2.2. Funções de Liapunov

As funções de Liapunov, em um caso particular, podem ser entendidas como funções de energia potencial de um determinado sistema. Assim consegue-se visualizar regiões de alto e baixo níveis energéticos, identificando dessa forma regiões de atração em torno de um determinado ponto de equilíbrio.

Através do método direto de Liapunov consegue-se obter essa noção qualitativa do domínio de estabilidade de atratores, como também se sua estabilidade é global ou apenas local. Para pontos não hiperbólicos também é possível obter "idéias" qualitativas quanto sua estabilidade, pois sabe-se em que direção a função de Liapunov cresce ou decresce, e pensando em termos de energia, sabe-se em que direção do "poço potencial" tem-se a região de menor valor da função (menor energia).

Para definição da função de Liapunov algumas definições são

necessárias.

- Função localmente definida positiva

Uma função  $V(x)$  com  $V : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$  é localmente positiva definida ao redor de  $\bar{x} \xleftarrow{\text{def}} \rightarrow$   $\exists$  um domínio em  $\mathfrak{R}$  definida pela circunferência  $C(\bar{x})$  em torno de  $\bar{x}$  para a qual:

i)  $V(\bar{x}) = 0$

ii)  $V(x) > 0; \forall x \in C(\bar{x})$  exceto  $\bar{x}$ .

- Função localmente semi-definida positiva

Uma função  $V(x)$  com  $V : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$  é localmente semi-definida positiva ao redor de  $\bar{x} \xleftarrow{\text{def}} \rightarrow$   $\exists$  um domínio em  $\mathfrak{R}$  definida pela circunferência  $C(\bar{x})$  em torno de  $\bar{x}$  para a qual:

i)  $V(\bar{x}) = 0$

ii)  $V(x) \geq 0; \forall x \in C(\bar{x})$ .

- Função globalmente positiva definida

Uma função  $V(x)$  com  $V : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$  é globalmente positiva definida  $\xleftarrow{\text{def}} \rightarrow$  se para todo  $\mathfrak{R}$  vale:

i)  $V(\bar{x}) = 0$

ii)  $V(x) > 0; \forall x \in \mathfrak{R}^n$ .



- Função globalmente positiva semi-definida.

Uma função  $V(x)$  com  $V: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$  é globalmente positiva semi-definida  $\xleftarrow{\text{def}} \rightarrow$

se para todo  $\mathfrak{R}$  vale:

i)  $V(\bar{x}) = 0$

ii)  $V(x) \geq 0; \forall x \in \mathfrak{R}^n$ .

Essas mesmas definições podem ser aplicadas para funções localmente/globalmente negativa definida ou semi-definida.

Com essas definições é possível definir uma função de Liapunov. Função de Liapunov é uma função  $V: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ , localmente positiva definida, tal que  $\dot{V}(x)$  é localmente negativa semi-definida.

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} : \left[ \frac{\partial V}{\partial x_1}; \frac{\partial V}{\partial x_2}; \frac{\partial V}{\partial x_3}; \dots; \frac{\partial V}{\partial x_n} \right] \cdot \dot{x}$$

Através dessas definições pode-se definir o teorema da estabilidade local de Liapunov:

- Seja um sistema descrito pela equação diferencial:

$$\dot{x} = f(x) \quad \text{com } f: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^n \text{ e } f \in \ell^1$$

e seja  $\bar{x}$  um ponto de equilíbrio do sistema de maneira que:

$$f(\bar{x})=0$$

Se  $\exists$  uma função  $V(x)$ , com  $V: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  e  $V(x)$  é uma função de Liapunov, então  $\bar{x}$  é localmente estável.

Caso a função de Liapunov seja globalmente positiva definida e  $\dot{V}(x)$  seja globalmente negativa semi-definida, então  $\bar{x}$  é globalmente estável.

Através do método de Liapunov pode-se garantir também a estabilidade assintótica de um ponto de equilíbrio. Dessa forma se  $\exists V(x)$  com  $V: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ , com derivadas contínuas, tal que:

A1)  $V(x)$  é positiva definida ao redor de  $C(\bar{x})$  e

A2)  $\dot{V}(x)$  é negativa definida ao redor de  $C(\bar{x})$ .

Então  $\bar{x}$  é localmente, assintoticamente estável. Dessa forma, consegue-se obter informação sobre estabilidade do ponto definido através de uma função de Liapunov previamente definida.

No entanto, nem sempre a definição de uma função de Liapunov é uma operação trivial. Porém, em alguns casos, a função potencial de um determinado sistema definido por:

$$V = - \int f(x).dx \quad p/ \dot{x} = 0 \quad (5)$$

pode representar uma função de Liapunov. Dado um ponto de equilíbrio que

deseja-se estudar, pode-se normalizar  $V(x)$  de maneira que  $V(x)=0$ . Dessa forma pode-se definir  $V(x)$  como localmente definida/semi-definida positiva ou negativa e caso  $\bar{x}$  seja realmente ponto de equilíbrio  $\dot{V}(x)$  será localmente definida/semi-definida positiva ou negativa, já que em um ponto de equilíbrio o nível energético é mínimo/máximo respectivamente ( $\dot{V}(\bar{x})$ ). Dessa forma, o estudo da função potencial torna-se um caso particular do método de Liapunov.

Como dito, para pontos não hiperbólicos, dependendo do sistema, pode-se analisar como a energia potencial varia com a variável de estado. Assim, conclusões podem ser tiradas a partir de  $V(x)$ , assim como o domínio de atração de um determinado ponto. Analisando graficamente  $V(x)$ , pode-se observar "vales" e "picos" na função potencial, e avaliar as regiões de atração para cada ponto fixo.

Uma vantagem de se analisar apenas a função de energia potencial (e não a utilização de uma função de Liapunov) é que se reduz o número de variáveis de  $V(x)$ , já que, para se obter  $V(x)$ ,  $\dot{x}$  é considerado zero (apenas variação de energia potencial). Assim analisa-se apenas a variação de energia da função restauração do sistema. Porém, em sistemas cuja não linearidade apresenta-se no termo dependente de  $\dot{x}$  (em geral, termo dissipativo) perde-se poder de análise com essa abordagem.

Para o caso de um oscilador de Van der Pol, por exemplo, o surgimento dos ciclos limite não seria percebido pelo estudo da função potencial. Nesse caso, tem-se um acoplamento entre  $x$  e  $\dot{x}$ . Porém, em sistemas mecânicos, cujo elemento dissipativo seja dependente apenas de  $\dot{x}$ , e todas as não-

linearidades do sistema provém dos elementos de restauração, a análise da função  $V(x)$  é uma forma simples e eficaz de se analisar tal sistema.

### 2.3. Ciclos limite

Ciclos limite consistem em atratores periódicos que apresentam trajetórias fechadas e isoladas no espaço de estado. Particularizando, para se ter um ciclo limite estável, por exemplo, sobre um ponto de equilíbrio  $\bar{x}$ , deve-se garantir que a origem  $(\bar{x}, 0)$  no espaço de estado seja instável, assim as trajetórias de pequena amplitude movem-se no sentido de se afastar da origem, enquanto que trajetórias de grande amplitude movem-se no sentido de se aproximar do ponto  $(\bar{x}, 0)$ .

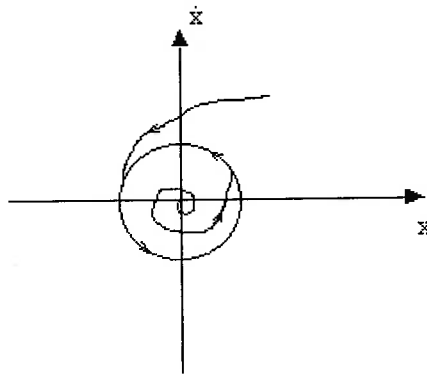


Figura 2.2 - Ciclo limite estável

Um exemplo é mostrado em Thompson e Stewart (1986) considerando um oscilador na forma:

$$m.\ddot{x} - c.\dot{x} + d.\dot{x}^3 + k.x = 0 \quad (6)$$

Para pequenas amplitudes pode-se linearizar o sistema descrito pela equação 6 apenas eliminando o termo não linear. Com isso, resta apenas um oscilador linear do tipo massa-mola-amortecedor com amortecimento negativo, o que significa que o ponto de equilíbrio (0,0) no espaço de estado é um foco instável. Porém, para grandes amplitudes o termo não linear é preponderante, e como consiste de um amortecimento positivo, faz com que as trajetórias sigam no sentido do ponto de equilíbrio, ficando porém em uma oscilação permanente, pois chegando perto do ponto (0,0) é novamente repelido.

Com respeito a existência dos ciclos limite, podemos citar o teorema de Hopf que garante a existência de um ciclo limite para um sistema dependente de um único parâmetro, chamado de  $\mu$ , e que para  $\mu=0$  tem-se soluções periódicas:

- Suponha que um sistema  $\dot{x} = f_{\mu}(x)$ ,  $f: U \rightarrow \mathfrak{R}^n$ ,  $x \in \mathfrak{R}^n$  e  $\mu \in \mathfrak{R}$  tem um ponto de equilíbrio  $(x_0, \mu_0)$  na qual as seguintes propriedades são satisfeitas:

- 1)  $D_x f_{\mu_0}(x_0)$  tem um par simples de autovalores imaginários puros  $(\lambda(\mu), \bar{\lambda}(\mu))$  e nenhum outro autovalor com parte real nula.

$$2) \frac{d}{d\mu} [\operatorname{Re} \lambda(\mu)]|_{\mu=\mu_0} = d \neq 0$$

Então há uma faixa de valores, tanto positivos quanto negativos de  $\Delta\mu = \mu - \mu_0$  para os quais cada  $\mu$  corresponde um único ciclo limite a uma distância

$$O\left[|\Delta\mu|^{\frac{1}{2}}\right] \text{ de } x_0.$$

## 2.4. Bifurcações

Segundo Thompson e Stewart (1986) pode-se definir como ponto de bifurcação todo ponto que, no espaço de parâmetro de controle em estudo, apresente um campo vetorial (trajetórias no espaço de estado) estruturalmente instável. Essa definição mostra-se bastante genérica, abrangendo bifurcações locais dinâmicas e estáticas, assim como bifurcações globais nos retratos de fase. Outros autores, tais como Hilborn (1994) definem teoria das bifurcações como o estudo de como as características de pontos fixos (referência à mapas discretos de Poincaré) e outros tipos de atratores no espaço de estado mudam mediante alteração de parâmetros do sistema. De certa forma, também é uma definição abrangente, porém mais específica a pontos de equilíbrio.

Para um sistema autônomo genérico da forma  $\dot{x} = N(x)$ , Thompson e Stewart (1986) cita o uso da teoria das variedades centrais para o estudo de bifurcações. A idéia principal de tal teoria é a tentativa de reescrever o sistema em equações desacopladas, reduzindo o número de graus de liberdade do sistema.

Em linhas gerais a teoria cita o sistema:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A.x + f(x, y) \\ \dot{y} &= B.y + g(x, y)\end{aligned}$$

com  $x \in \mathfrak{R}^N$ ,  $y \in \mathfrak{R}^M$  e A e B sendo matrizes constantes tais que os autovalores de A tem parte real nula enquanto que os autovalores de B tem parte real negativa. As funções f e g são de classe  $\ell^2$  com  $f(0,0) = 0$ ,  $f'(0,0) = 0$ ,  $g(0,0) = 0$  e  $g'(0,0) = 0$ . De forma geral, se existe variedade invariante  $y = h(x)$  com h lisa e  $h(0) = 0$  e  $h'(0) = 0$  então  $h(x)$  é dita variedade central.

Através de teorema, garante-se a existência da variedade central  $y = h(x)$  para  $|x| < \delta$  e que o fluxo na variedade central é governada pelo sistema n-dimensional:

$$\dot{u} = A.u + f(u, h(u))$$

Outro teorema na teoria cita que a equação acima contém toda informação necessária para determinar o comportamento assintótico de pequenas soluções para o sistema completo.

Dessa forma para a região  $|x| < \delta$  do espaço de estado, pode-se estudar a estabilidade do sistema através de uma variedade central e assim facilitando o estudo de bifurcações. Vale ressaltar que tal teoria é local e portanto é válida apenas ao redor de um domínio restrito dentro do espaço de estado.

Por bifurcações locais, pode-se destacar duas, as quais, como será visto, irão ser observadas no sistema em estudo.

### 2.4.3. Bifurcação Fold

A bifurcação fold também é conhecida como bifurcação sela-nó. Para melhor compreendê-la, pode-se tomar como exemplo um oscilador não linear, com restauração quadrática, e uma forçante parametrizada em  $\mu$ .

$$\ddot{x} + \dot{x} + x^2 = \mu \quad (7)$$

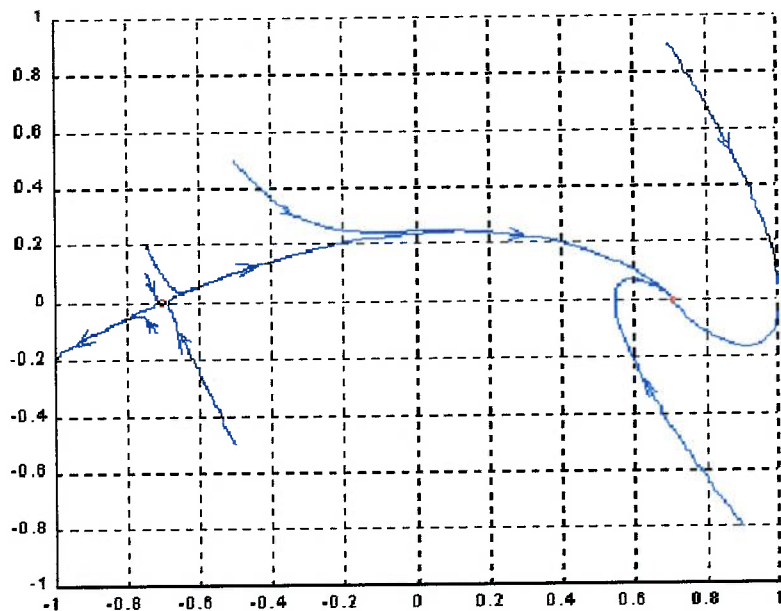
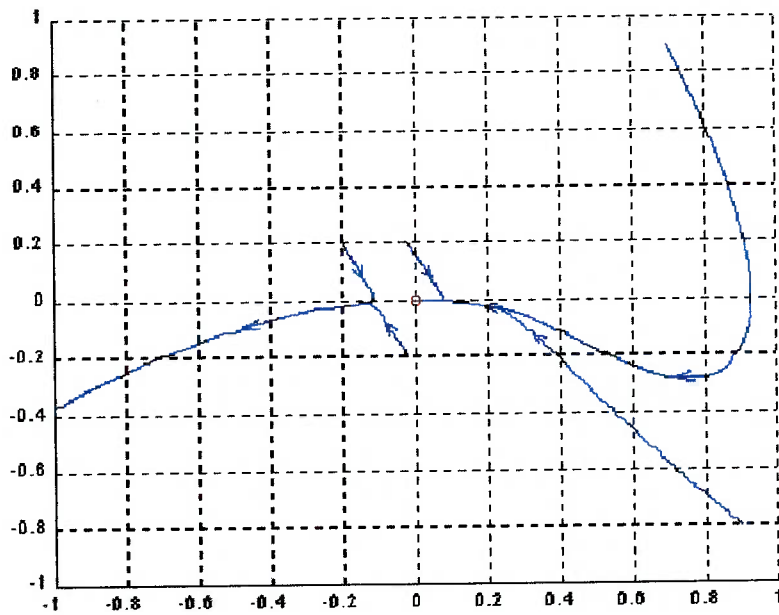
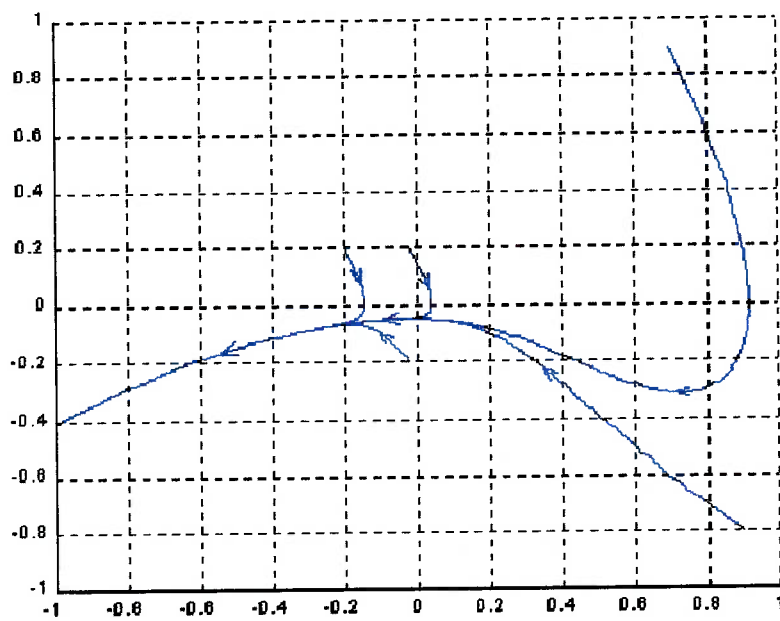


Figura 2.3 - Diagrama de fase para  $m = 0.5$





**Figura 2.4 - Diagrama de fase para  $m = 0.0$**



**Figura 2.5 - Diagrama de fase para  $m = -0.5$**

O retrato de fase do sistema acima, para diferentes valores de  $\mu$  pode

ser visto nas Figuras de 2.3 a 2.5. Para  $\mu = 0.5$ , há um atrator assintoticamente estável em  $x = \sqrt{0.5}$  e uma cela em  $x = -\sqrt{0.5}$ . A medida que diminui-se  $\mu$ , os dois pontos de equilíbrio se aproximam, até unirem-se e tornarem-se apenas um ponto de equilíbrio sela-nó, para  $\mu = 0$ .

Para  $\mu = 0$ , as trajetórias com posição inicial ( $x_0$ ) maior que zero, vão para o ponto de equilíbrio  $x = 0$ . Já as trajetórias com posição inicial menor que zero, tendem a instabilidade e vão para  $-\infty$ .

Para  $\mu < 0$  não tem-se ponto de equilíbrio real, e todas as trajetórias no espaço de estado tendem a  $-\infty$ .

A bifurcação fold pode ser representada e considerada restrita à sua variedade central. Aplicando assim a teoria da variedade central J. Carr (1978/1979), o campo vetorial de um fold pode ser expresso na forma:

$$\dot{x} = \mu - x^2 \tag{8}$$

Como mencionado, para  $\dot{x}=0$  existe uma relação quadrática entre  $\mu$  e  $x$ , o que gera um equilíbrio dito parabólico ( um caminho estável e outro instável com a variação de  $\mu$ ).

Esta representa a mais simples forma de bifurcação local, pois pode-se representá-la com um diagrama de fase uni-dimensional, apenas um parâmetro de controle, e possui termo não-linear de baixa ordem ( $x^2$ ).

Considerando a adição de mais termos equivalentes à expansão em série de Taylor da variedade, pode-se descobrir que essa adição não altera

qualitativamente a dinâmica local. Ou seja, uma pequena perturbação na dinâmica não irá alterar a bifurcação qualitativamente. Em outras palavras, pode-se dizer que a bifurcação fold é estruturalmente estável. Assim a variedade central expressa em (8) pode ser válida até mesmo em complicados sistemas dinâmicos que possuam esse tipo de bifurcação.

#### 2.4.2. Bifurcações do tipo Hopf

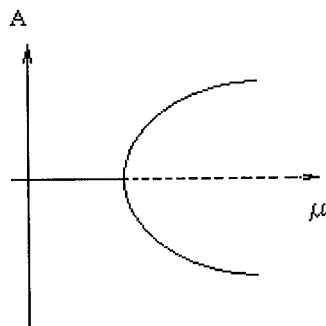
Chama-se bifurcação de Hopf a bifurcação contínua de um atrator em um ciclo limite. Como por exemplo podemos citar um oscilador com elementos dissipativo não-linear na forma:

$$\ddot{x} + \dot{x}(\dot{x}^2 - \mu) + x = 0$$

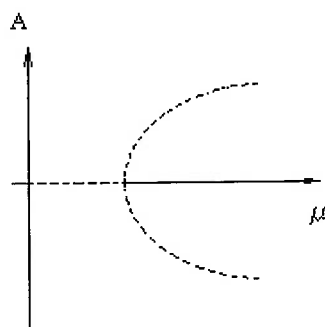
Essa equação apresenta um ponto de equilíbrio em  $x = 0$  e apresenta uma bifurcação de Hopf a medida que  $\mu$  muda de negativo para positivo. Para  $\mu < 0$  tem-se um amortecimento não-linear positivo ( $\dot{x}^3$ ) e um amortecimento linear também positivo, fazendo com que a origem seja um ponto assintoticamente estável. Para  $\mu = 0$  o ponto continua assintoticamente estável, porém a convergência é muito lenta. Para  $\mu > 0$ , o termo linear de amortecimento é negativo e dominante para baixas amplitudes de oscilação, fazendo com que a origem torne-se instável. No entanto, para oscilações

maiores, o termo não-linear é dominante, levando as trajetórias no espaço de estado para uma oscilação dentro de um ciclo limite. E quanto mais se aumenta  $\mu$ , o raio do ciclo limite também aumenta.

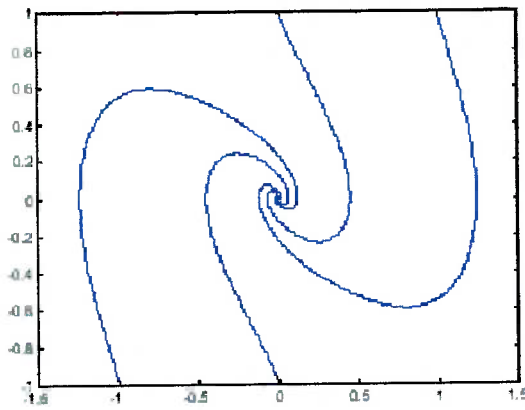
Esse tipo de bifurcação de Hopf é chamada de Hopf supercrítica (Figura 2.6). Um outro tipo de bifurcação de Hopf, mais crítica em termos de estabilidade, é o caso da Hopf subcrítica (Figura 2.7). As trajetórias no espaço de estado, para esse tipo de bifurcação são iguais à supercrítica, apenas com o sentido inverso das trajetórias. As trajetórias da bifurcação de Hopf podem ser vistas na Figura 2.8, de acordo com a variação de  $\mu$ .



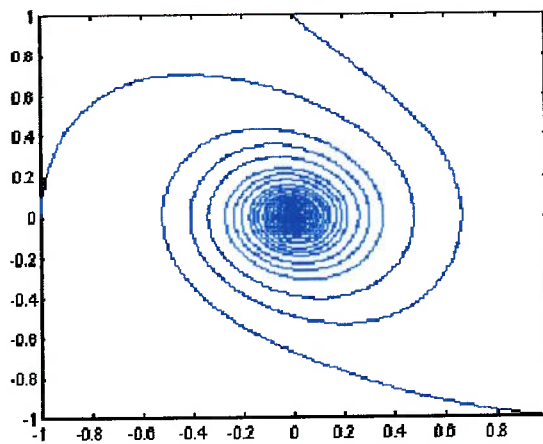
**Figura 2.6 - Bifurcação de Hopf supercrítica**



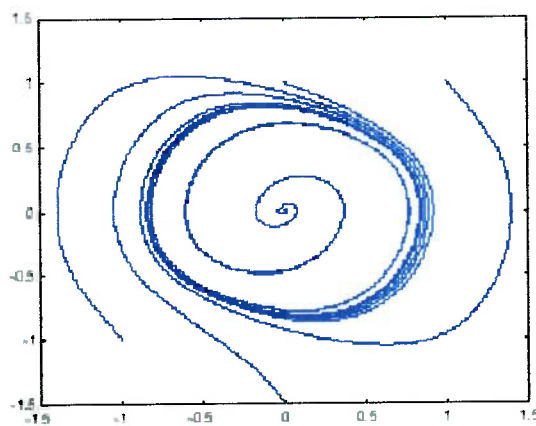
**Figura 2.7 - Bifurcação de Hopf subcrítica**



$\mu = -0.5$



$\mu = 0$



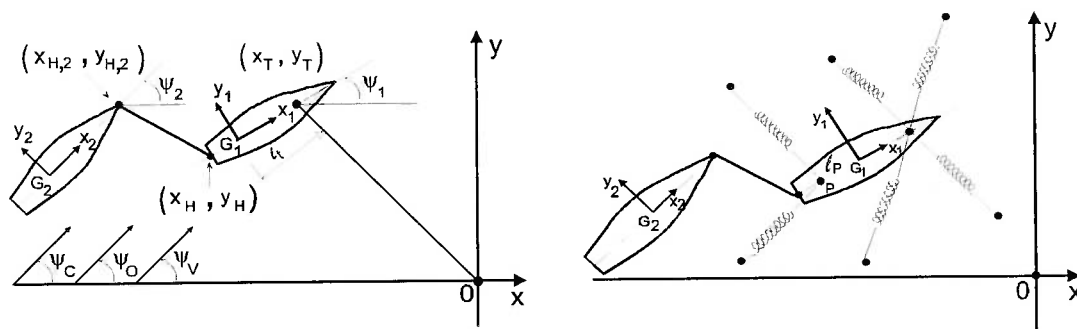
$\mu = 0.5$

**Figura 2.8 - Trajetórias típicas da bifurcação de Hopf**

Também chamada de Hopf em forma catastrófica, segundo Thompsom e Stewart (1986), o ponto de bifurcação é caracterizado pela mudança de um ponto de equilíbrio instável para um ponto de equilíbrio estável, porém com sua região de atração delimitada por um ciclo limite. Trajetórias fora desse ciclo limite, são repelidas, e trajetórias dentro dele, são atraídas para o ponto de equilíbrio. Um bom exemplo de sistema onde ocorre esse tipo de bifurcação pode ser encontrado nas equações de Lorenz.

### 3. MODELAGEM MATEMÁTICA

Primeiramente, pretende-se detalhar o modelo matemático do sistema baseado no qual quer-se construir um modelo arquetípico. Na Figura 3.1 tem-se uma ilustração do sistema (tanto para amarração com *Turret* como em complacência DICAS) com os referenciais utilizados. Os graus de liberdade envolvidos na modelagem são os movimentos de avanço (*surge*), deriva (*sway*) e guinada (*yaw*).



**Figura 3.1 - Referenciais empregados: sistema Turret (esquerda) e DICAS (direita)**

O primeiro referencial,  $OXYZ$ , é fixo à Terra (inercial). Os índices 1 e 2 representam respectivamente o navio carregador e o navio aliviador. O segundo e terceiro referenciais,  $G_1XYZ$  e  $G_2XYZ$ , são respectivamente presos ao centro de gravidade do navio de produção e do navio aliviador. Os eixos de cada referencial preso aos navios coincidem com os eixos principais de inércia das embarcações.

No caso do sistema Turret o ponto T representa sua posição. O ponto H é o ponto de amarração do "hawser" no FPSO, os pontos  $G_1$  e  $G_2$  os centros de

gravidade do FPSO e navio aliviador, respectivamente. No segundo caso, com o navio FPSO com linhas de amarração em complacência, as molas representam as linhas de amarração, com sua rigidez dada por equações de catenária, conforme será mostrado na seção 3.1.1.4.

### **3.1. Modelagem do Sistema**

Os resultados do estudo da dinâmica do sistema FPSO dependem do modelo hidrodinâmico adotado. Os primeiros modelos utilizados em estudos recentes foram propostos por Bernitas & Papoulias (1986), Garza-Rios & Bernitas (1999), Nishimoto & Brinati & Fucatu (1995). O modelo utilizado por tais autores baseia-se em equações de movimento de manobra, com as derivadas hidrodinâmicas obtidas de Obokata et al. (1981) or Takashina (1986) por exemplo. No entanto, alguns resultados, tais como definição de regiões de respostas dinâmicas (ciclos limite, respostas caóticas, etc) dependem da ordem das equações de manobra e das derivadas hidrodinâmicas utilizadas. Além disso, validações experimentais com tal modelo não estão consolidadas, além do fato de um modelo com número elevado de parâmetros, dificulta qualquer tipo de análise sobre uma validação. O modelo adotado aqui foi inicialmente proposto por Leite et al. (1998), baseado na teoria de asa de baixa razão de aspecto e na correção do fator de forma (Clarke et al, 1983). As expressões do modelo, como poderá ser visto adiante, dependem apenas do ângulo de incidência da corrente, das principais dimensões do navio e alguns coeficientes



hidrodinâmicos bem conhecidos.

A dinâmica de cada navio, no referencial fixo a ele, pode ser descrita por:

$$(m - m_{11}).\dot{u} = (m - m_{22}).vr - (m.x_g - m_{26})r^2 - (m_{11} - m_{12}).v_c.r + X \quad 9$$

$$(m - m_{22}).\dot{v} = (m_{11} - m).ur - (m.x_g - m_{26})\dot{r} - (m_{11} - m_{12}).u_c.r + Y \quad 10$$

$$(I_z - m_{66}).\dot{r} = (m_{22} - m_{11}).u.v - (m.x_g - m_{26})(\dot{v} + r.u) + N \quad 11$$

onde:

- $m$  é a massa do navio;
- $m_{ij}$ ,  $i = 1, 2, 6$  são as massas derivadas hidrodinâmicas em surge, sway e yaw, respectivamente;
- $m_{26}$  é a massa adicional em sway devido ao movimento de yaw ( $m_{26}=m_{62}$ ).
- $u$  e  $v$  são respectivamente as velocidades de surge e sway,  $u_c$  e  $v_c$  são as velocidades da corrente relativas às direções GX e GY respectivamente;
- $r$  é a velocidade angular;
- $I_z$  é o momento de inércia em relação ao eixo GZ;
- $X$ ,  $Y$  e  $N$  representam as forças externas totais respectivamente nas direções de surge, sway e yaw;

A posição e aproamento de cada embarcação em relação ao referencial inercial são obtidos das seguintes equações:

$$\dot{x}_0 = u \cos \psi - v \sin \psi \quad 12$$

$$\dot{y}_0 = u \sin \psi + v \cos \psi \quad 13$$

$$\dot{\psi} = r \quad 14$$

onde  $\dot{x}_0$  e  $\dot{y}_0$  são as velocidades da embarcação respectivamente nas direções OX e OY, e  $\psi$  é o ângulo de aproamento do veículo.

As componentes  $u_c$  e  $v_c$  da corrente são calculadas de:

$$u_c = V_c \cos(\psi_c - \psi) \quad 15$$

$$v_c = V_c \sin(\psi_c - \psi) \quad 16$$

onde  $V_c$  é a velocidade da corrente referida à Terra e  $\psi_c$  é a sua direção (ver Figura 3.1).

As forças X, Y e o momento N são dados por:

$$X_i = X_{c,i} + X_{v,i} + X_{o,i} + X_{k,i} + X_{t,i} + X_{H,i} \quad 17$$

$$Y_i = Y_{c,i} + Y_{D,i} + Y_{v,i} + Y_{o,i} + Y_{k,i} + Y_{t,i} + Y_{H,i} \quad 18$$

$$N_i = N_{c,i} + N_{D,i} + N_{v,i} + N_{o,i} + N_{k,i} - Y_{H,i} \cdot l_{H,i} + Y_{t,i} \cdot l_{t,i} \quad i=1,2 \quad 19$$

$$X_{k,2} = X_{t,2} = Y_{k,2} = Y_{t,2} = N_{k,2} = N_{t,2} = 0 \quad 20$$

onde:

- os subscritos  $c$ ,  $v$ ,  $o$ ,  $k$ ,  $t$ ,  $H$ , e  $D$ , representam corrente, vento, ondas, amarras (caso DICAS), forças no turret (caso Turret), hawser e amortecimento respectivamente;
- os índices 1 e 2 referem-se respectivamente ao navio FPSO e ao navio aliviador;
- $L$  é o comprimento do navio;
- $l_H$  é a distância entre o ponto de amarração do hawser e o centro de gravidade do navio (positiva avante);
- $l_t$  é a distância entre o turret e o centro de gravidade do navio (positiva avante).

A seguir são mostrados cálculos de forças e momentos atuando nos navios, os quais são válidos para ambos os navios. Os índices 1 e 2 foram omitidos como forma de simplificação. Para o presente trabalho, como já mencionado, apenas forças de corrente e vento serão levadas em consideração.

### 3.1.1. Forças e Momentos Atuantes Sobre o Sistema

#### 3.1.1.1. Forças e Momento devidos à Corrente

As forças e momento devidos à corrente são dados pelas equações desenvolvidas para o modelo de asa curta e apresentadas em Leite et al., 1998:

$$X_c(\beta, V) = \frac{1}{2} \rho T L C_{1c}(\beta) |V_r|^2 \quad 21$$

$$Y_c(\beta, V) = \frac{1}{2} \rho T L C_{2c}(\beta) |V_r|^2 \quad 22$$

$$N_c(\beta, V) = \frac{1}{2} \rho T L^2 C_{6c}(\beta) |V_r|^2 \quad 23$$

$$V_r = \sqrt{(u - u_c)^2 + (v - v_c)^2}$$

onde os coeficientes hidrodinâmicos são dados por:

$$C_{1c}(\beta) = \left[ \frac{0.09375}{(\log(\text{Re}) - 2)^2} \frac{S}{TL} \right] \cos(\beta) + \frac{1}{8} \frac{\pi T}{L} (\cos(3\beta) - \cos(\beta)) \quad 24$$

$$C_{2c}(\beta) = \left[ C_Y - \frac{\pi T}{2L} \right] \sin(\beta) |\sin(\beta)| + \frac{\pi T}{2L} \sin^3(\beta) + \frac{\pi T}{L} \left[ 1 + 0.4 \frac{C_B B}{T} \right] \sin(\beta) |\cos(\beta)|$$

25

$$C_{6c}(\beta) = \frac{-1}{L} \left[ C_Y - \frac{\pi T}{2L} \right] \sin(\beta) |\sin(\beta)| - \frac{\pi T}{L} \sin(\beta) \cos(\beta) - \left[ \frac{1 + |\cos(\beta)|}{2} \right]^2 \frac{\pi T}{L} \left[ \frac{1}{2} - 2.4 \frac{T}{L} \right] \sin(\beta) |\cos(\beta)|$$

26

39

sendo:

- B e T respectivamente a boca e o calado do navio;
- S a superfície molhada;
- $C_B$  é o coeficiente de bloco;
- $C_Y$  é o coeficiente de força lateral para corrente transversal;
- Re é o número de Reynolds (baseado no comprimento L);
- $l_g$  mede a distância longitudinal entre o centro de massa do casco e a

seção média do navio;

- $\beta$  é o ângulo de ataque.

O ângulo  $\beta$  é definido por:

$$\beta = \arctan\left(\frac{v - v_c}{u - u_c}\right) \quad 27$$

### 3.1.1.2. Amortecimento devido ao yaw

As forças e momento de amortecimento devido ao movimento de guinada também são baseados no modelo de asa curta e podem ser determinados por (Aranha, 1998):

$$X_D = -\frac{1}{4} \rho \cdot \pi \cdot T^2 \cdot L \cdot v_r \cdot r - \frac{1}{16} \rho \cdot \pi \cdot T^2 \cdot L^2 \cdot \frac{u_r}{|u_r|} \cdot r^2 \quad 28$$

$$Y_D = \frac{1}{2} \rho \cdot T \cdot L^2 \cdot C_{D,2} \cdot u_r \cdot r - 0,035 \cdot \rho \cdot T \cdot L^2 \cdot v_r \cdot r - 0,007 \cdot \rho \cdot T \cdot L^3 \cdot |r| \cdot r \quad 29$$

$$N_D = -\frac{1}{2}\rho.T.L^3.C_{D,6}|u_r|.r - \frac{3}{20}\rho.T.L^3.C_{\gamma}|v_r|.r - \frac{1}{32}\rho.T.L^4.C_{\gamma}|r|.r \quad 30$$

$$u_r = u - u_c \quad 31$$

$$v_r = v - v_c \quad 32$$

onde:  $C_{D,i}$  para  $i=2,6$  são os coeficientes de amortecimento respectivamente em sway e yaw, dados por:

$$C_{D,2} = \frac{\pi.T}{2.L} \cdot \left( 1 - 4,4 \cdot \frac{B}{L} + 0,16 \cdot \frac{B}{T} \right) \quad 33$$

$$C_{D,6} = \frac{\pi.T}{4.L} \cdot \left( 1 + 0,16 \cdot \frac{B}{T} - 2,2 \cdot \frac{B}{L} \right) \quad 34$$

Estas formulações foram validadas experimentalmente através de testes com "barra rígida" realizados no IPT (Simos et al, 2001).

### 3.1.1.3. Amarras

Os cabos de amarração devem ser modelados como catenárias através das seguintes equações:

$$x_e(s) = \frac{H_e}{EA} \cdot s + \frac{H_e}{\gamma} \cdot \left( \operatorname{arcsenh} \frac{\gamma \cdot s + V_{0,e}}{H_e} - \operatorname{arcsenh} \frac{V_{0,e}}{H_e} \right) \quad 35$$

$$y_e(s) = \frac{s}{EA} \cdot \left( \frac{\gamma}{2} \cdot s + V_{0,e} \right) + \frac{1}{\gamma} \cdot \left( \sqrt{H_e^2 + (\gamma \cdot s + V_{0,e})^2} - \sqrt{H_e^2 + V_{0,e}^2} \right) \quad 36$$

onde: -  $s$  é a coordenada sobre a catenária, sendo  $s = 0$  no ponto de toque da amarra com o fundo;

-  $x_e, y_e$  são respectivamente as coordenadas horizontal e vertical, no plano da amarra, sendo que  $x_e(0) = y_e(0) = 0$ ;

-  $H_e$  é a componente horizontal da força de tração da amarra, (constante ao longo de todo o comprimento);

-  $V_{0,e}$  é a componente vertical da força de tração na extremidade  $s = 0$ ;

-  $E$  é o módulo de Young,  $A$  é a área da seção transversal;

-  $\gamma$  é o peso linear (N/m) da amarra.

Estas equações porém, se aplicam apenas às seguintes condições:

- As linhas de amarração são submetidas exclusivamente ao próprio peso, isto é, não se leva em consideração a força de corrente ao longo da amarra;

- São válidas apenas para o trecho suspenso da linha;

- Aplicam-se apenas a linhas homogêneas;

- Não se considera a existência de bóias, pesos ou outras forças concentradas ao longo do comprimento da linha;

- É uma representação estática das amarras.

#### 3.1.1.4. Hawser

A equação clássica da catenária foi usada para modelar o hawser considerando apenas sua massa própria e assumindo sua geometria como sendo simétrica em relação ao seu ponto médio, isto é, a configuração da catenária é a mesma para ambos os lados do ponto médio. A partir destas hipóteses, não há força vertical atuando no ponto médio do hawser e a relação entre a distância horizontal e a força horizontal é dada por:

$$\Delta x_H = \frac{F_H}{E.A} + \frac{F_H}{w} \left[ a \operatorname{sen} \left( \frac{w.L_h/2}{F_H} \right) \right] \quad 37$$

onde: -  $\Delta x_H$  é a distância horizontal do hawser (alongamento);

-  $F_H$  é a força horizontal do hawser;

-  $E$  é o módulo de elasticidade;

-  $A$  é a área transversal;  $w$  é o peso específico;

-  $L_h$  é o comprimento do hawser.

A distância  $\Delta x_H$  é obtida por:

$$\Delta x_H = \left( \sqrt{(x_{H,1} - x_{H,2})^2 + (y_{H,1} - y_{H,2})^2} \right) / 2 \quad 38$$



onde  $x_{H,i}$ ,  $y_{H,i}$ ,  $i=1,2$  são as coordenadas da popa do FPSO e da proa do navio aliviador, respectivamente.

As projeções das forças do hawser sobre o FPSO e aliviador, são dadas por:

$$X_{H,i} = F_H \cdot \cos(\omega_i) \quad 39$$

$$Y_{H,i} = F_H \cdot \sin(\omega_i) \quad i=1,2 \quad 40$$

$$\omega_i = -\pi + \gamma_i - \psi_i \quad 41$$

$$\gamma_i = \text{atan2}(y_{H,1} - y_{H,2}, x_{H,1} - x_{H,2}) \quad 42$$

#### 2.1.1.5. Forças e Momento devidos ao vento

As equações utilizadas para o cálculo dos esforços do vento, tanto para o FPSO como para o navio aliviador, são (ver OCIMF, 1994):

$$X_v = \frac{1}{2} \cdot C_{Xv}(\psi_{rv}) \cdot \rho_v \cdot V_v^2 \cdot A_T \quad 43$$

$$Y_v = \frac{1}{2} \cdot C_{Yv}(\psi_{rv}) \cdot \rho_v \cdot V_v^2 \cdot A_L \quad 44$$

$$N_v = \frac{1}{2} \cdot C_{Nv}(\psi_{rv}) \cdot \rho_v \cdot V_v^2 \cdot A_L \cdot L_{BP} \quad 45$$

$$\psi_{rv} = \psi_v - \psi$$

onde: -  $C_{Xv}$ ,  $C_{Yv}$  e  $C_{Nv}$  são coeficientes dados em função do ângulo de ataque do vento  $\psi_v$ .

-  $V_v$  é a velocidade do vento a uma altitude de 10 m.

-  $A_T$  e  $A_L$  são respectivamente as áreas das seções transversal e longitudinal do navio expostas à ação do vento (áreas vélicas).

-  $\psi_v$  é o ângulo de ataque do vento.

Os coeficientes  $C_{Xv}$ ,  $C_{Yv}$  e  $C_{Nv}$  podem ser obtidos experimentalmente.

A título de exemplo, nas Figuras 3.2 e 3.3 estão ilustrados os coeficientes obtidos pela DMI (1999) para o FPSO P-43 e para um navio aliviador VLCC sugeridos pela OCIMF (1994), são válidos para condições entre 150000 e 500000 DWT.

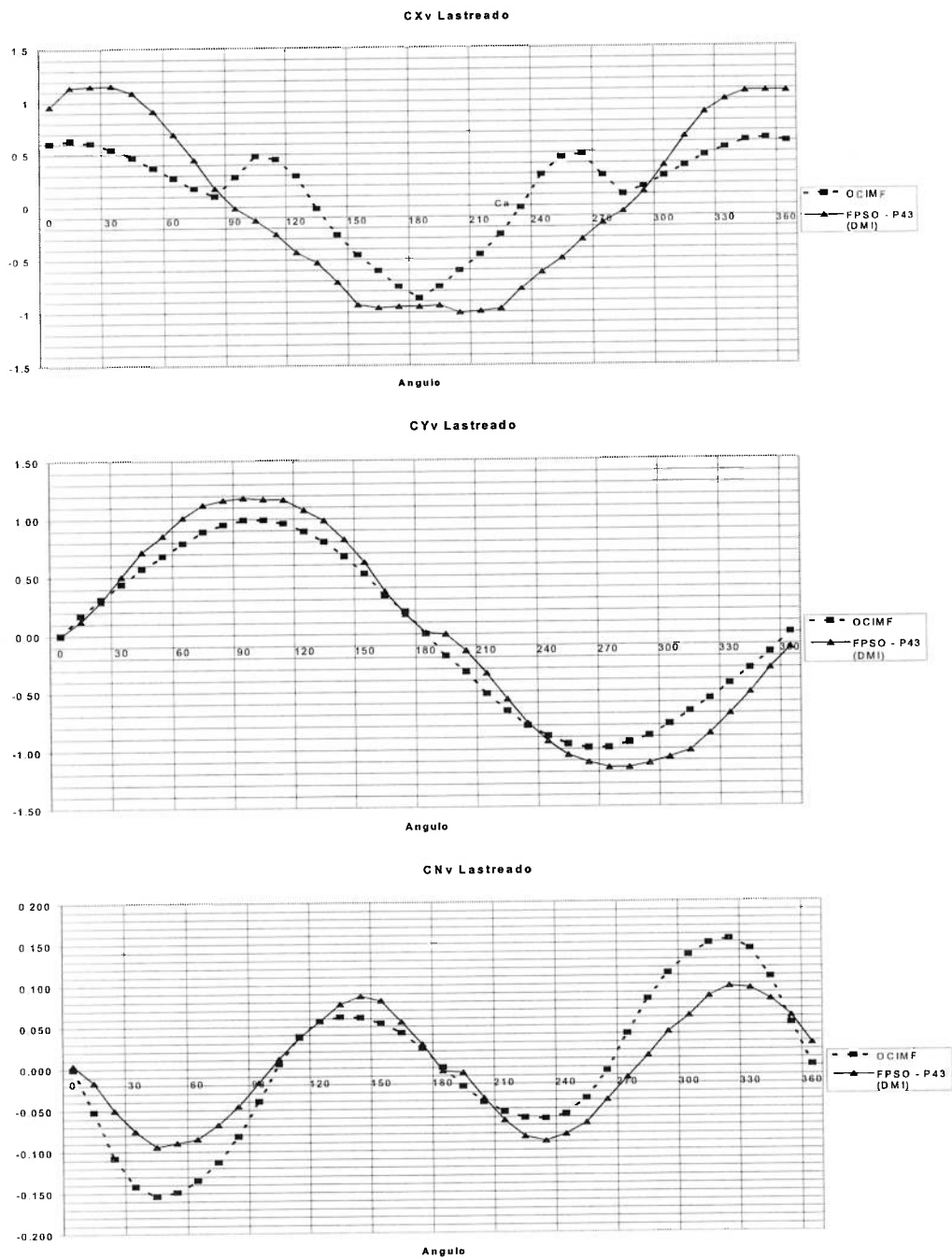
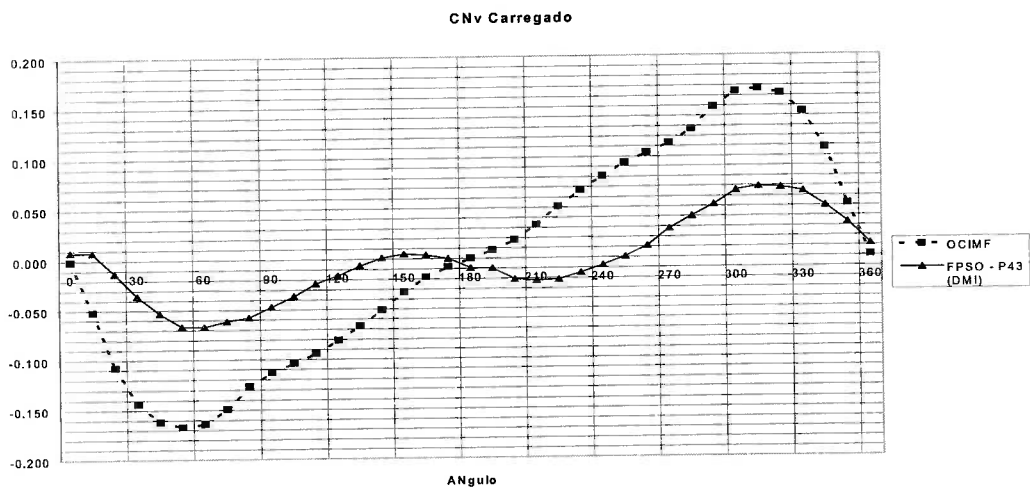
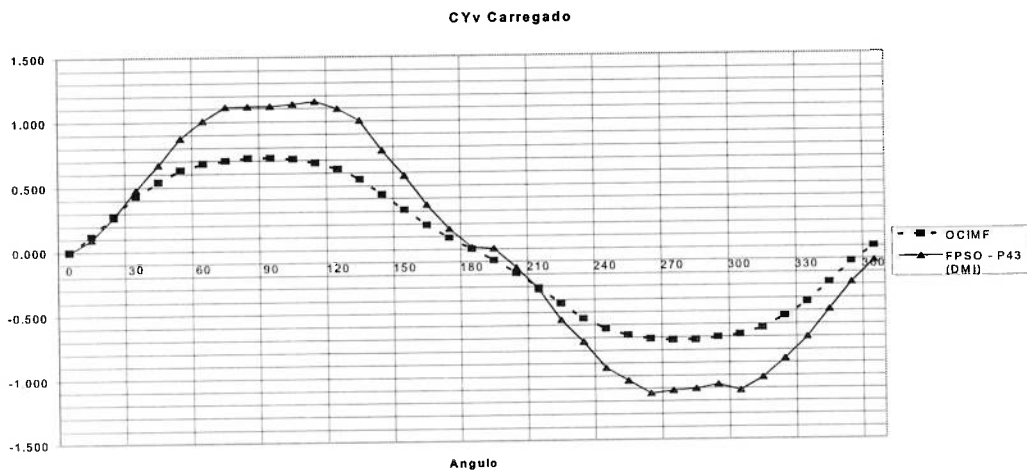
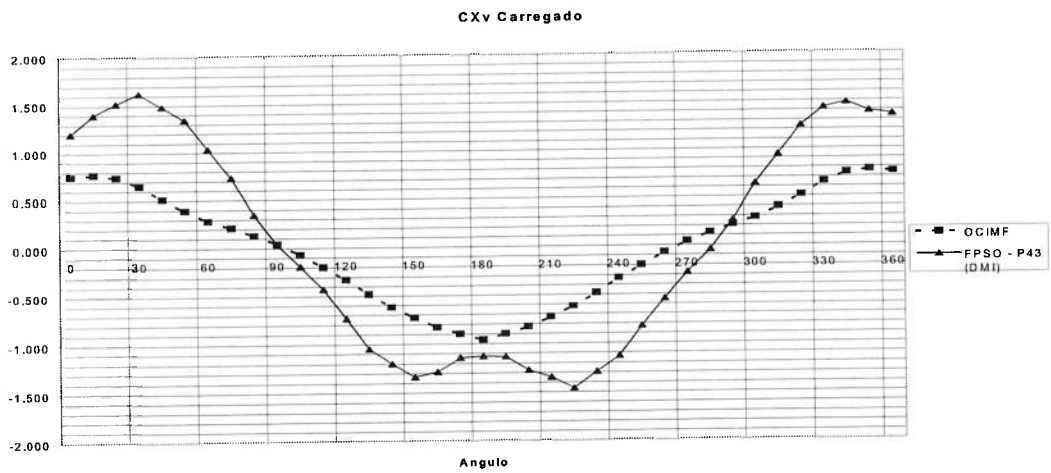


Figura 3.2 - Comparação dos coeficientes do vento na condição lastreado



**Figura 3.3 - Comparação dos coeficientes do vento na condição carregado**

### 3.2. Poços Potenciais

O modelo matemático descrito no item 3.1 apresenta grande complexidade algébrica. Constitui-se em um sistema fortemente<sup>1</sup> não linear, não sendo possível obter soluções analíticas para as equações diferenciais que regem sua dinâmica. Através de simulações numéricas pode-se investigar o comportamento do sistema. Porém, é difícil obter um completo entendimento de tal comportamento apenas com simulações.

Uma das alternativas encontradas para se efetuar uma exploração preliminar da dinâmica envolvida foi através da obtenção do potencial do sistema. Através da sua análise pode-se avaliar não apenas pontos de equilíbrio (estáveis e instáveis, o que correspondem a pontos críticos do potencial) para uma dada condição ambiental, como também visualizar as regiões de influência de cada ponto.

A possibilidade de avaliação de poços potenciais para esse sistema surge do fato deste depender apenas de variáveis de posição. Assim, do ponto de vista dinâmico, pode-se entender tal dependência como esforços de "mola", e como tal, tem-se por objetivo analisar como a energia potencial de tais esforços varia no espaço de estado.

No entanto, para o sistema como um todo, em seus seis graus de

---

<sup>1</sup> Um sistema *fortemente* não-linear é aquele para o qual aproximações lineares fornecem respostas inadequadas para a análise que se pretende efetuar. Este é o caso do sistema em estudo, conforme será mostrado a seguir.

liberdade, não é possível determinar um poço potencial único. Isso deve-se ao fato do sistema não ser um sistema gradiente, ou seja, derivado do gradiente de uma função potencial. Para sistemas multivariáveis gradientes, a obtenção de uma função potencial única é feita na forma:

$$V(x_1, x_2, \dots, x_n) = \int f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 + V_1(x_2, x_3, \dots, x_n)$$

$$V(x_1, x_2, \dots, x_n) = \int f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_2 + V_2(x_1, x_3, \dots, x_n)$$

.

.

.

$$V(x_1, x_2, \dots, x_n) = \int f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_n + V_n(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})$$

O fato das forças ambientais serem dependentes de apenas um dos graus de liberdade do sistema, no caso, o aproamento da embarcação torna matematicamente impossível a obtenção de uma única função potencial  $V(x_1, x_2, \dots)$  como descrito acima. Pois tomando as derivadas cruzadas da função potencial do sistema em estudo tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial x_3} \frac{\partial}{\partial x_1} V(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\partial}{\partial x_3} \frac{\partial}{\partial x_1} \left\{ \int f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 + V_1(x_2, x_3, \dots, x_n) \right\} = \frac{\partial f_1}{\partial x_3}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_3} \frac{\partial}{\partial x_2} V(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\partial}{\partial x_3} \frac{\partial}{\partial x_2} \left\{ \int f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_2 + V_2(x_1, x_3, \dots, x_n) \right\} = \frac{\partial f_2}{\partial x_3}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_{1,2}} \frac{\partial}{\partial x_3} V(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\partial}{\partial x_{1,2}} \frac{\partial}{\partial x_3} \left\{ \int f_3(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_3 + V_3(x_1, x_2, \dots, x_n) \right\} = \frac{\partial f_3}{\partial x_{1,2}}$$

E se a função potencial for única, vale:

$$\frac{\partial f_2}{\partial x_3} = \frac{\partial f_3}{\partial x_2} \quad e \quad \frac{\partial f_1}{\partial x_3} = \frac{\partial f_3}{\partial x_1}$$

No entanto, para o modelo es estudo, sabe que  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$  dependem apenas da variável de aproamento ( $x_3$ ). Dessa forma  $\frac{\partial f_3}{\partial x_2}$  e  $\frac{\partial f_3}{\partial x_1}$  são iguais a zero, diferentemente de  $\frac{\partial f_2}{\partial x_3}$  e  $\frac{\partial f_1}{\partial x_3}$ . Por isso, tais igualdades não podem ser satisfeitas para o sistema, e dessa forma, não é possível obter uma função potencial única.

No modelo das forças de vento e corrente apresentado no item 3.1, estas são consideradas aplicadas no centro de massa da embarcação, ou seja, sem influência na equação de momento gerado na embarcação por estes agentes ambientais. O momento gerado é representado por uma equação própria, independente das forças lateral e longitudinal da embarcação. Devido a essa "independência", é possível determinar "pseudo-potenciais" ou sub-potenciais separados para os graus de liberdade angulares e lineares.

A principal idéia de uma função pseudo-potencial é que ela depende apenas de alguns graus de liberdade, sendo os outros mantidos em valores constantes. Em termos práticos, para o caso do sub-potencial dos momentos aplicados na embarcação fixa-se as posições X e Y das duas embarcações, e estuda-se a variação de energia potencial do sistema mediante variação do

aproamento das embarcações. E da mesma forma para as posições de cada navio. Vale a pena ressaltar que para um determinado ponto ser de equilíbrio para um sistema, é necessário que esse ponto seja um ponto crítico em todos os pseudo-potenciais.

Por questão de brevidade, adiante será mencionado apenas o termo potencial para referenciar as funções pseudo-potenciais.

Como função potencial de um sistema entende-se:

$$V = - \int f \cdot ds \quad 46$$

Onde  $f$  representa as forças de um sistema dinâmico que dependem apenas de variáveis de posição (angular ou linear) e  $ds$  os respectivos deslocamentos nestas variáveis. Para o sistema estudado define-se o sub-potencial para os aproamentos:

$$V_{\psi} = - \int M_1 \cdot d\psi_1 - \int M_2 \cdot d\psi_2 \quad 47$$

Onde  $M$  são as parcelas dos momentos atuantes nos navios que dependem apenas das variáveis de aproamento. Para os graus de liberdade de posição horizontal dos navios define-se:

$$V_{xy} = - \int X_1 \cdot dx_1 - \int X_2 \cdot dx_2 - \int Y_1 \cdot dy_1 - \int Y_2 \cdot dy_2 \quad 48$$



Onde  $X$  e  $Y$  são respectivamente as parcelas das forças lateral e longitudinal que dependem apenas das posições dos navios. Através das forças e momentos de corrente e vento já descritas obtém-se as seguintes funções potenciais.

$$\begin{aligned}
 V_{\psi} = & Kt.(Lp_1 \cdot \cos \psi_1 \cdot x_1 + Lp_1 \cdot \sin \psi_1 \cdot y_1) + Kh. \left( \frac{L_1}{2} \cdot \cos \psi_1 \cdot x_1 + \frac{L_1}{2} \cdot \sin \psi_1 \cdot y_1 - \frac{L_2}{2} \cdot \cos \psi_2 \cdot x_2 \right. \\
 & - \frac{L_2}{2} \cdot \sin \psi_2 \cdot y_2 + x_1 \cdot x_2 + y_1 \cdot y_2 + \frac{L_2}{2} \cdot \cos \psi_2 \cdot x_1 \\
 & + \frac{L_2}{2} \cdot \sin \psi_2 \cdot y_1 - \frac{L_1}{2} \cdot \cos \psi_1 \cdot x_2 - \frac{L_1}{2} \cdot \sin \psi_1 \cdot y_2 - \frac{L_2}{2} \cdot \frac{L_1}{2} \sin \psi_2 \cdot \sin \psi_1 - \frac{L_2}{2} \cdot \frac{L_1}{2} \cos \psi_2 \cdot \cos \psi_1 \left. \right) \\
 & - \frac{1}{2} \cdot \rho_v \cdot V_v^2 \cdot A_{r1} \cdot \frac{\cos[2 \cdot (\psi_v - \psi_1)]}{2} - \frac{1}{2} \cdot \rho_v \cdot V_v^2 \cdot A_{r2} \cdot \cos[2 \cdot (\psi_v - \psi_2)] \\
 & + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot T_1 \cdot L_1^2 \cdot V_r^2 \cdot \left\{ \begin{aligned} & - \frac{-l_{g1}}{L_1} \left[ C_{y1} - \frac{\pi T_1}{2L_1} \right] \left( \frac{-\cos(\beta_1) |\sin(\beta_1)| + |\beta_1|}{2} \right) - \frac{\pi T_1 \sin^2(\beta_1)}{L_1 \cdot 2} \\ & - \frac{\pi T_1}{L_1} \left[ \frac{1}{2} - 2.4 \frac{T_1}{L_1} \right] \cdot \left[ \frac{-\cos \beta_1 |\cos(\beta_1)|}{4} + \cos^3 \beta_1 - \frac{\cos^3(\beta_1) |\cos(\beta_1)|}{12} \right] \end{aligned} \right\} \\
 & + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot T_2 \cdot L_2^2 \cdot V_r^2 \cdot \left\{ \begin{aligned} & - \frac{-l_{g2}}{L_2} \left[ C_{y2} - \frac{\pi T_2}{2L_2} \right] \left( \frac{-\cos(\beta_2) |\sin(\beta_2)| + |\beta_2|}{2} \right) - \frac{\pi T_2 \sin^2(\beta_2)}{L_2 \cdot 2} \\ & - \frac{\pi T_2}{L_2} \left[ \frac{1}{2} - 2.4 \frac{T_2}{L_2} \right] \cdot \left[ \frac{-\cos \beta_2 |\cos(\beta_2)|}{4} + \cos^3 \beta_2 - \frac{\cos^3(\beta_2) |\cos(\beta_2)|}{12} \right] \end{aligned} \right\}
 \end{aligned}$$

49

$$\begin{aligned}
 V_{xy} = & Kt. \left( \frac{x_1^2}{2} + \frac{y_1^2}{2} + Lp_1 \cdot \cos \psi_1 \cdot x_1 + Lp_1 \cdot \sin \psi_1 \cdot y_1 \right) + Kh. \left( -\frac{x_1^2}{2} - \frac{y_1^2}{2} - \frac{x_2^2}{2} - \frac{y_2^2}{2} + \frac{L_1}{2} \cdot \cos \psi_1 \cdot x_1 \right. \\
 & + \frac{L_1}{2} \cdot \sin \psi_1 \cdot y_1 - \frac{L_2}{2} \cdot \cos \psi_2 \cdot x_2 - \frac{L_2}{2} \cdot \sin \psi_2 \cdot y_2 + x_1 \cdot x_2 + y_1 \cdot y_2 + \frac{L_2}{2} \cdot \cos \psi_2 \cdot x_1 \\
 & + \frac{L_2}{2} \cdot \sin \psi_2 \cdot y_1 - \frac{L_1}{2} \cdot \cos \psi_1 \cdot x_2 - \frac{L_1}{2} \cdot \sin \psi_1 \cdot y_2 - \frac{L_2}{2} \cdot \frac{L_1}{2} \sin \psi_2 \cdot \sin \psi_1 - \frac{L_2}{2} \cdot \frac{L_1}{2} \cos \psi_2 \cdot \cos \psi_1 \left. \right) \\
 & - (Xv_1 \cdot x_1 + Yv_1 \cdot y_1 + Xc_1 \cdot x_1 + Yc_1 \cdot y_1 + Xv_2 \cdot x_2 + Yv_2 \cdot y_2 + Xc_2 \cdot x_2 + Yc_2 \cdot y_2)
 \end{aligned}$$

50

Através das equações 49 e 50 pode-se visualizar os sub-potenciais e analisar qualitativamente o comportamento do sistema. Nas Figuras 3.4 a 3.5 estão ilustrados os poços potenciais para um ponto de equilíbrio estável nas seguintes condições ambientais:

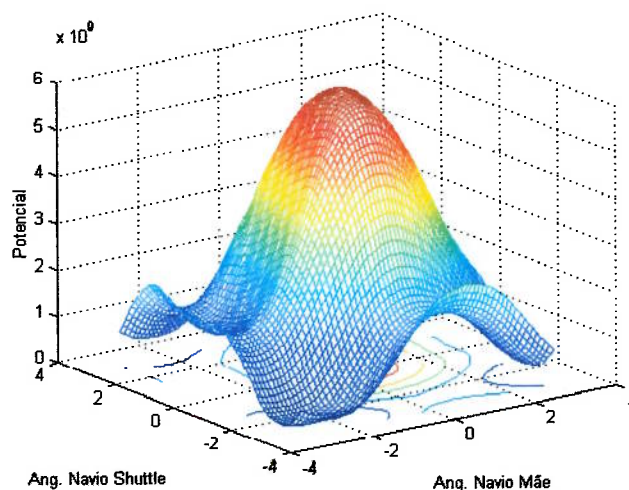
$$V_w = 8 \text{ m/s} \quad \psi_w = 0$$

$$V_c = 1 \text{ m/s} \quad \psi_c = \pi/8$$

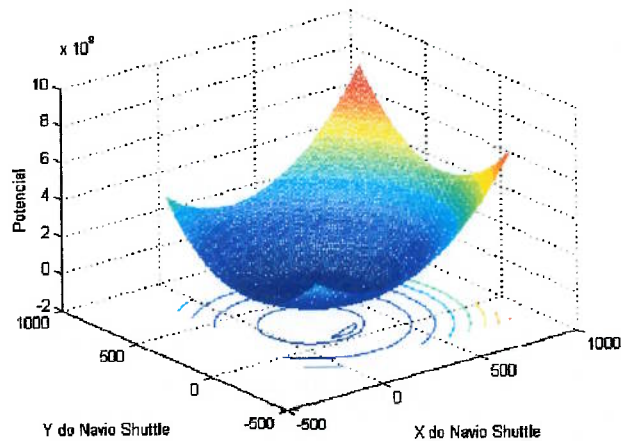
Navio FPSO : P-43

Navio Shuttle : VLCC

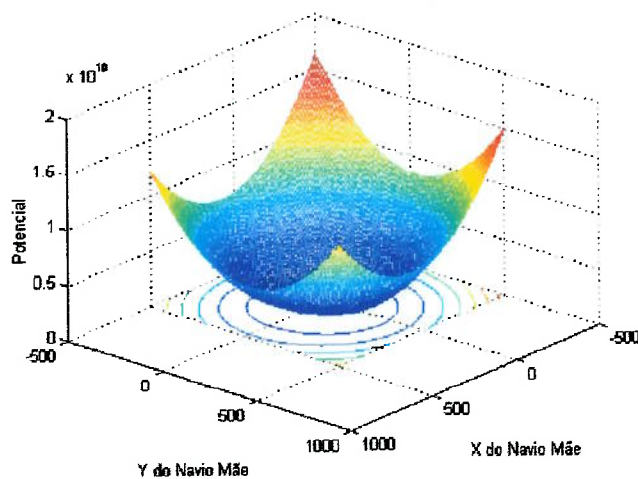
O potencial relativo ao posicionamento dos navios foi desmembrado em dois gráficos apenas por questões de visualização. Quando analisada a variação de energia potencial do posicionamento de um navio, o outro foi mantido em sua posição de equilíbrio.



**Figura 3.4 - Poço potencial relativo aos aproamentos**



**Figura 3.5 - Poço potencial relativo a posição do navio shuttle**



**Figura 3.6 - Poço potencial relativo a posição do navio FPSO**

Pode-se observar que a maior parte da dinâmica é ditada pelos aproamentos das embarcações. Seu posicionamento horizontal constitui poços potenciais com apenas um ponto de equilíbrio e estável. Ou seja, os navios em seus aproamentos de equilíbrio, podem sofrer qualquer perturbação em seus

posicionamentos, e sempre retornarão aos seus pontos de equilíbrio originais. Para o caso dos aproamentos (Figura 3.4), pode-se observar os pontos de equilíbrio instáveis. Dessa maneira, torna-se claro que os graus de liberdade responsáveis pela instabilidade do sistema nesses pontos são os aproamentos. Nesses pontos, qualquer perturbação no aproamento do navio fará com que este entre tenda a outro ponto de equilíbrio, diferentemente do visto para os primeiros potenciais mencionados.

A observação desta característica do sistema sugeriu a elaboração de um modelo simplificado (arquetípico), o qual leva em consideração apenas a dinâmica rica do sistema, ou seja, a dinâmica dos aproamentos das embarcações.

### **3.3. Modelo Arquetípico**

Para a caracterização do modelo arquetípico, deve-se estabelecer um parâmetro de comparação deste com o modelo completo, e que de alguma forma meça a representatividade do modelo reduzido. Um dos parâmetros escolhidos foram os pontos de equilíbrio do sistema. Assim, o modelo reduzido deverá representar, qualitativamente, mapas de bifurcação semelhantes do modelo completo.

Para isso é necessário estudar as funções que compõem os modelos de vento e corrente, para extrair, para o modelo reduzido, apenas as funções que representem os pontos de equilíbrio típicos para o modelo.

Para o caso das forças de vento, as quais são obtidas através de coeficientes experimentais (Figuras 3.2 e 3.3), a variação destes coeficientes será tomada como uma função senoidal, com a frequência e amplitude determinadas pelos valores experimentais. Tal representação, tendo em vista os gráficos dos coeficientes de vento apresentados na seção 3, apresenta-se como uma boa aproximação para as funções de vento.

Para as forças de corrente, deve-se realizar um estudo mais profundo das funções que a compõem. Sabe-se que são as funções que a compõem que determinam os pontos de equilíbrio do sistema. Por isso deve-se inspecionar se todos os termos do modelo de corrente são estruturalmente estáveis, ou melhor, se bifurcações podem ocorrer quando se usa um modelo mais simples de corrente, com apenas um termo por exemplo, ou todos os termos do modelo de asa curta.

Os termos presentes no modelo de corrente de asa curta, para o grau de liberdade de aproamento são:

$$A|\cos(\beta)|\sin(\beta) + B.\cos(\beta).\sin(\beta) + C|\sin(\beta)|\sin(\beta) + D|\cos(\beta)|^3.\sin(\beta)$$

Primeiramente, escolhendo o primeiro termo do modelo de corrente:

$$A|\cos(\beta)|\sin(\beta) = 0$$

Sabe-se que tal sistema possui quatro pontos de equilíbrio, os quais são os zeros respectivos das funções seno e coseno.

$$\beta = 0 ; \pi/2 ; \pi ; 3\pi/2.$$

Escolhendo um segundo termo a seguinte equação deve ser resolvida para se obter os pontos de equilíbrio:

$$A|\cos(\beta)|\sin(\beta) + B.\cos(\beta).\sin(\beta) = 0$$

Sabe-se, de antemão, que os pontos  $\beta = 0, \pi/2, \pi$  e  $3\pi/2$  são solução. Caso A seja numericamente igual a B, teremos infinitos pontos de equilíbrio no intervalo negativo do coseno, pois:

$$\frac{|\cos(\beta)|}{\cos(\beta)} = -\frac{B}{A}$$

Para quaisquer outros valores para A e B a equação possui as quatro soluções mencionadas.

Escolhendo  $B > A > C$ , todos maiores que zero, cuja proporção é encontrada no modelo de corrente, tem-se sempre os pontos de equilíbrio 0 e  $\pi$  e adicionalmente mais dois pontos resultantes da equação:

$$\frac{A}{B} \cdot |\cos(\beta)| + \frac{C}{B} \cdot |\sin(\beta)| = -\cos(\beta) \quad \text{para } \sin(\beta) \neq 0$$

Tais pontos ocorrem nas proximidades de  $\pi/2$  e  $3\pi/2$ . Pois perto desses ângulos a parte em seno é maior, apenas reduzida do fator  $C/B$ , e equipara-se com as funções restantes. O mesmo acontece com a inserção do quarto termo do modelo de corrente.

$$D \cdot |\cos(\beta)|^3 \cdot \sin(\beta)$$

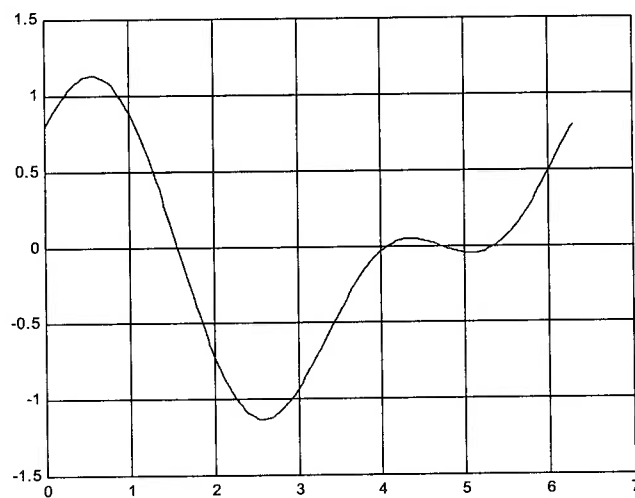
Porém tal termo acarreta apenas uma translação desses dois pontos de equilíbrio citados anteriormente.

Uma das características do modelo completo que se deseja representar no modelo reduzido, é o aumento do número de pontos de equilíbrio, quando as forças de vento e corrente se opõem. Assim deve-se estudar não somente as funções de corrente, mas também sua influência com a função de vento. De maneira a escolher um modelo reduzido de corrente, o qual não perca principais características do sistema em questão, deve-se avaliar qual destes modelos pode sugerir possíveis bifurcações quando da variação dos parâmetros relativos às funções representativas de vento e corrente. Dessa forma tomando-se como modelo de corrente apenas a parcela de  $\cos \cdot \sin$  tem-se com a adição de força de vento:

$$B \cdot \cos(\beta) \cdot \sin(\beta) + V \cdot \sin(\beta + \varphi) = 0$$

Para  $B=V$  tem-se apenas dois pontos de equilíbrio  $0$  e  $\pi$ . Já para  $B > V$  tem-se mais dois pontos de equilíbrio, dados por:

$$\cos(\beta) = -\frac{V}{B}$$



**Figura 3.7 -  $V < B$  e  $\varphi = 0$**

Mesmo com a adição de uma fase, por exemplo, perto de  $\pi$  ou mesmo de  $\pi/2$ , não ocorre mais nenhum outro tipo de bifurcação, ou seja, para  $B > V$ , o sistema sempre possuirá 4 pontos de equilíbrio.

Contudo, escolhendo como função de corrente a função  $|\cos(\beta)| \cdot \sin(\beta)$  o sistema se comporta de maneira diferente. Os pontos de equilíbrio podem ser dados pela equação:

$$A|\cos(\beta)| \cdot \sin(\beta) + V \cdot \sin(\beta + \varphi) = 0$$

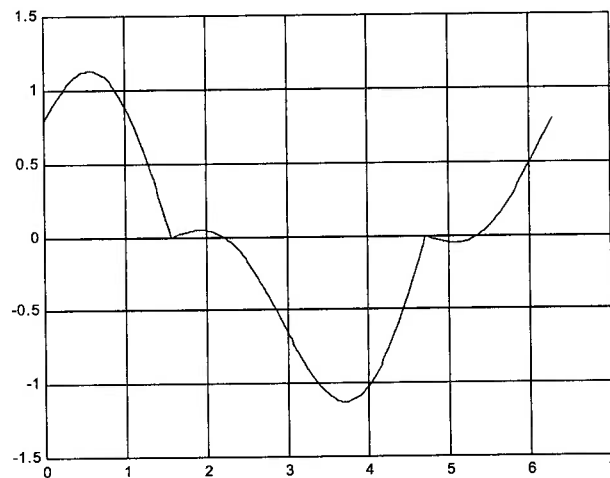


Para  $\varphi = 0$ , só existem 2 pontos de equilíbrio, 0 e  $\pi$ . Pois para quaisquer outros pontos, vale a equação:

$$|\cos(\beta)| = -\frac{V}{A}$$

A qual não possui raiz. Tomando uma fase  $\varphi$  de  $\pi/2$ , por exemplo, e com  $V=A$ , o sistema continua com apenas duas raízes, porém as raízes do cosseno ( $\pi/2$  e  $3\pi/2$ ).

Quando se diminui a razão  $V/A$ , o sistema ganha duas novas raízes, tão próximas às anteriores quanto mais próximo de 1 for essa razão.

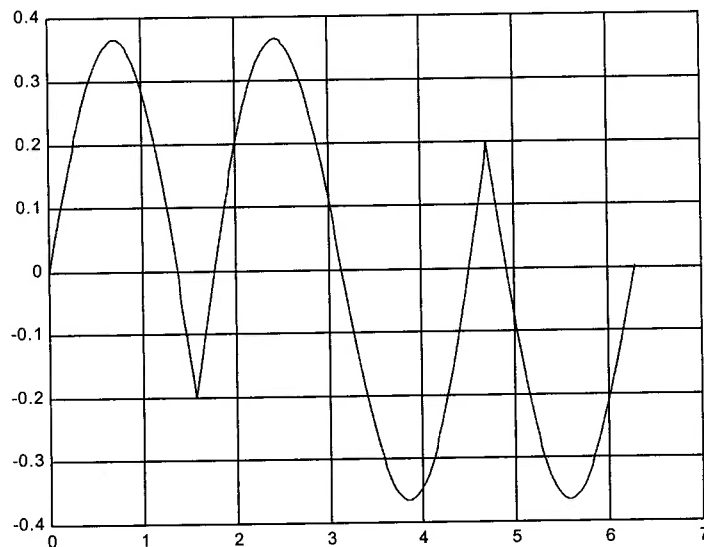


**Figura 3.8 -  $V/A = 0.8$  e  $\varphi = \pi/2$**

Porém quando se opõem as supostas forças de corrente e vento, ou seja, para um ângulo de fase de 180 graus, esse modelo ganha mais duas raízes, para as mesmas condições anteriores, ou seja  $A > V$ . Isso pode ser visto pela equação abaixo:

$$|\cos(\beta)| \cdot \sin(\beta) = -\frac{V}{A} \cdot \sin(\beta + \pi)$$

Quando a função seno muda de sinal, o que ocorre perto de  $\pi$  e  $V/A \ll 1$  existirão sempre 2 pontos de equilíbrio perto de  $\pi/2$  e mais outros dois perto de  $3\pi/2$ . Nesses pontos  $|\cos(\beta)|$  fica numericamente próximo de  $V/A$  e  $\sin(\beta) = -\sin(\beta + \pi)$ . Isso só ocorre pois trata-se da função módulo de cosseno, caso contrário o sinal dessa função não permitiria a existência de tais raízes. Quanto maior a razão  $V/A$ , maior é o afastamento dessas raízes de  $\pi/2$  e  $3\pi/2$ .



**Figura 3.9 -  $V/A = 0.2$  e  $\varphi = \pi$**

O mesmo ocorre se tomarmos a função  $|\sin(\beta)|\sin(\beta)$  porém os novos dois pontos de equilíbrio ocorrerão perto de 0 e  $\pi$ .

Com isso, percebe-se que a função  $|\cos(\beta)|\sin(\beta)$  deve estar presente no

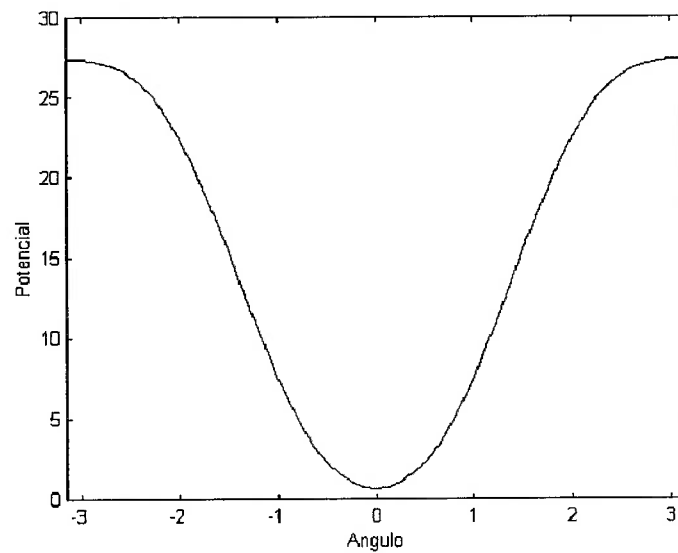
modelo de corrente reduzido, assim como a função  $\cos(\beta).\sin(\beta)$ , já que esta representa a função de maior coeficiente do modelo de asa curta apresentado e também influencia os pontos de equilíbrio do sistema. As outras funções que compõem o modelo para o grau de liberdade de aproamento, como visto, não alteram qualitativamente os pontos de equilíbrio, e por isso não serão adicionadas no modelo reduzido.

Outro fator importante do sistema completo que influencia os pontos de equilíbrio do sistema é o elemento de ligação entre os navios, ou seja, o *hawser*. Ele funciona como um ponto de reação do navio, fazendo com que as forças de corrente e vento geradas no navio se convertam em momento, através do braço determinado pela distância do seu ponto de amarração no navio até o centro de massa deste. Assim, as forças de corrente e vento, na direção transversal dos navios, também devem influenciar qualitativamente os pontos de equilíbrio do sistema. E dessa forma, os coeficientes dependentes do ângulo de aproamento dessas forças não podem ser desprezados.

O coeficiente de maior valor absoluto presente na força de corrente, e que difere dos coeficientes mencionados anteriormente é proporcional a  $\sin(\beta)^3$ . Tal função representa uma mudança qualitativa no modelo reduzido que pretende-se construir, visto que, as funções pré-selecionadas  $|\cos(\beta)|.\sin(\beta)$  e  $\cos(\beta).\sin(\beta)$  tem raízes em  $0, \pi/2, \pi$  e  $3\pi/2$  e com a introdução da função  $\sin(\beta)^3$ ,  $\pi/2$  e  $3\pi/2$  deixam de ser raízes. Tal introdução tem por objetivo "físico", levar em consideração a influência do *hawser* no modelo arquetípico. Nos resultados que irão ser apresentados, poder-se-á observar que a

introdução desse termo fez com que os resultados do modelo reduzido se equiparassem com os resultados do modelo completo.

Assim, seja um potencial mostrado na Figura 3.10, construído a partir das funções matemáticas escolhidas acima, presentes no momento de corrente gerado na embarcação.



**Figura 3.10 - Função potencial do modelo arquetípico**

Cuja equação é representada por:

$$V_{arq} = -A \cdot \cos(\psi) \cdot \left( \frac{1}{3} \cdot \text{sen}^2(\psi) + \frac{2}{3} \right) - B \cdot \cos(\psi) \cdot |\cos(\psi)| + C \cdot \text{sen}^2(\psi) + \sigma \cdot \cos(\psi_v - \psi)$$

Os coeficientes A, B e C acima citados podem ser estimados para um determinado navio através das seguintes relações (derivados das equações 24 à 26):

$$A = \frac{2 \cdot \pi \cdot T \cdot L_H}{L^2} + R$$

$$B = \frac{\pi \cdot T}{L} \cdot \left[ 1 + 0.4 \cdot \frac{C_B \cdot B}{T} \right] + R$$

$$C = -\frac{\pi \cdot T}{2 \cdot L} - R$$

sendo:

- B e T a boca e o calado respectivamente da embarcação;
- L o comprimento do navio;
- $C_B$  o coeficiente de bloco;
- $L_H$  é a distância entre o centro de gravidade do navio e o ponto de amarração do Turret/hawser.
- R uma parcela de ajuste.

Esse fator denominado R significa a introdução de uma parcela de ajuste que refina o cálculo dos coeficientes do modelo arquetípico. Neste trabalho tal coeficiente foi ajustado através de resultados experimentais. Além disso, foi observado que apenas um fator R foi necessário para obter uma boa correlação entre o modelo e os resultados experimentais.

No entanto, uma vez de posse dos valores de R, observou-se uma

grande semelhança entre os poços potenciais do modelo completo e arquetípico. Dessa observação motivou-se a obter tal fator de ajuste por meio de comparação entre os potenciais. A primeira tentativa foi igualar a ordem de grandeza dos potenciais, e assim obter R. No entanto, o resultado, ou melhor, o valor final dos coeficientes não foram os mesmos comparados com os obtidos com posse de dados experimentais. Ou seja, percebeu-se que um simples ajuste na ordem de grandeza dos poços não foi suficiente para determinação precisa de R uma vez que o resultado não alterou substancialmente a forma do poço potencial do modelo arquetípico.

Dessa forma notou-se que mais condições devem ser impostas à equiparação dos dois potenciais. Deve-se garantir também que a topologia seja semelhante, como por exemplo, variação de energia equivalente em uma dada região, pontos de mínimo/máximo de mesma ordem de grandeza, etc. Assim, métodos numéricos podem ser utilizados para chegar em tal equivalência, como por exemplo, o Método dos Mínimos quadrados. Através dele, e da utilização de, por exemplo, três diferentes parâmetros de ajuste (R1, R2 e R3) pode-se obter os valores dos coeficientes A, B e C apenas com a utilização do modelo completo, sem a necessidade de recorrer a uma validação experimental.

Contudo, verificou-se que considerar tal resíduo igual a zero já se apresenta como uma boa estimativa dos coeficientes das funções para o potencial do modelo arquetípico.

Utilizando-se dessa função potencial, obtém-se uma função restauração equivalente, em função de  $\psi$ , a qual pretende-se adicionar um oscilador Van

der Pol. Assim a equação diferencial para o sistema fica:

$$\ddot{\psi} + D \cdot \left( -E \cdot \frac{\sqrt{V_c} \cdot [\log \text{Re} - 2]^2}{\sigma + \frac{1}{\sigma}} + |\psi| \right) \cdot \dot{\psi} + f(\psi) = 0 \quad 52$$

Onde  $f(\psi)$  é a restauração mencionada, calculada por:

$$f(\psi) = \frac{\partial V_{arg}}{\partial \psi} \quad 53$$

A introdução de um oscilador Van der Pol deve-se a uma característica do sistema completo, cuja dinâmica apresenta regiões de ciclo limite. Tal comportamento tem como fator de influência uma relação de dependência entre aproamento e velocidades encontrada na forças de corrente. Tal relação funciona como um oscilador de Van der Pol, porém para graus de liberdade diferentes. Contudo, com a redução do sistema para apenas um grau de liberdade, no caso o aproamento, perdeu-se tal característica. Por essa razão, decidiu-se introduzir um Van der Pol para restaurar a característica do sistema completo, no modelo reduzido. No entanto, um estudo mais aprofundado sobre a ocorrência dos ciclos limite foi necessário.

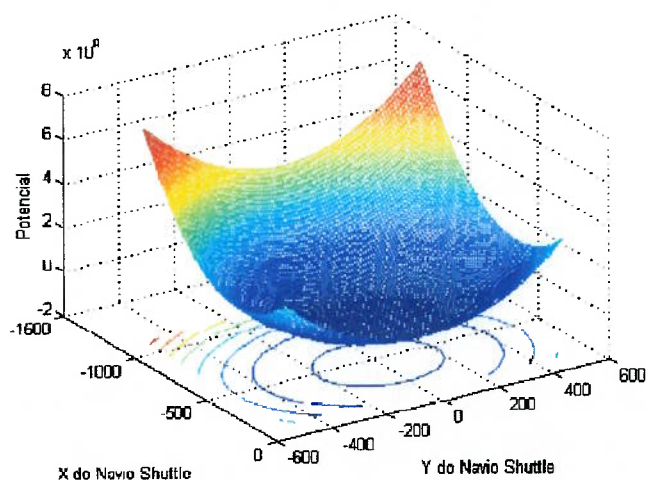
Aghamohammadi e Thompson (1990) e Simos et al. (2001) realizaram estudos, incluindo dados experimentais, sobre os ciclos limite que surgem em um sistema de um navio amarrado, e sobre as regiões de sua ocorrência

mediante a variação de parâmetros, tais como, o comprimento da amarração, no nosso caso em particular, o comprimento do *hawser*. No entanto, não realizaram estudos sobre os motivos de sua ocorrência.

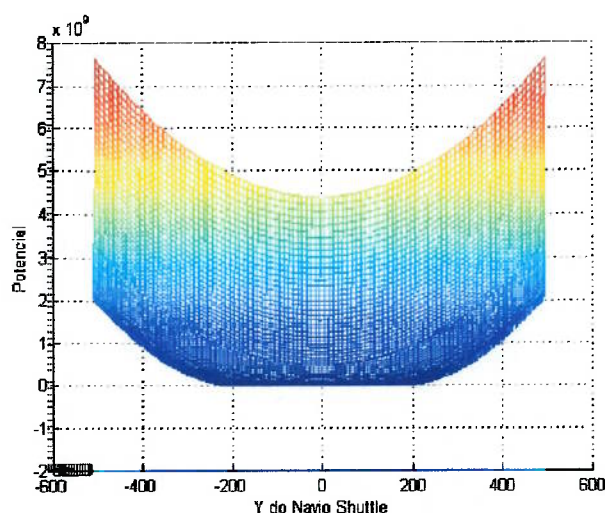
Com o objetivo de verificar a razão da ocorrência de ciclos limite no sistema, recorreu-se novamente aos sub-potenciais, cujos resultados motivaram a elaboração de um modelo arquetípico, mesmo sabendo que os potenciais não levam em consideração velocidades dos graus de liberdade. No entanto, a dinâmica do sistema é consideravelmente lenta em comparação com velocidades de corrente e vento. Dessa forma, para uma análise qualitativa, é considerada aceitável a adoção das velocidades relativas de vento e corrente como as próprias velocidades dos agentes ambientais.

Assim analisando os pseudo potenciais nos graus de liberdade correspondentes ao movimento de translação da embarcação, pode-se obter informações importantes sobre a ocorrência de tal fenômeno dinâmico. Nas Figuras 3.11 e 3.12 pode-se observar os pseudo potenciais acima citados, para condição de força externa apenas de corrente. A Figura 3.12 é apenas uma vista lateral do mesmo potencial.





**Figura 3.11 - Função potencial do sistema completo**

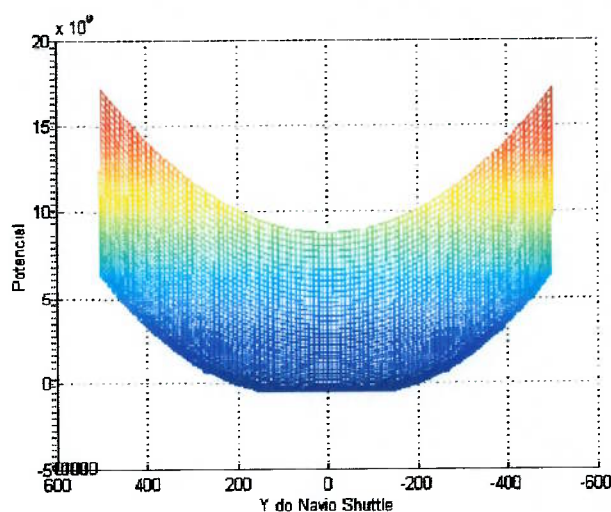


**Figura 3.12 - Vista Lateral da função potencial do sistema completo (  $L_{hawser} = 190m$  )**

Pode-se notar a presença de um patamar equipotencial em torno da posição de equilíbrio. Isso significa que o sistema, nessa condição, passa a possuir um plano de equilíbrio, no qual pode oscilar. Essa condição dinâmica é fortemente influenciada pelo *hawser*, que devido ao seu comprimento, limita a

região desse patamar equipotencial. Observa-se na Figura 3.13, em comparação com a Figura 3.12, que a região equipotencial diminuiu quando da diminuição do comprimento do *hawser*.

O navio oscilando em seu plano horizontal excita oscilações no aproamento, e o que se observa é a oscilação nos três graus de liberdade do sistema.

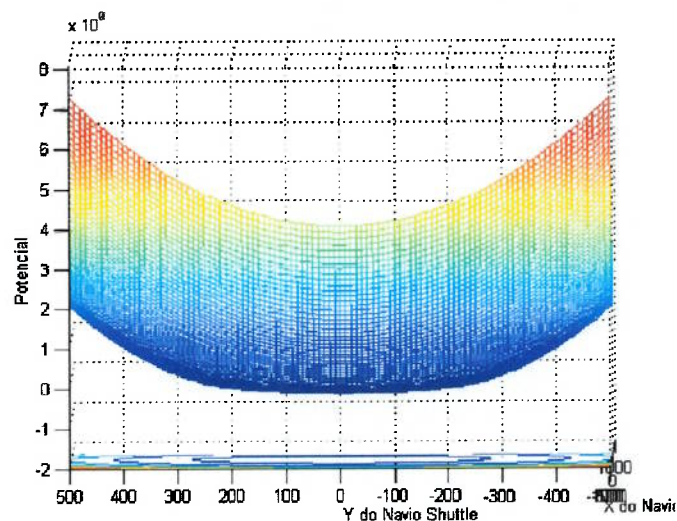


**Figura 3.13 - Vista Lateral da função potencial do sistema completo (  $L_{hawser} = 100m$  )**

Outra característica do ciclo limite presente na dinâmica em estudo, é sua diminuição de amplitude com o aumento das forças de vento comparativamente com as forças de corrente (verificado em simulação). Tal característica também foi observada nos pseudo-potenciais. Observa-se na figura 3.14, condição de velocidade de vento 30 vezes maior que a corrente, que o plano equipotencial citado anteriormente praticamente não existe, reduzindo a região equipotencial do ponto de equilíbrio.

Em suma, percebe-se pela variação de energia nos pontos de equilíbrio, que o ciclo limite ocorre devido ao grau de liberdade de translação das embarcações, o qual foi suprimido para a construção do modelo reduzido. Por isso a necessidade da introdução de um oscilador Van der Pol, para restituir tal característica. Contudo, é necessário saber como a amplitude de oscilação do ciclo limite varia, com a alteração das condições ambientais, por exemplo. Nesse contexto, foi proposta uma metodologia simplificada para essa verificação. Como hipótese, sugere que as oscilações do ciclo limite em cada grau de liberdade no plano horizontal, sejam oscilações senoidais, com amplitude  $A$  e frequência  $w$  (equações 54 e 55).

Substituindo nas equações do sistema (equações 1, 2 e 3) e depois de algum trabalho algébrico, obtém-se as relações 56 e 57.



**Figura 3.14 - Vista Lateral da função potencial do sistema com vento e corrente**

$$X = A_1 \cdot \sin(w_1 \cdot t) \quad 54$$

$$Y = A_2 \cdot \sin(w_2 \cdot t) \quad 55$$

$$A_{1,2} \approx a + \frac{b}{\sigma + \frac{1}{\sigma}} \quad 56$$

$$A_{1,2} \approx c + d \cdot \sqrt{V_c} \cdot [\log \text{Re} - 2]^2 \quad 57$$

Onde  $\sigma$  é a relação  $\frac{V_v}{V_c}$ . As expressões 56 e 57 revelam que a amplitude do ciclo limite varia proporcionalmente ao inverso da razão  $\sigma$ , e diretamente proporcional à raiz da velocidade da corrente e com o quadrado do número de Reynolds. A introdução da razão  $\sigma$  deve-se à normalização dos agentes externos pela velocidade da corrente, a qual é o fator determinante na variação dos pontos de equilíbrio do sistema.

Por isso, na equação 52 foi introduzido o oscilador de Van der Pol na forma:  $D \cdot \left( -E \cdot \frac{\sqrt{V_c} \cdot [\log \text{Re} - 2]^2}{\sigma + \frac{1}{\sigma}} + |\psi| \right) \cdot \dot{\psi}$ . Dessa forma a fronteira da região na

qual o amortecimento passa de um valor negativo para positivo é proporcional à  $\frac{\sqrt{V_c} \cdot [\log \text{Re} - 2]^2}{\sigma + \frac{1}{\sigma}}$ , assim como visto para o caso do modelo completo. E as

constantes D e E podem ser calibradas, através de simulação com o modelo completo, por exemplo, para uma representação quantitativa da região do ciclo limite no modelo reduzido.

Assim, o modelo definido pela equação 52, segundo os estudos sobre as funções matemáticas que regem as forças de corrente e vento sobre uma embarcação representa a dinâmica de um navio em uma configuração conhecida como SPM (single point moored). Tal configuração se assemelha dinamicamente à condição de dois navios em tandem na configuração DICAS de amarração. Pois a dinâmica do sistema como um todo é pouco influenciada pela dinâmica no navio FPSO. Com isso, define-se um modelo de um grau de liberdade, que apresenta as mesmas características dinâmicas de um sistema com seis graus.

Para o segundo caso citado neste trabalho, na configuração de amarração Turret do navio FPSO, um segundo grau de liberdade deve ser adicionado ao modelo arquetípico, para obter equivalências dinâmicas entre o modelo completo e o modelo reduzido que pretende-se obter. Tal grau de liberdade representa a dinâmica de outro navio SPM, com características de resposta à ação ambiental diferentes.

No entanto percebe-se a necessidade de se acrescentar outro termo na restauração, equivalente aos momentos gerados pelo vínculo entre os navios, o hawser. Este termo tem por característica gerar um "auto-alinhamento" entre os dois ângulos, proporcional a uma rigidez equivalente desse hawser.

Investigando as funções matemáticas relativas ao hawser no modelo completo, pode-se extrair uma função, que possua as características supra citadas, e que além disso, também representa uma função potencial, mantendo as características do sistema.

Essa função esta apresentada na equação 58.

$$f_{hawser} = Kh \cdot \left[ \frac{l_1 l_2}{2} \cdot \cos(\psi_1) \cdot \sin(\psi_2) - \frac{l_1 l_2}{2} \cdot \sin(\psi_1) \cdot \cos(\psi_2) \right] \quad 58$$

Onde  $Kh$  representa a rigidez do hawser, ou do "momento auto-alinhante" no modelo reduzido,  $l_1$  e  $l_2$  são as variáveis representativas dos comprimentos dos navios e  $\psi_1$  e  $\psi_2$  são os dois graus de liberdade do novo modelo arquetípico, representando os aproamentos dos dois navios em tandem na configuração Turret.

Assim, o modelo arquetípico para a configuração acima citada fica:

$$\ddot{\psi}_1 + D \cdot \left( -E \cdot \frac{\sqrt{V_c} \cdot [\log Re - 2]^2}{\sigma + \frac{1}{\sigma}} + |\psi| \right) \cdot \dot{\psi}_1 + f(\psi_1) + f_{hawser}(\psi_1, \psi_2) = 0$$

$$\ddot{\psi}_2 + D \cdot \left( -E \cdot \frac{\sqrt{V_c} \cdot [\log Re - 2]^2}{\sigma + \frac{1}{\sigma}} + |\psi| \right) \cdot \dot{\psi}_2 + f(\psi_2) + f_{hawser}(\psi_1, \psi_2) = 0 \quad 59$$

Vale ressaltar, no entanto, que com a introdução do termo do hawser perdeu-se uma característica do sistema que é a independência do navio aliviador, em termos de pontos de equilíbrio, para com o navio FPSO.

Essa independência pode ser entendida matematicamente através da álgebra utilizada para obtenção do aproamento de equilíbrio para o navio aliviador:

$$Y_t = Y_v(\psi_2) + Y_c(\psi_2) + Y_h(\psi_1, \psi_2) = 0$$

$$M_t = M_v(\psi_2) + M_c(\psi_2) + Y_h(\psi_1, \psi_2) \cdot L_h = 0$$

Somatória das forças de sway e momentos no navio aliviador igual a zero. Da primeira equação obtém-se:

$$Y_h = Y_v + Y_c$$

E finalmente.

$$M_v(\psi_2) + M_c(\psi_2) + [Y_c(\psi_2) + Y_v(\psi_2)] L_h = 0$$

Cuja equação claramente só depende de  $\psi_2$ . Em termos físicos, percebe-se que é a presença do hawser que causa a dependência apenas de  $\psi_2$  nos aproamentos de equilíbrio do navio aliviador. Com a introdução da função do hawser no modelo arquetípico perdeu-se tal característica. No entanto, qualitativamente não houve mudança nos pontos de equilíbrio deste navio devido tal função, como será visto adiante.

### **3.4. Validação**

De posse do modelo arquetípico, faz-se necessário a comparação dos resultados obtidos através desse modelo, e de alguns resultados já observados, seja no modelo completo, seja em experimento. Tais comparações podem ser feitas através de séries temporais. No entanto, tal comparação não caracteriza um comportamento global para o sistema, principalmente se tratando de um sistema não linear. Por isso pretende-se, nesse trabalho, fazer uma analogia dos modelos arquetípico e completo do sistema em estudo, através de características que descrevam sua dinâmica. Para tal comparação far-se-á uso de mapas de bifurcação e poços potenciais dos modelos, pois eles fornecem um mapeamento mais global de sua dinâmica, mostrando, por exemplo, a variação dos pontos de equilíbrio a um determinado parâmetro, a robustez de um ponto de equilíbrio, etc. Essas comparações serão realizadas no capítulo de resultados deste trabalho.

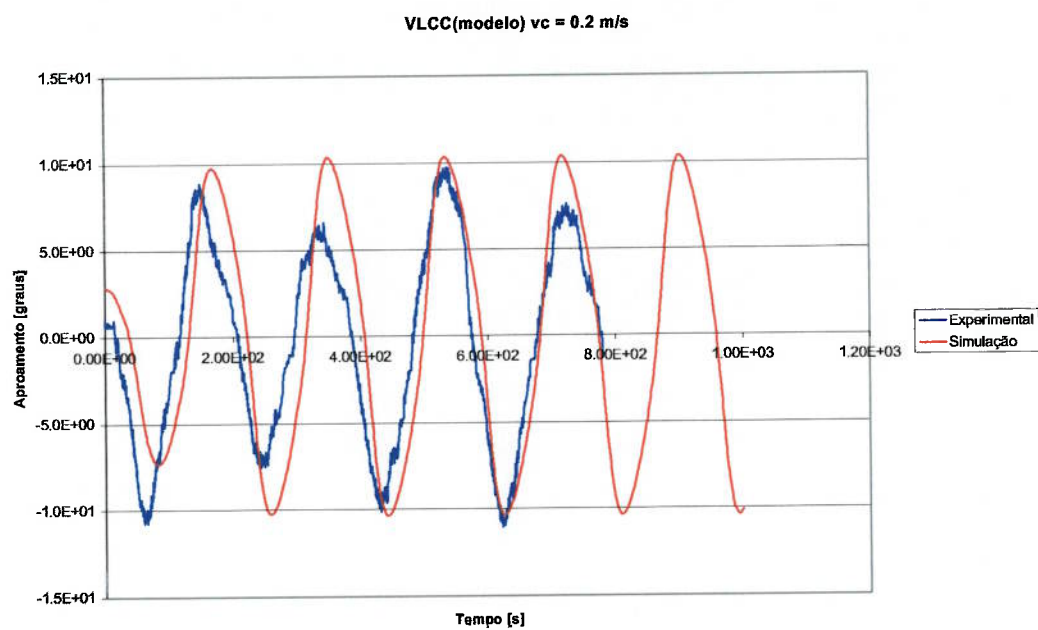
No entanto, também é válida a comparação em séries temporais principalmente com dados obtidos de experimento. Para tanto, foram utilizados os resultados dos ensaios realizados por Simos et al. (1998), os quais se caracterizam por um modelo do VLCC, amarrado por um hawser rígido, o que não introduz a dinâmica deste no sistema.

Nas figuras 3.15 e 3.17 pode-se observar os resultados de simulação com o modelo arquetípico e do experimento para duas velocidades de corrente diferentes, e uma determinada condição de carga. Observa-se uma boa

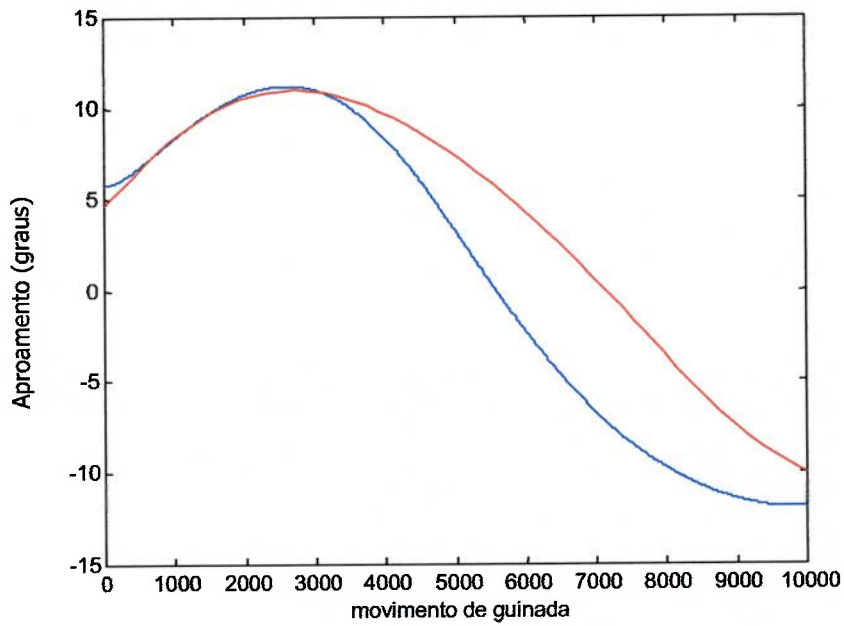


correlação tanto em frequência e, principalmente, na amplitude do ciclo limite, confirmando a escolha de um oscilador de Van der Pol para a representação do fenômeno.

Foi realizada também uma comparação entre simulações com o modelo completo e o modelo arquetípico em estudo. Para isso, foram escolhidas as mesmas condições ambientais dos ensaios experimentais em modelo reduzido, e as embarcações foram simuladas na condição de lastro. Os resultados podem ser vistos na figuras 3.16 e 3.18.



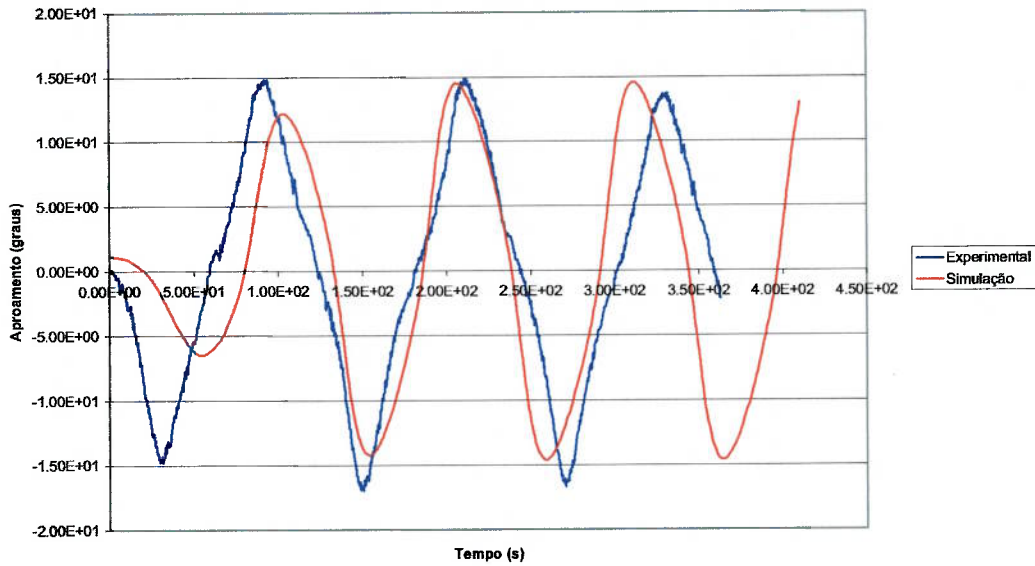
**Figura 3.15 - Comparação entre dados experimentais e simulação com modelo**



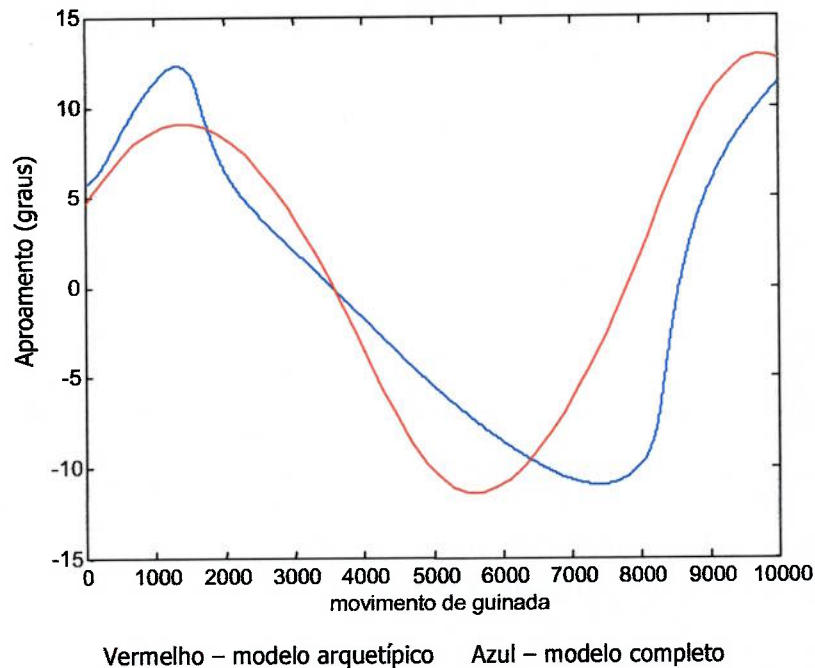
Vermelho – modelo arquetípico Azul – modelo completo

**Figura 3.16 - Comparação entre simulação com modelo completo e arquetípico**

VLCC(modelo)  $v_c = 0.4 \text{ m/s}$



**Figura 3.17 - Comparação entre dados experimentais e simulação com modelo**



**Figura 3.18 - Comparação entre simulação com modelo completo e arquetípico**

Pode-se observar uma boa correlação nas séries temporais apresentadas, tanto quando comparadas com dados experimentais, quanto para os dados de simulação com modelo completo. Esses resultados confirmam a reprodutividade da dinâmica do sistema por parte do modelo arquetípico. Contudo, como foi mencionado, comparações mais aprofundadas entre o modelo completo e o modelo arquetípico ainda serão realizadas neste trabalho.

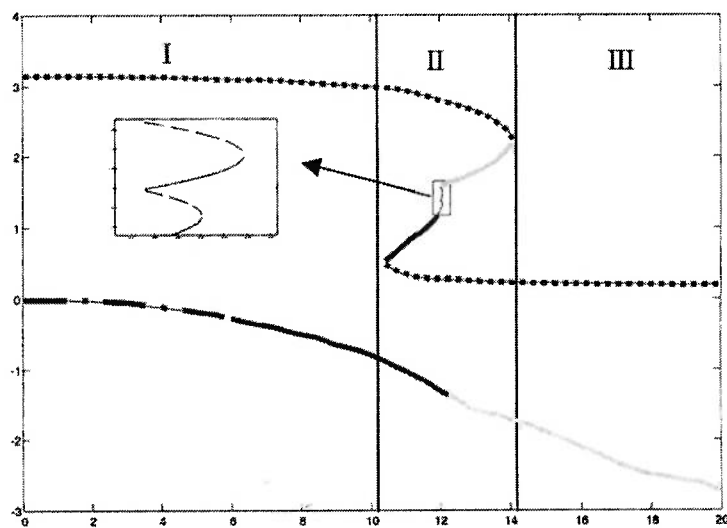
## 4. RESULTADOS

Tendo em vista o modelo arquetípico desenvolvido pretende-se obter resultados comparativos que confirmem a reprodutividade da dinâmica do sistema completo com o modelo reduzido, reprodutividade esta observada no item de validação experimental. Como já mencionado, a simples comparação por séries temporais não implica em uma avaliação correta dos modelos, pois não contempla toda a fenomenologia de sua dinâmica. Por esse motivo, tem-se por objetivo comparar os resultados com o modelo completo através de mapas de bifurcação e diagrama de poços potenciais.

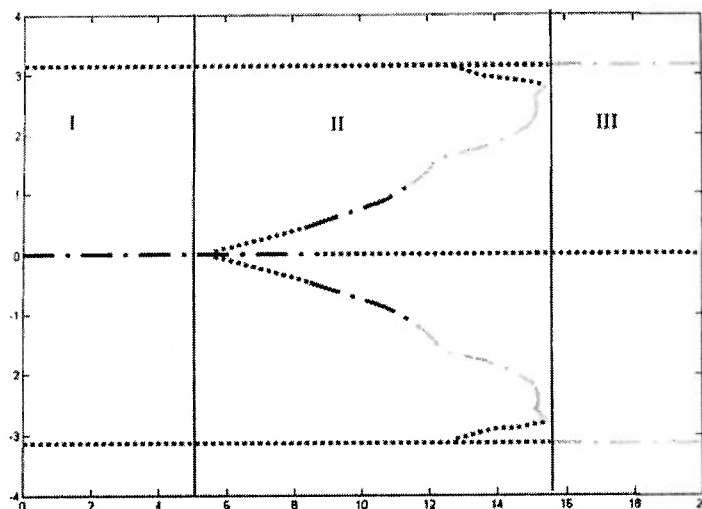
Alguns mapas de bifurcação do modelo completo foram elaborados por Morishita et al (2001), tendo como parâmetro de controle a relação  $\sigma = \frac{V_v}{V_c}$  (relação entre velocidades de vento e corrente). A escolha desse parâmetro tem por finalidade o estudo das possíveis variações nas posições de equilíbrio do sistema (atratores), quando da operação de descarregamento (off-loading), mediante possíveis variações de intensidade de vento e corrente. Essa investigação é de grande importância em termos de engenharia, pois identifica o "surgimento" de posições de equilíbrio indesejáveis, as quais podem representar algum risco prático para a operação, tal como a colisão dos navios. Para obtenção dos mapas de bifurcação foi utilizado o algoritmo de Newton-Raphson com a adição, para teste de convergência, de erro absoluto e relativo.

Em termos de modelo completo, esses mapas foram feitos para o sistema DICAS de amarração, por constituir um sistema mais simples em termos computacionais e assim, tornando o processo de obtenção dos mapas mais viáveis em termos de tempo de processamento. Tal simplicidade está no fato de que os graus de liberdade do navio FPSO são limitados devido à amarração.

Segundo Morishita et al (2001), pode-se observar nas Figuras 4.1 e 4.2 os mapas de bifurcação dos pontos de equilíbrio do sistema para duas situações distintas: na Figura 4.1 a direção da corrente é de  $\psi_c = 180^\circ$  e a direção do vento é de  $\psi_v = 10^\circ$  e na Figura 4.2,  $\psi_c = 180^\circ$  e  $\psi_v = 0^\circ$ .



**Figura 4.1 - Diagrama de bifurcação para modelo completo ( $\psi_v = 10^\circ$  e  $\psi_c = 180^\circ$ )**



**Figura 4.2 - Diagrama de bifurcação para modelo completo ( $\psi_c = 180^\circ$  e  $\psi_v = 0^\circ$ )**

De acordo com os autores, pode-se identificar pela Figura 4.1 a presença de três regiões distintas. Região I, onde há apenas dois pontos de equilíbrio, sendo um deles instável ( $\psi > 0$ ) e outro estável ( $\psi < 0$ ) representando o equilíbrio segundo a direção da resultante das forças de vento e corrente. Na região II nota-se o surgimento (bifurcações tipo fold) de mais pontos de equilíbrio, sendo alguns deles estáveis, porém, do ponto de vista de engenharia, em posição indesejável. Na mesma região II, o ponto de equilíbrio estável ( $\psi < 0$ ) continua com sua estabilidade.

A região III possui qualitativamente as mesmas características da região I, apenas com seus atratores em valores diferentes.

Na Figura 4.2, para  $\psi_v = 0^\circ$ , nota-se também a presença de três regiões. As regiões I e III mostram-se semelhantes em relação ao número de pontos de equilíbrio. No entanto na região I, há a presença de um ciclo limite estável para

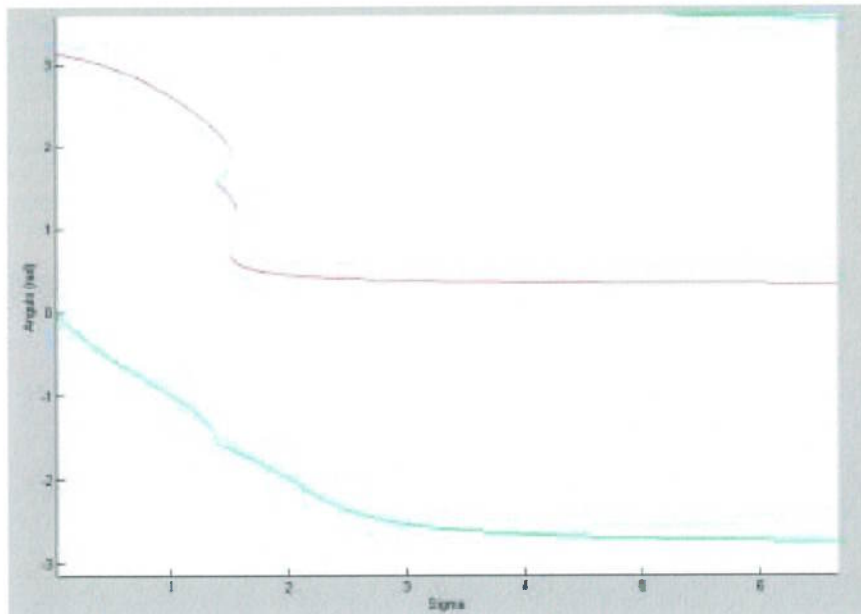
$\psi = 0$  e dois outros pontos de equilíbrio instáveis, diferentemente da região III, com dois pontos de equilíbrio assintoticamente estáveis e um instável.

Quando as forças de vento e corrente se equilibram ( $\sigma \cong 2.0$ ), ocorre uma bifurcação, pela qual o ciclo limite muda para dois pontos de equilíbrio estáveis. Ainda na região II, aumentando-se  $\sigma$ , consegue-se obter outros pontos de equilíbrio que surgem através de bifurcações do tipo fold e, dessa forma, ora estáveis, ora instáveis. Aumentando-se  $\sigma$ , entra-se na região III.

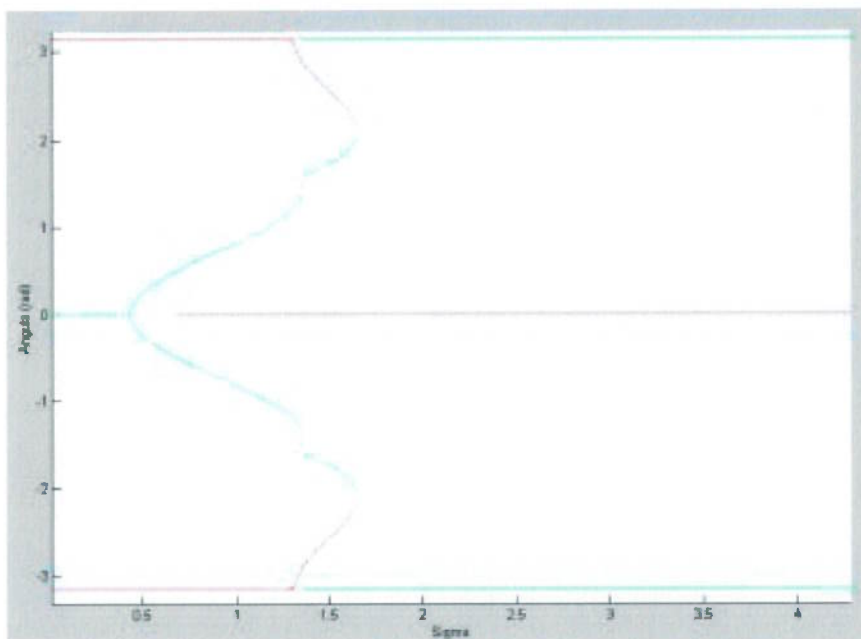
Nas Figuras 4.3 e 4.4 pode-se observar os mapas de bifurcação para o modelo arquetípico, considerando o sistema DICAS de amarração. Nota-se as mesmas regiões apresentadas nos mapas de bifurcação do modelo completo. Na região II o número de pontos de equilíbrio não é o mesmo, porém, qualitativamente, obteve-se o mesmo comportamento, inclusive os mesmos tipos de bifurcação folds.

Na Figura 4.4, como será mostrado nos resultados de bacias de atração a seguir, também se nota uma grande similaridade. A presença de um ciclo limite na região I, uma bifurcação tornando esse ciclo limite em dois pontos de equilíbrio estáveis na região II, e os três pontos de equilíbrio na região III.

Nos mapas de bifurcação apresentados os pontos em cor verde representam condições de equilíbrio estável, sejam elas relativas a pontos hiperbólicos, não-hiperbólicos ou ciclos limite. Em vermelho estão representados os pontos de equilíbrio instáveis.



**Figura 4.3 - Diagrama de bifurcação para o sistema DICAS ( $\psi_v = 10^\circ$ )**



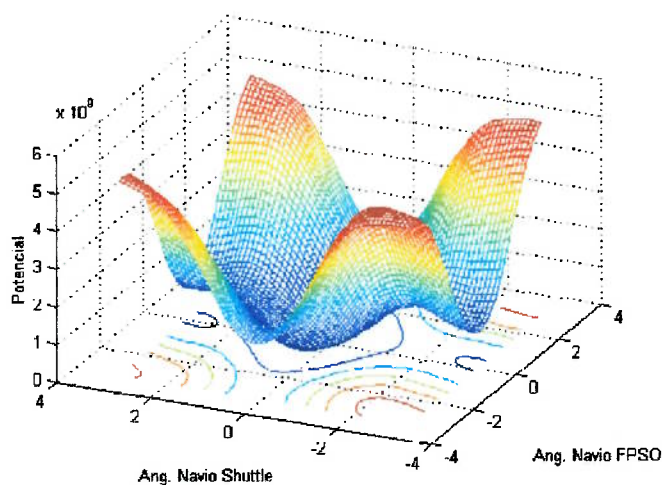
**Figura 4.4 - Diagrama de bifurcação para o sistema DICAS ( $\psi_v = 0^\circ$ )**

Para o sistema em Turret, devido a dificuldade de processamento matemático para o modelo completo, não se tem mapas de bifurcação do

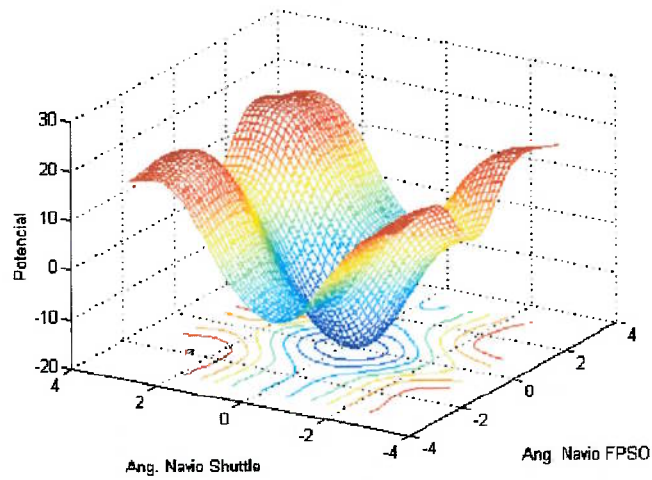


modelo. No entanto, pode-se compará-lo com o modelo arquetípico através de poços potenciais.

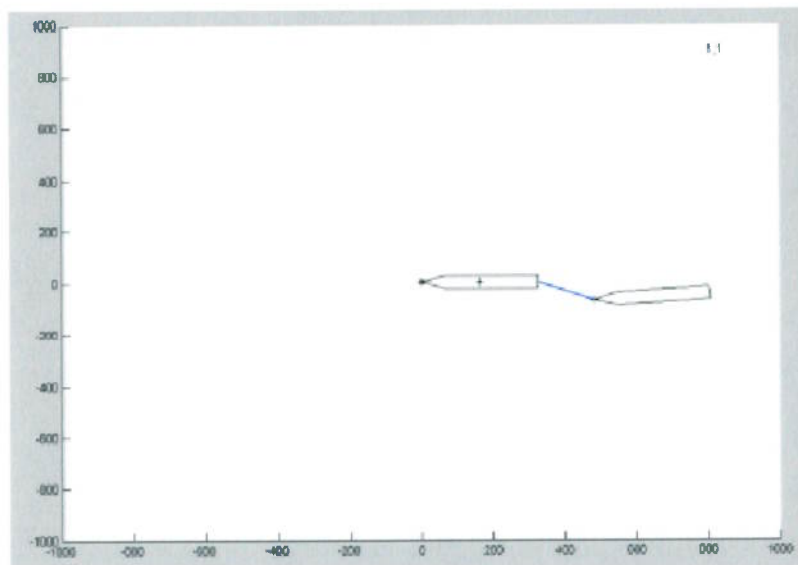
Nas Figuras 4.5 e 4.6 tem-se os poços potenciais para os modelos completo e arquetípico, respectivamente, para o Turret posicionado na proa do navio FPSO, como pode ser visto na Figura 4.7. Tais poços foram obtidos para ângulos de corrente e vento de  $\psi_c=180^\circ$  e  $\psi_v=90^\circ$ , respectivamente. Vale ressaltar que a maior diferença que o modelo arquetípico e o modelo completo apresentam é para ângulos de vento de través, visto que para tais ângulos, os coeficientes de vento (medidos experimentalmente) diferem da aproximação feita, pela qual os coeficientes variam segundo uma senóide.



**Figura 4.5 - Poço potencial para modelo completo**



**Figura 4.6 - Poço potencial para o modelo arquetípico**

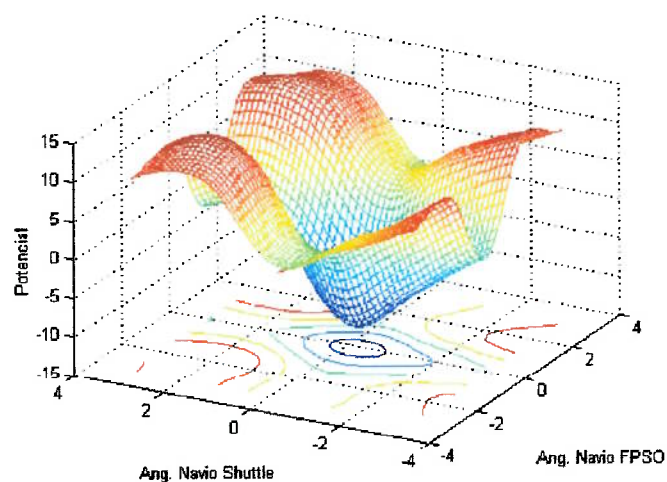


**Figura 4.7 - Posicionamento com Turret na ponta do navio FPSO**

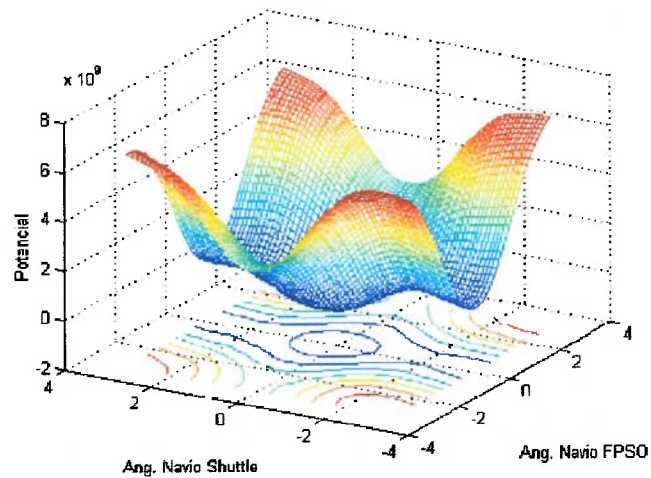
De maneira geral ambos os poços possuem um mesmo comportamento qualitativo. Ambos apresentam uma região de mínima energia, em torno do ponto  $(0,0)$ , representando um ponto de equilíbrio estável. Para as posições extremas do potencial  $(-\pi,-\pi)$ ,  $(\pi,\pi)$ ,  $(-\pi,\pi)$  e  $(\pi,-\pi)$  tem-se regiões de máxima

energia, as quais decaem tanto no sentido da variação do ângulo do navio FPSO, como para o ângulo do navio aliviador (navio shuttle). Para o ângulo do navio aliviador ( $\psi_2$ ) igual a zero, tem-se para ângulos do navio FPSO ( $\psi_1$ ) próximos à  $-\pi$  e  $\pi$ , pontos de sela, representando uma instabilidade local. De outra forma, observando as linhas equipotenciais, apresentadas no plano de energia zero do gráfico, pode-se observar tendências semelhantes de variação de energia.

Nas Figuras 4.8 e 4.9 estão apresentados os poços potenciais para os modelos completo e arquetípico, respectivamente, para o turrete posicionado à meia nau do navio FPSO, adotando-se as mesmas condições ambientais.



**Figura 4.8 - Turrete posicionado à meia nau - Modelo Arquetípico**



**Figura 4.9 - Turret posicionado à meia nau - Modelo Completo**

Novamente, as mesmas observações feitas para os gráficos anteriores podem ser feitas neste caso: ponto de mínimo na região da origem (0,0) e mesmas regiões de crescimento e decrescimento da função potencial. Uma característica a se observar são as linhas equipotenciais no plano de energia zero do poço. Observa-se, em ambos os modelos, a mudança de orientação das linhas em relação aos diagramas anteriores. Para o Turret na proa do navio FPSO, as linhas estavam orientadas no sentido de variação do ângulo navio aliviador, diferentemente dos gráficos das figuras 4.8 e 4.9. Isso pode ser explicado devido à contribuição de inércia do navio FPSO em relação ao sistema. Com o turret posicionado à proa deste, sua inércia rotativa em relação ao C.G. é maior quando comparada ao turret posicionado à meia nau (posição próxima ao C.G.). Com o turret a meia nau, as linhas tomam uma orientação no sentido da variação do ângulo do navio FPSO, mostrando que a maior inércia do sistema relaciona-se com a inércia do navio aliviador, a qual é maior

proporcionalmente quando comparada com a do navio FPSO.

Dessa forma, mesmo para o sistema turrete de amarração, o qual apresenta-se mais complexo devido ao aumento do número de graus de liberdade, o modelo arquetípico representa bem o sistema como um todo. Para o sistema DICAS, percebe-se facilmente essa correlação através da semelhança dos diagramas de bifurcação apresentados. Pode-se notar com isso que o modelo arquetípico representa de maneira adequada a dinâmica qualitativa do sistema em estudo, e por isso, pode ser usado para obtenção de resultados objetivando analogias com a dinâmica do modelo completo.

#### **4.1 Exploração do modelo arquetípico**

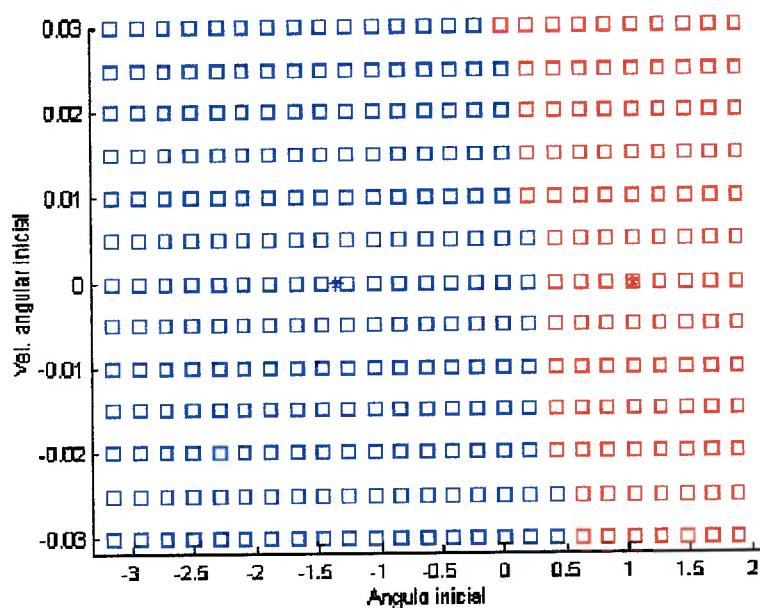
##### **4.1.1 Sistema de amarração DICAS**

Um dos principais estudos nos quais objetiva-se utilizar o modelo arquetípico é a obtenção das bacias de atração dos pontos de equilíbrio. Com esses diagramas, pode-se conhecer o domínio de atração de cada ponto de atrator, e dessa forma ter conhecimento de "quão forte" é um atrator.

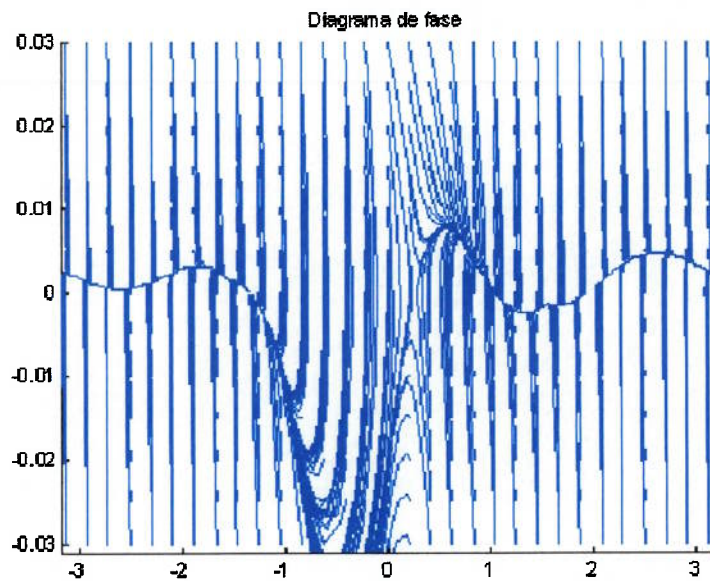
Nas figuras 4.10 e 4.11 estão apresentadas a bacia de atração e o diagrama de fase, respectivamente, para  $\sigma = 1.3$  na condição de  $\psi_v = 10^\circ$  e  $\psi_c = 180^\circ$  (diagrama de bifurcação na Figura 4.3). Essa condição mostrou-se peculiar devido a equiparação das forças de vento e corrente para  $\sigma$  ao redor de 1.0. Para identificação da região de atração um algoritmo foi elaborado, o qual será detalhado mais adiante. Como representação, foi adotado que os

pontos de equilíbrio estáveis fossem representados por um asterisco (\*) e ciclos limite por um círculo (o). Os demais pontos representam pontos no espaço de estado pertencentes a região de atração de determinado atrator, identificados por cores.

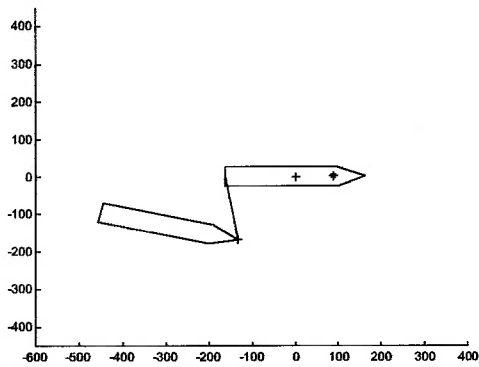
Pode ser visto na bacia de atração que ambos pontos de equilíbrio estáveis possuem uma região de atração considerável, sendo que para o atrator  $\psi_1 = 1.3 \text{ rad}$  a bacia apresentou-se menor em comparação com o segundo atrator  $\psi_2 = -1.3 \text{ rad}$ . Em termos de engenharia, o primeiro atrator representa uma posição indesejável, visto que o navio FPSO está ancorado com aproamento relativo de zero radianos, e um aproamento positivo do navio aliviador representaria uma maior aproximação dos dois navios. (Figura 4.12)



**Figura 4.10 - Bacia de atração para sistema DICAS ( $\sigma = 1.3$ ,  $\psi_v = 10^\circ$  e  $\psi_c = 180^\circ$ )**



**Figura 4.11 - Diagrama de fase para sistema DICAS ( $\sigma = 1.3$ ,  $\psi_v = 10^\circ$  e  $\psi_c = 180^\circ$  )**

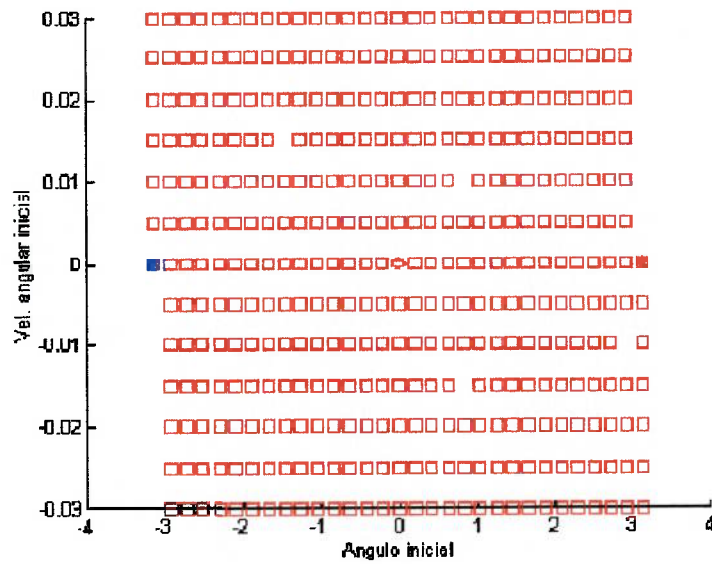


**Figura 4.12 - Sistema de amarração DICAS**

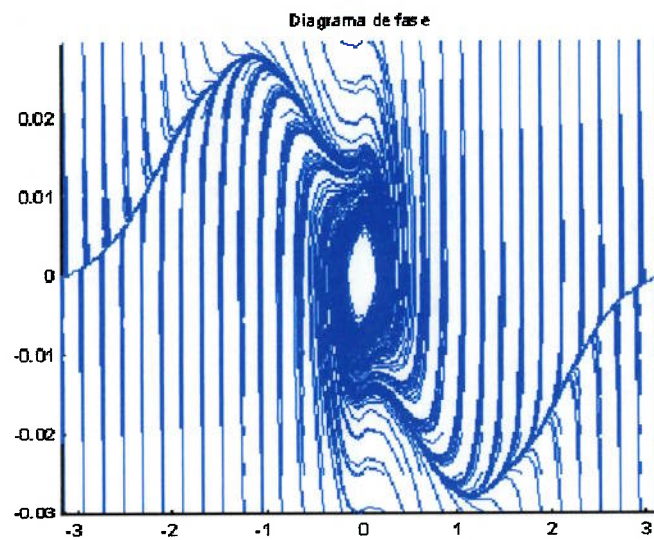
O diagrama de fase apenas confirma os resultados obtidos através da bacia de atração gerada.

Nas Figuras 4.13 e 4.14 estão apresentadas as bacias de atração e o diagrama de fase para o caso de  $\psi_v = 0^\circ$  e  $\psi_c = 180^\circ$  para  $\sigma = 0.3$ . Pode-se observar a presença de um ciclo limite (identificado pelo símbolo de um círculo

em seu centro), com região de atração sendo definido por todo o espaço dos parâmetros analisados.



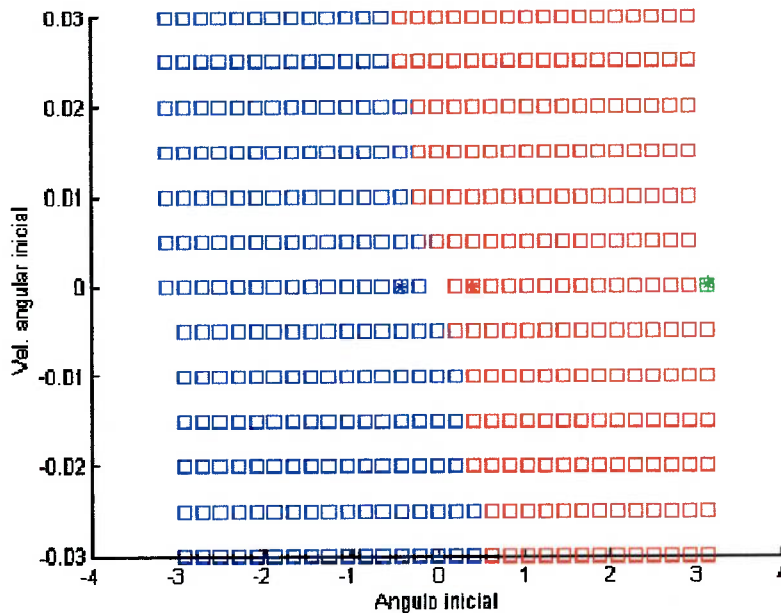
**Figura 4.13 - Bacia de atração para sistema DICAS ( $\sigma = 0.3$ ,  $\psi_v = 0^0$  e  $\psi_c = 180^0$  )**



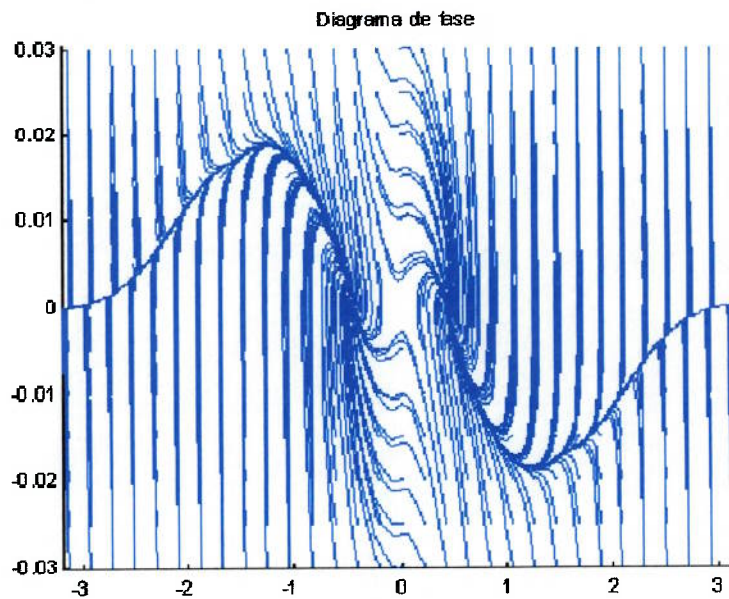
**Figura 4.14 - Diagrama de fase para sistema DICAS ( $\sigma = 0.3$ ,  $\psi_v = 0^0$  e  $\psi_c = 180^0$  )**



Com o aumento do valor de sigma, ou melhor, a medida que a velocidade do vento se intensifica, ocorre um ponto de bifurcação (Figura 4.4), e o sistema passa a possuir 2 pontos de equilíbrio, os quais inicialmente se caracterizam por dois ciclos limite, passando posteriormente a pontos de equilíbrio assintoticamente estáveis. Pode-se notar através das Figuras 4.15 e 4.16 a bacias de atração e o diagrama de fase para o caso comentado ( $\sigma = 1.3$ ). Observa-se que a região do espaço de parâmetros se divide de forma uniforme entre os dois atratores, pontos de equilíbrio assintoticamente estáveis. Vale ressaltar, no entanto, que tal condição ambiental se mostra, na prática, impraticável, pois tais características ocorrem apenas, numericamente, na situação de oposição entre as forças de vento e corrente.

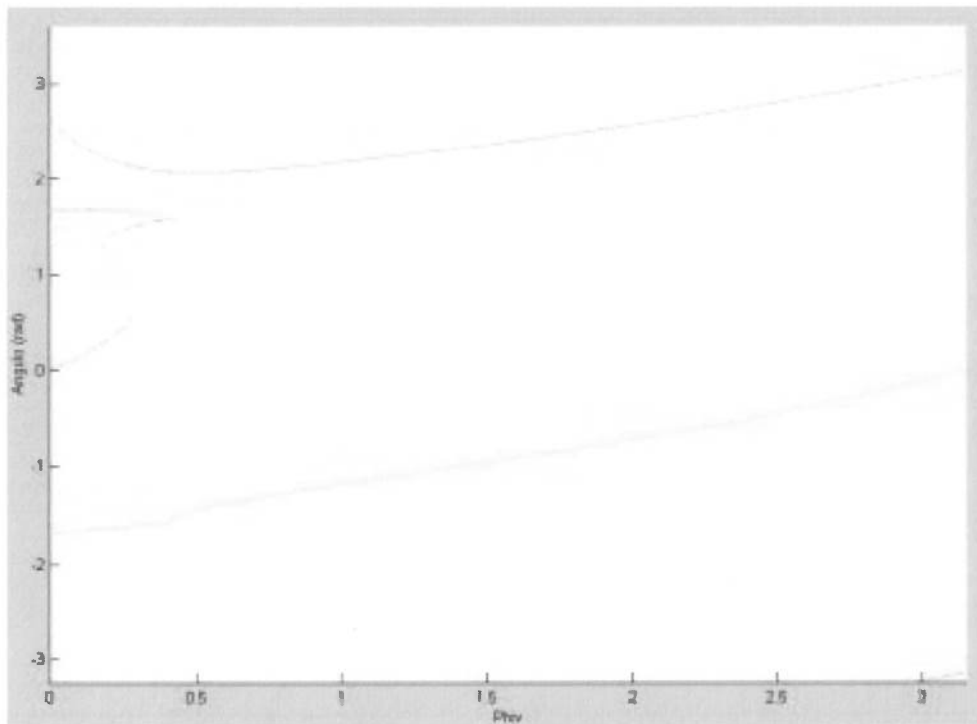


**Figura 4.15 - Bacia de atração para sistema DICAS ( $\sigma = 1.3$ ,  $\psi_v = 0^\circ$  e  $\psi_c = 180^\circ$ )**



**Figura 4.16 - Diagrama de fase para sistema DICAS ( $\sigma = 1.3$ ,  $\psi_v = 0^\circ$  e  $\psi_c = 180^\circ$  )**

Com os resultados obtidos, pode-se observar que as bifurcações ocorrem quando da equiparação das forças ambientais. Na Figura 4.17 por exemplo, está apresentado um diagrama de bifurcação também para o sistema DICAS de amarração, para uma dada relação de velocidades ( $\sigma$ ) e como parâmetro de controle o ângulo do vento. O ângulo da corrente foi fixado em  $\pi$  e como resultado obteve-se um cenário mais complexo em termos de dinâmica para  $\psi_v < 0.5 \text{ rad}$ , ratificando o surgimento de bifurcações quando da equiparação das forças ambientais, já que o ângulo de incidência da corrente é de  $\pi \text{ rad}$  (180 graus).



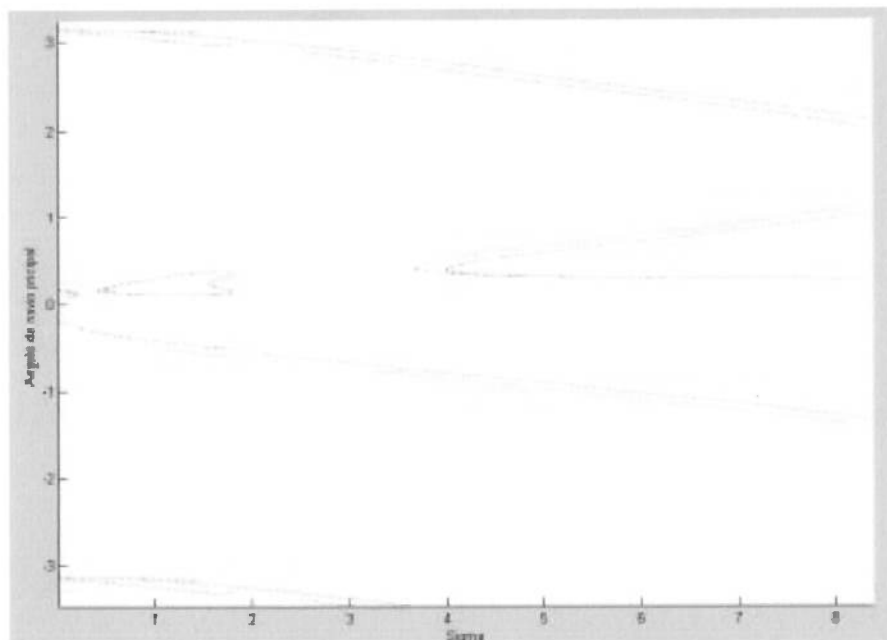
**Figura 4.17 - Diagrama de bifurcação segundo variação de ângulo de vento ( $\sigma = 2.0$ )**

#### 4.1.2 Sistema de amarração Turret

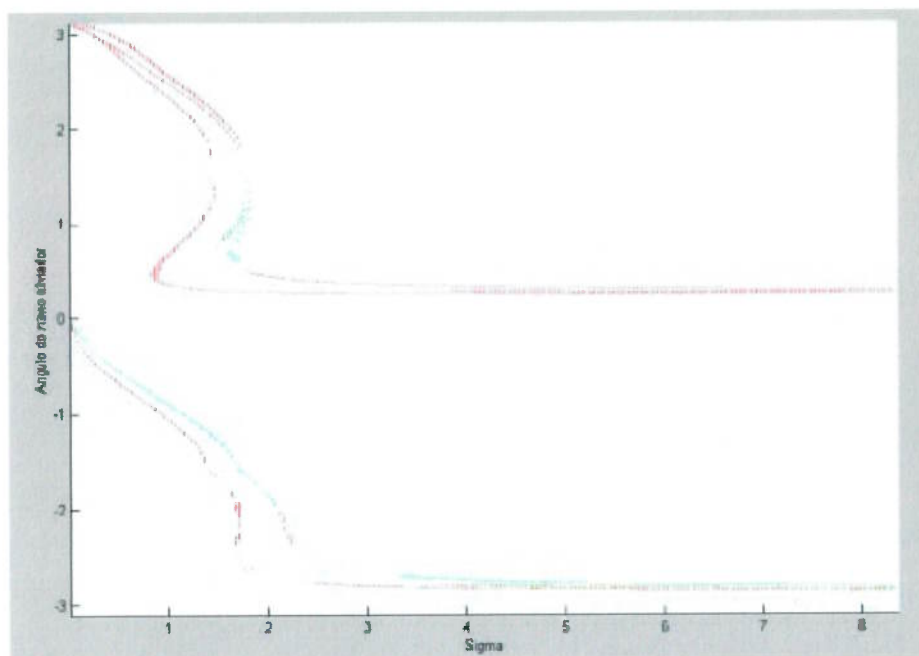
Para o sistema de amarração em Turret, tem-se um cenário um pouco mais complexo devido ao aumento dos graus de liberdade. Nesse sistema ambos os navios podem mudar seu aproamento com relação às condições ambientais o que, de certa forma, reduz o risco de colisão pois ambos os navios se acomodam em posições naturalmente afastadas. No entanto os navios podem se comportar de maneira distinta, ou seja, com tempos de resposta diferentes, e dessa forma possuem respostas à excitações diferentemente um do outro o que pode provocar proximidade e com isso risco de colisão em regimes transitórios de resposta. Em situação de regime permanente, pode

haver pontos de equilíbrio distintos para os navios, o que ocasionaria, novamente, movimentos excessivos entre os navios. Do ponto de vista de engenharia, tal movimentação é uma característica ruim para o sistema, pois induz grandes esforços nos sistema de conexão entre os navios.

Como ponto de partida para a exploração do modelo arquetípico foi construído um mapa de bifurcação dos pontos de equilíbrio, para uma condição com o Turret posicionado na ponta do navio FPSO, ângulo de vento em torno de  $\frac{\pi}{4}$ , ângulo de corrente a  $\pi$  e condições medianas de calados (carregamento) para ambos navios. Pode-se observar nas Figuras 4.18 e 4.19 os mapas de bifurcação dos ângulos de equilíbrio para os navios FPSO e aliviador, respectivamente, e como parâmetro de controle, tem-se a relação de velocidades  $\sigma$ .



**Figura 4.18 - Mapas de bifurcação para o navio FPSO ( $\psi_v = \frac{\pi}{4}$  e  $\psi_c = \pi$ )**



**Figura 4.19 - Mapas de bifurcação para o navio aliviador ( $\psi_v = \frac{\pi}{4}$  e  $\psi_c = \pi$ )**

Nota-se grande semelhança do mapa de bifurcação do navio aliviador, quando comparado ao mesmo navio aliviador, porém com o sistema DICAS de amarração para o sistema. No entanto, para o navio FPSO, nota-se um cenário diferente. Para  $\sigma > 4$  tem-se a presença de outro ponto de equilíbrio ( $\psi_1 > 0$ ). Esses dois pontos de equilíbrio mencionados “disputam” o equilíbrio do sistema, com diferentes áreas de atração, como pode ser vistas nas Figuras 4.20 a 4.23, as quais representam as bacias de atração e diagramas de fase para  $\sigma = 4.0$  e  $\sigma = 6.0$ , respectivamente. A região de atração do ponto de equilíbrio  $\psi_1 > 0$  para  $\sigma$  em torno de 4.0 é pequena quando comparada a do outro ponto de equilíbrio. A medida que a velocidade do vento é aumentada, aumentando sigma, sua região vai aumentando, dividindo espaço na região de atração com

o outro ponto.

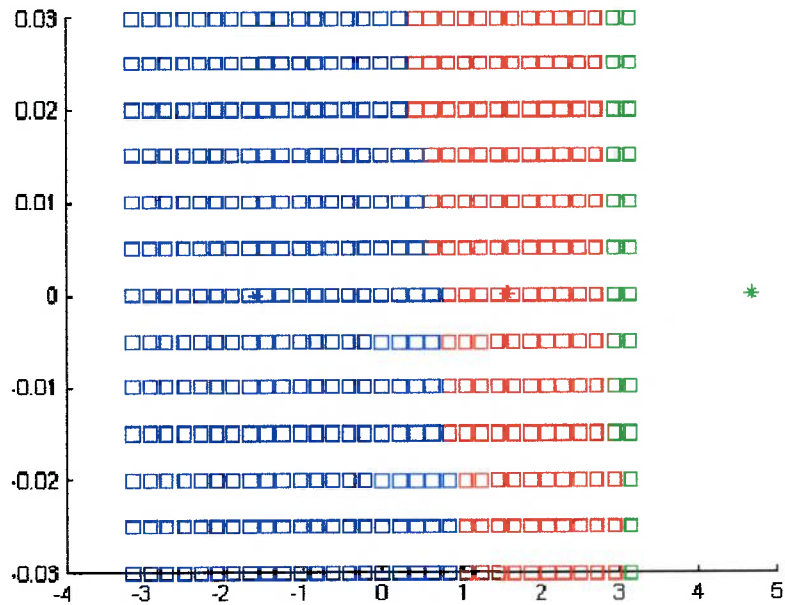


Figura 4.20 - Bacia de atração para sistema Turret ( $\sigma = 4.0$ ,  $\psi_v = \frac{\pi}{4}$  e  $\psi_o = \pi$  )

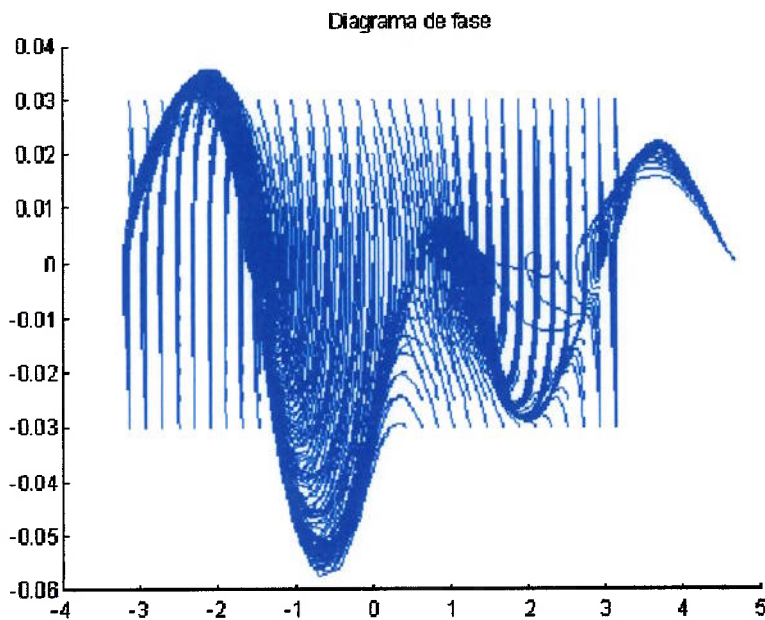


Figura 4.21 - Diagrama de fase para sistema Turret ( $\sigma = 4.0$ ,  $\psi_v = \frac{\pi}{4}$  e  $\psi_o = \pi$  )

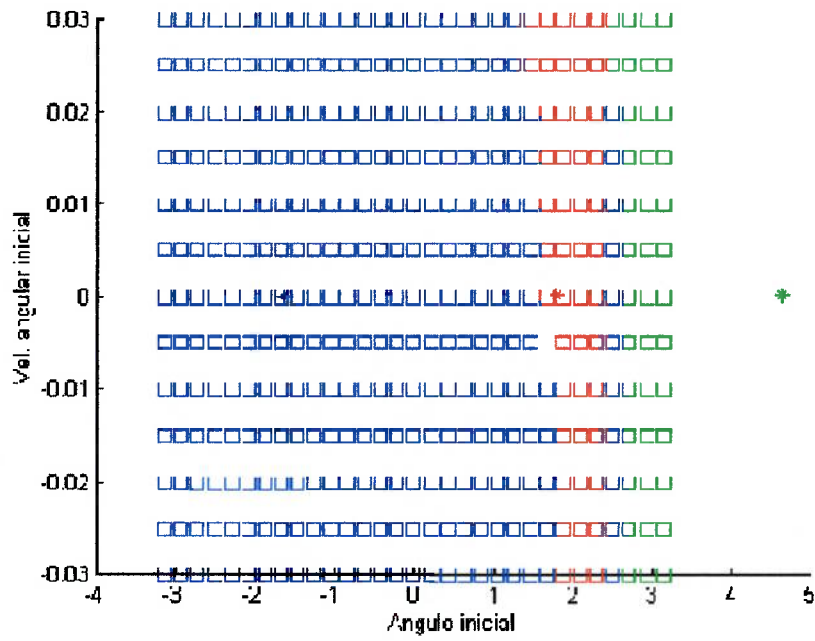


Figura 4.22 - Bacia de atração para sistema Turret ( $\sigma = 6.0$ ,  $\psi_v = \frac{\pi}{4}$  e  $\psi_c = \pi$ )

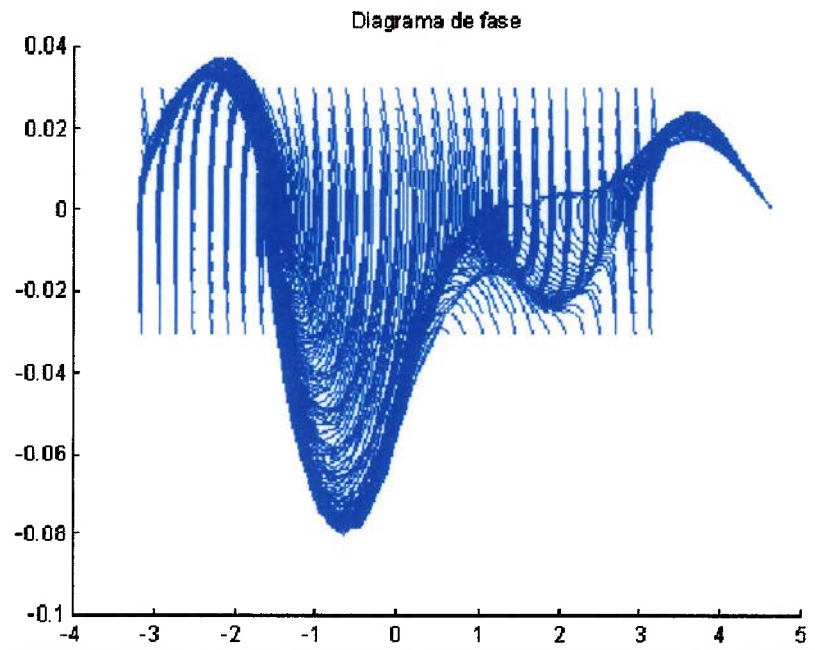


Figura 4.23 - Diagrama de fase para sistema Turret ( $\sigma = 6.0$ ,  $\psi_v = \frac{\pi}{4}$  e  $\psi_c = \pi$ )

Nota-se pelos mapas de bifurcação a presença de um outro ponto de equilíbrio estável (representado em verde no diagrama) também resultante de um fold, em torno de  $\sigma = 1.8$ . No entanto, o que se verifica através de sua bacia de atração é que sua região de atração não se manifesta, sendo considerado assim um atrator de pouca relevância prática.

O número de pontos de equilíbrio apresenta-se maior que o sistema DICAS de amarração, contemplando a maior complexidade do sistema Turret.

Uma característica do sistema Turret é sua dependência para com a posição de fixação do Turret. De acordo com sua posição, o navio FPSO tem uma inércia relativa ao ponto de rotação diferente, alterando assim a dinâmica do sistema como um todo.

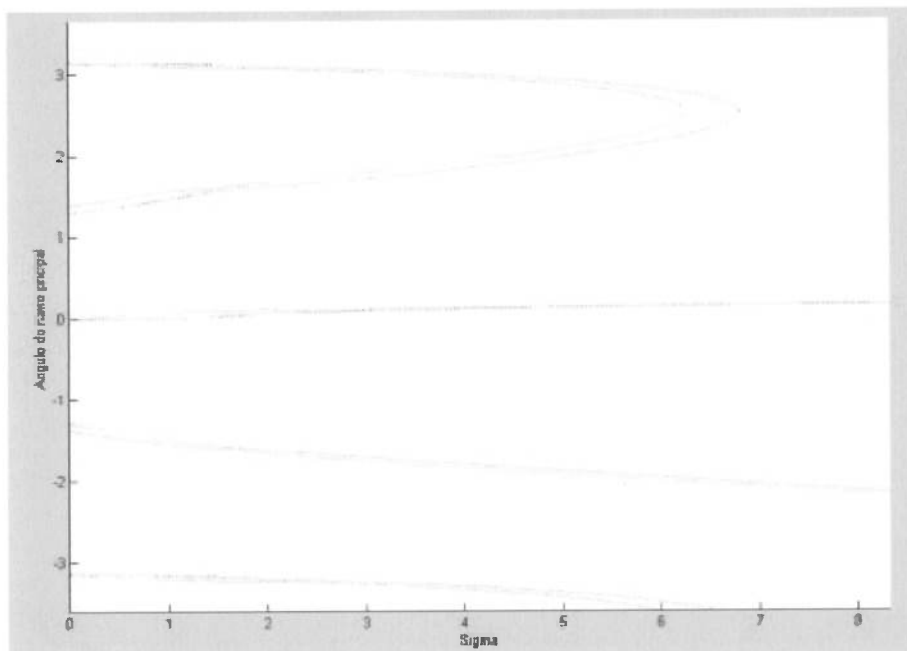
Nas Figuras 4.24 e 4.25 estão apresentados os diagramas de bifurcação para o sistema Turret, com as mesmas características do sistema anteriormente discutido, porém com o Turret localizado à meia nau do navio FPSO. Como pode-se observar nos diagramas, o número de pontos equilíbrio, sejam eles estáveis ou instáveis, é maior que no caso anterior. O próprio algoritmo utilizado, usando a mesma precisão numérica do caso anterior, encontrou pontos de equilíbrio muito próximos uns dos outros, o que fisicamente corresponderia apenas um ponto. Tal característica demonstra mudança no sistema.

Com o Turret a meia nau, o equilíbrio com respeito ao navio FPSO passa a ser "indiferente", ou seja, em termos de poços potenciais, seu poço é mais "achatado", possuindo menor variação de energia, e assim, menor força de

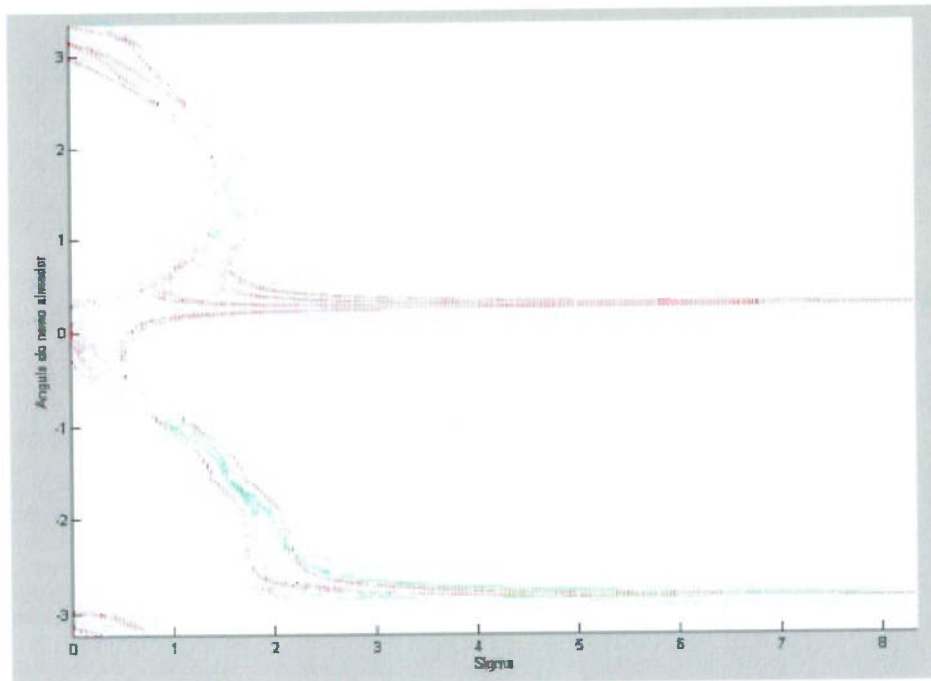


atração. Percebe-se pela figura 4.50 a presença de dois pontos de equilíbrio para o navio FPSO até valores de sigma em torno de 6.0, quando então apenas um atrator permanece mediante a preponderância das forças de vento. O detalhe desse diagrama é que os pontos de equilíbrio para valores de sigma próximos a zero, ou seja, na ausência de vento, são valores em torno de 1.3 rad e -1.3 rad. Tais variações dos pontos de equilíbrio são também verificadas com o modelo completo através de simulação.

Apesar da corrente estar alinhada a  $\pi$ , o navio FPSO não fica em equilíbrio alinhado a corrente, devido ao novo posicionamento do Turret. Já em relação ao navio aliviador, o comportamento qualitativo do diagrama permanece inalterado, apenas com maior número de pontos de equilíbrio instável.



**Figura 4.24 - Mapas de bifurcação para o navio FPSO ( $\psi_v = \frac{\pi}{4}$  e  $\psi_c = \pi$ )**



**Figura 4.25 - Mapas de bifurcação para o navio aliviador ( $\psi_v = \frac{\pi}{4}$  e  $\psi_c = \pi$ )**

Em termos de engenharia tal sistema apresenta-se mais susceptível à mudanças, pois para o navio FPSO, dois atratores coexistem por uma extensa região do diagrama de bifurcação, tomando como parâmetro as velocidades dos agentes ambientais. Assim movimentações induzidas no navio FPSO podem provocar a atração de um ou outro atrator.

Apesar da maior complexidade do sistema, nota-se qualitativamente a presença de folds nas bifurcações constatadas, principalmente em relação ao navio FPSO. O que significa, qualitativamente, que a dinâmica fundamental do sistema não se altera substancialmente.

Com essa dependência em relação à posição do Turret, um diagrama de bifurcação foi construído tendo como parâmetro de controle a posição relativa

do Turret no navio FPSO. Esse parâmetro, denominado de  $\partial$ , foi variado do valor zero (Turret à meia nau) até 1.0 (Turret na ponta do navio). O diagrama pode ser visto nas Figuras 4.26 e 4.27. O que pode ser observado é que a medida que se posiciona o Turret mais para a meia nau do navio FPSO ( $\partial > 0$ ), o segundo ponto de equilíbrio tende a desaparecer. Em termos de bacia de atração, vistas nas Figuras 4.28 e 4.29, para  $\partial = 0.8$  e  $\partial = 1.0$ , respectivamente, pode-se observar que o ponto de equilíbrio  $\psi > 0$  possui uma região de atração tão menor quanto maior o valor de  $\partial$ . Em termos de projeto, o mapa de bifurcação mostra a partir de qual posição do navio FPSO é interessante posicionar o Turret a partir do qual o sistema possuirá apenas um ponto de equilíbrio para uma dada condição ambiental, caracterizando-se assim por um sistema mais robusto.

Outra condição interessante de se analisar a influência do posicionamento do Turret é com determinada corrente e ausência de vento. Nessa condição tem-se a presença da bifurcação de Hopf. Para o Turret posicionado a extrema proa do navio FPSO, tem-se a condição de ciclo limite estável. A medida que o Turret é posicionado mais a meia nau da embarcação, vê-se o surgimento de dois pontos de equilíbrio, também estáveis, com aproamentos não coincidentes com a direção da corrente. O diagrama de bifurcação para a condição citada pode ser visto nas Figuras 4.30 e 4.31.

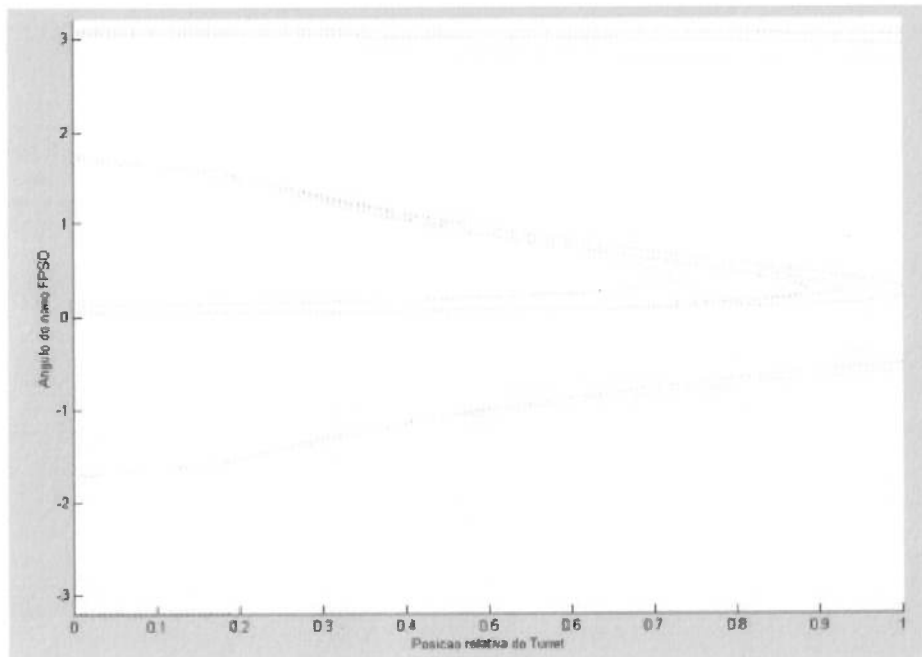


Figura 4.26 - Mapas de bifurcação para o navio FPSO ( $\psi_v = \frac{\pi}{4}$  e  $\psi_c = \pi$ )

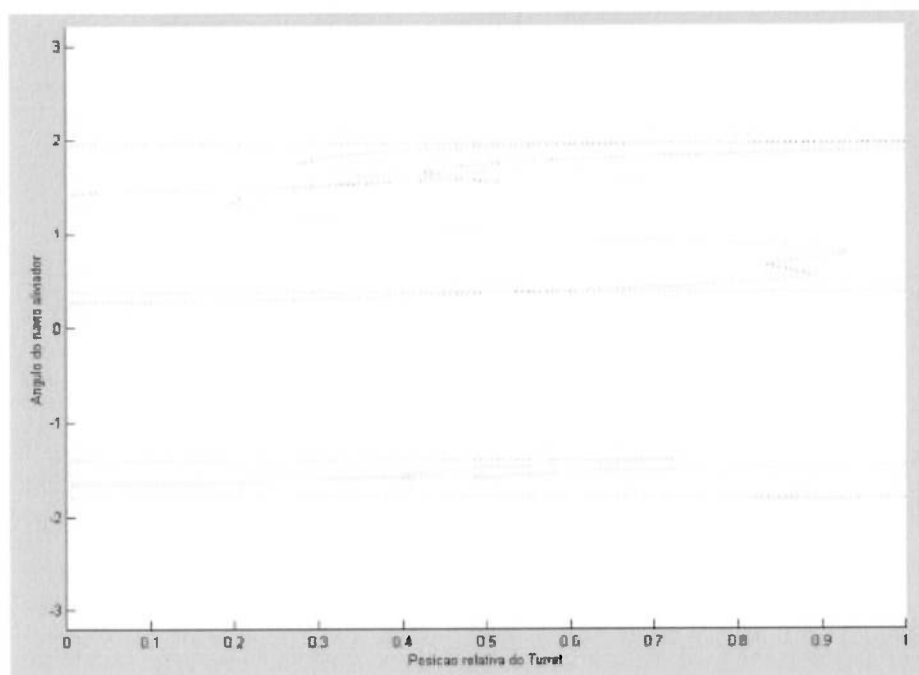
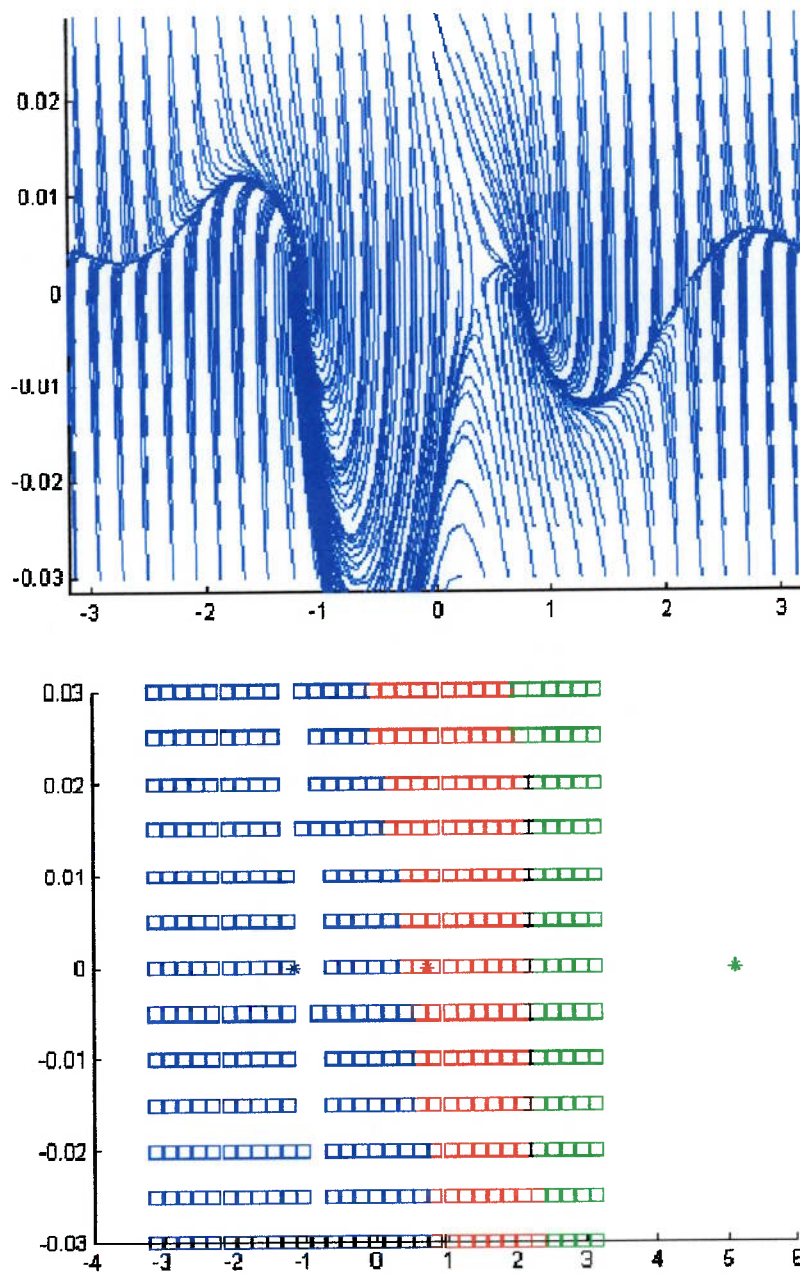


Figura 4.27 - Mapas de bifurcação para o navio aliviador ( $\psi_v = \frac{\pi}{4}$  e  $\psi_c = \pi$ )



**Figura 4.28 - Diagrama de fase e de atração do navio FPSO para  $\delta = 0.8$**

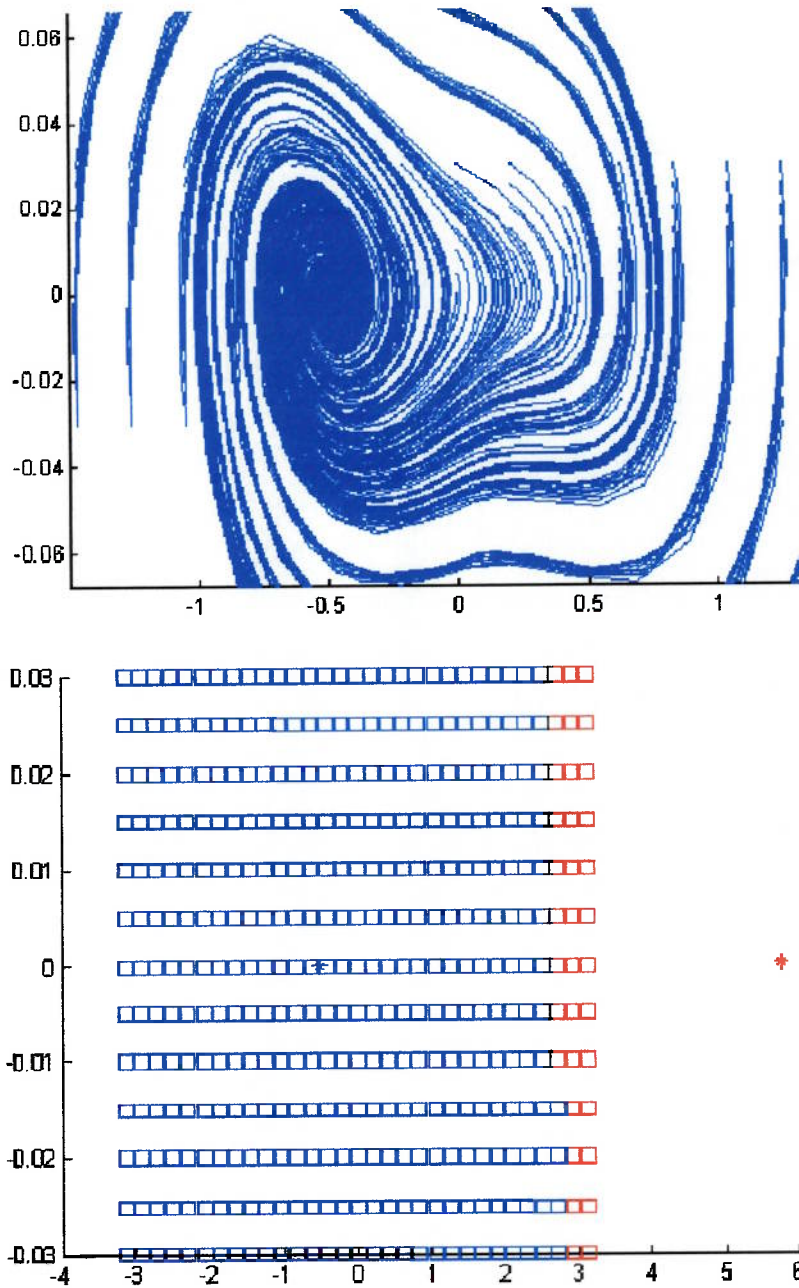
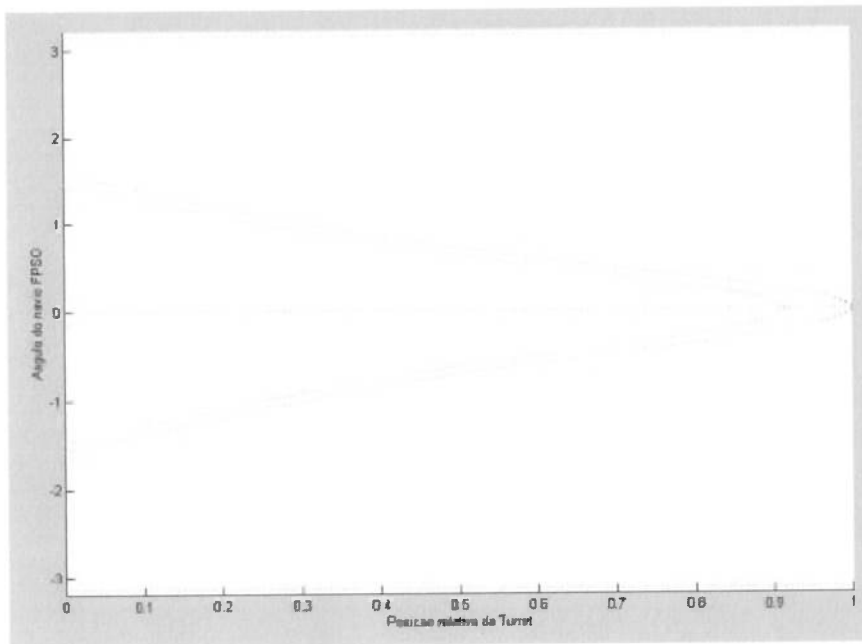
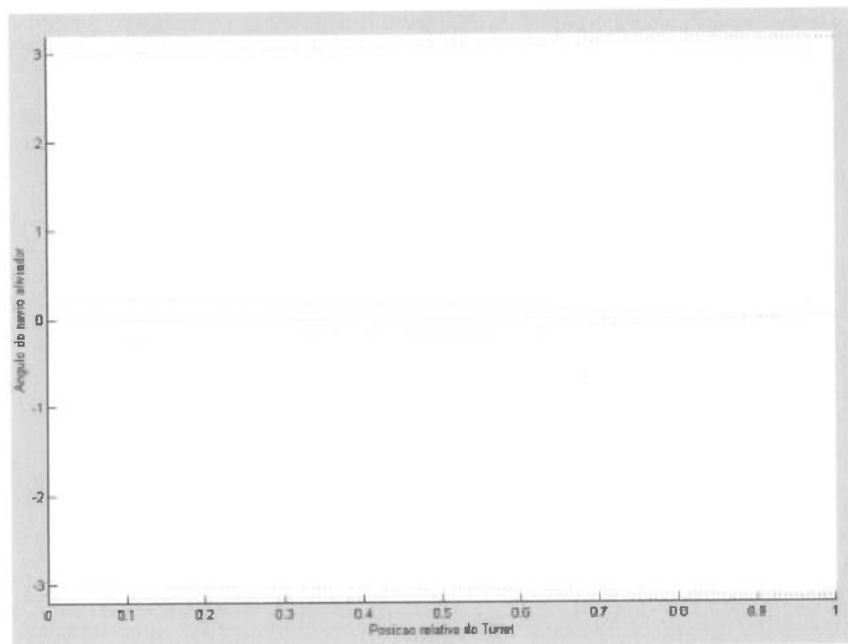


Figura 4.29 - Diagrama de fase e de atração do navio FPSO para  $\delta = 1.0$



**Figura 4.30 - Mapas de bifurcação para o navio FPSO ( $\psi_c = \pi$ )**



**Figura 4.31 - Mapas de bifurcação para o navio aliviador ( $\psi_c = \pi$ )**

#### 4.1.2.1 Parâmetros de projeto

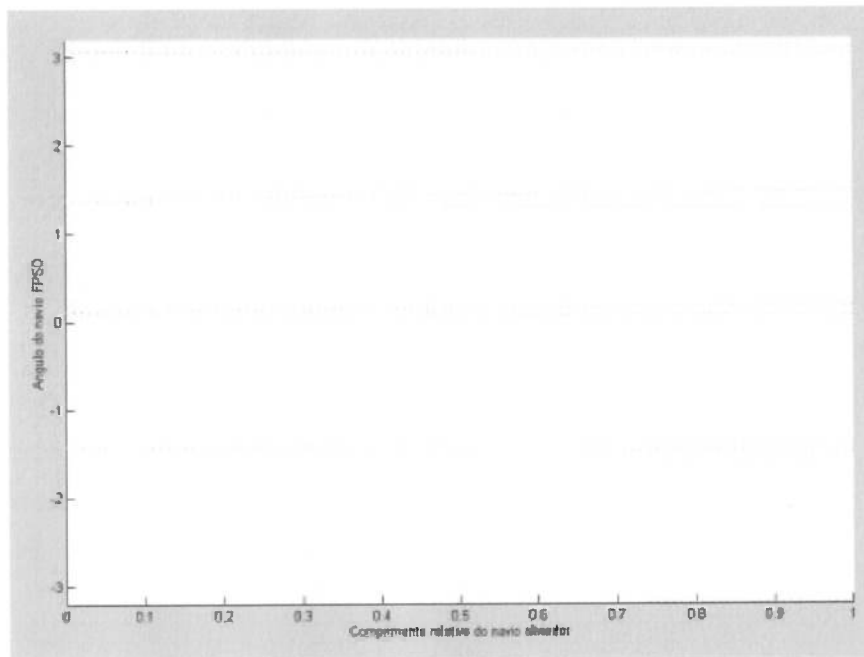
De posse de um modelo arquetípico, uma interessante investigação a ser feita diz respeito a variação de características de projeto. Em etapas iniciais de definição de tal sistema, características globais tais como dimensões principais das embarcações podem ser escolhidas de forma a se obter um comportamento ótimo desejável. Um desses parâmetros mencionados é o comprimento do navio aliviador. De acordo com seu comprimento, essa embarcação possui características diferentes em termos de resposta em relação a vento e corrente.

Em relação a corrente, utilizando-se as equações 24, 25 e 26 pode-se estabelecer a relação entre comprimento do navio de coeficientes de corrente. Com relação ao vento, pode-se fazer uma aproximação que os coeficientes de vento não sejam sensíveis a uma variação de comprimento do navio. Dessa forma a força devido ao vento sofre alteração apenas da área projetada. Como tais navios, geralmente, possuem coeficientes de bloco elevados, pode-se aproximar uma variação linear das forças e momentos do vento em relação ao comprimento.

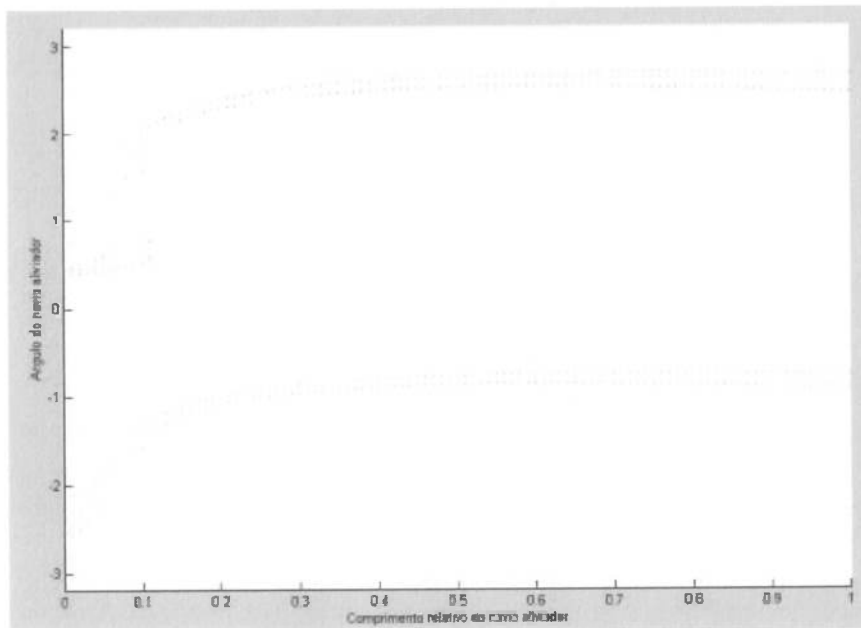
Dessa forma, com o modelo arquetípico, mapas de bifurcações foram construídos tendo como parâmetro de variação a o comprimento do navio aliviador. Tal parâmetro tem como faixa de variação de zero a um, representando valor percentual relativo ao comprimento do navio FPSO. Para tal análise foram consideradas direções de corrente de  $\psi_c = \pi$ , vento de



$\psi_v = \frac{\pi}{6}$ ,  $\sigma = 1.5$  e posição relativa do turret de  $\delta = 0.5$ . Inúmeras outras combinações podem ser testadas. Nas Figuras 4.32 e 4.33 pode-se observar tais diagramas em relação ao navio FPSO e navio aliviador, respectivamente.



**Figura 4.32 - Mapas de bifurcação para o navio FPSO ( $\psi_c = \pi$ )**



**Figura 4.33 - Mapas de bifurcação para o navio FPSO ( $\psi_c = \pi$ )**

Pode-se notar que o navio FPSO mostra-se indiferente com relação ao comprimento do navio aliviador. Pode-se notar, porém, que a medida que seu comprimento fica menor que 15% do comprimento do navio FPSO, mais pontos de equilíbrio surgem para a mesma dada condição ambiental. Isso se deve ao fato do navio com menor comprimento possuir maior sensibilidade ao vento que a corrente, quando comparado com o mesmo navio com maior comprimento.

Tal análise depende das características de cada navio. Por isso pode-se esperar formatos diferentes de tais diagramas de bifurcação para cada sistema analisado. No entanto, tal parâmetro apresenta importância em fase de projeto, pois no exemplo acima mostrado, uma configuração com o comprimento do navio aliviador menor que 15% do navio FPSO pode representar características

indesejáveis, visto que a região de atração é compartilhada por dois diferentes atratores, o que pode implicar, por exemplo, grandes deslocamento do navio aliviador quando este “saltar” de um ponto para outro.

#### 4.1.2.2 Offloading

Durante a operação de descarregamento do navio FPSO, na qual o navio aliviador “puxa” o óleo, as características de cada navio mudam de acordo com sua carga. A medida que o petróleo é esvaziado do navio FPSO, seu calado diminui, e a influência da força de corrente também diminui, ao passo que aumenta a influência do vento, pois a área vélica aumenta com a diminuição do calado. Da mesma forma, o navio aliviador tem seu calado aumentado, tornando a influencia da corrente maior e a do vento menor. Tais variações, para uma dada condição ambiental, pode representar uma alteração da dinâmica do sistema durante o processo.

O que se pretende fazer é analisar a operação de descarregamento com respeito a alteração dos pontos de equilíbrio do sistema. Para isso é preciso saber quantitativamente como as forças de vento e corrente incidentes sobre os navios variam com a alteração do deslocamento. Assim pode-se analisar, através de um diagrama de bifurcações, por exemplo, como os pontos de equilíbrio se comportam durante tal operação.

De acordo com os coeficientes de força e momento de corrente já observados nas equações 24, 25 e 26, percebe-se a dependência com o calado

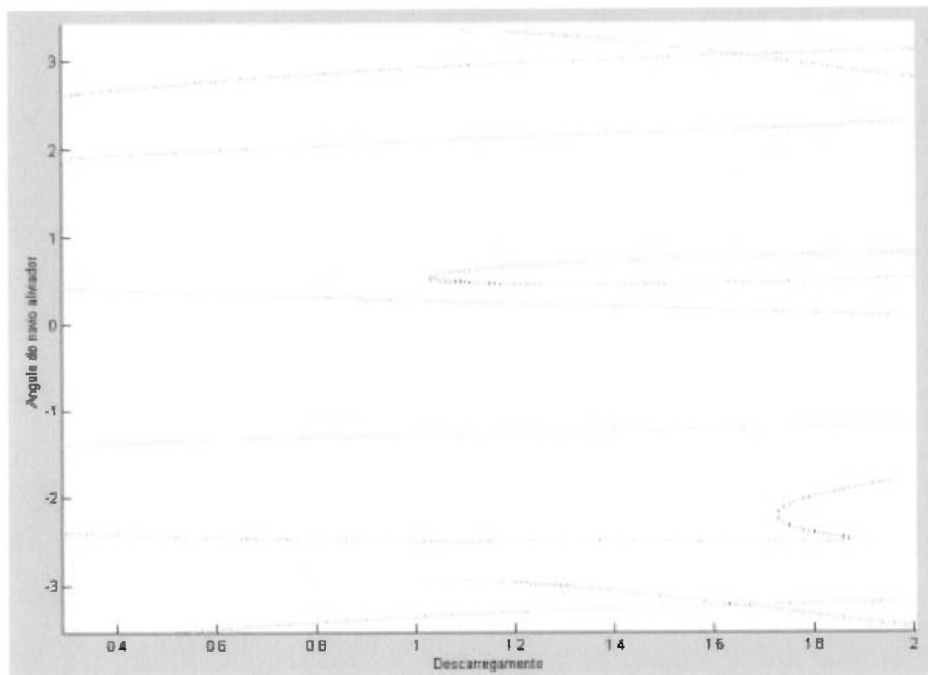
(T) dos navios. Supondo navios com alto coeficiente de bloco, pode-se fazer uma aproximação de uma variação linear do calado com a variação do deslocamento da embarcação. Portanto, consegue-se obter a relação da variação das forças de corrente com o deslocamento da embarcação. Já com respeito ao vento, assumindo que seus coeficientes não variem consideravelmente para um navio com alto coeficiente de bloco, o que implica em dizer que sua forma exposta ao vento não varie, conclui-se que a alteração da força é resultante apenas da variação de sua área projetada. E, por aproximação, pode-se adotar uma variação da área projetada tal que a variação respectiva de forças e momentos seja linear.

Com essas hipóteses, foram analisadas variações mínimas e máximas de deslocamento para os navios P43 (FPSO) e VLCC (navio aliviador) tomados como base para os estudos. Foram determinados os valores máximos e mínimos dos coeficientes de momentos para vento e corrente, possibilitando a construção de um mapa de bifurcação, o qual mostra a variação dos pontos de equilíbrio do sistema durante a operação de descarregamento. Para referência, foi adotada uma variação de deslocamento do navio FPSO de 100% carregado, até 40%, ao passo que para o navio aliviador, da condição vazia, para 100% carregada, para as mesmas condições ambientais mostradas anteriormente para o sistema Turret. Os mapas podem ser vistos na Figuras 4.34 e 4.35.

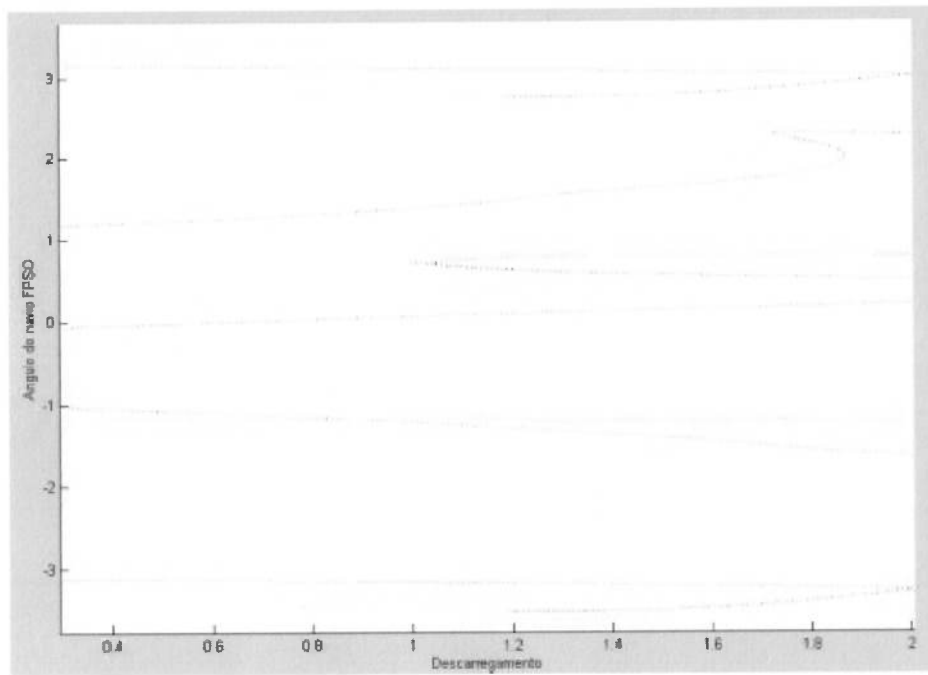
As escalas apresentadas nas abscissas dos mapas são apenas referências para o tempo de duração da operação de descarregamento. Pode-se observar que durante a metade do processo de descarregamento ocorre uma bifurcação

pela qual surge um novo ponto de equilíbrio estável. Em termos de engenharia tal comportamento não é desejável, visto que as embarcações podem mudar de posição, quando as condições de posição e velocidade das embarcações estiverem dentro da região de atração desse novo ponto de equilíbrio, durante a operação.

Com tal análise, pode-se, para determinada condição ambiental, projetar os navios (parâmetros que reflitam nos coeficientes de corrente e vento), os quais não possuam tal característica. Em suma, é desejável embarcações que durante qualquer operação não adquiram posições de equilíbrio novas, e com isso, não acarretem movimentações relativas durante a operações.



**Figura 4.34 - Mapas de bifurcação para o navio FPSO ( $\psi_v = \frac{\pi}{4}$  e  $\psi_c = \pi$ )**



**Figura 4.35 - Mapas de bifurcação para o navio aliviador ( $\psi_v = \frac{\pi}{4}$  e  $\psi_c = \pi$ )**

## 5. CONCLUSÕES

Como principal objetivo deste trabalho, colocou-se obtenção de um modelo matemático simplificado, dito arquetípico, que possibilitasse um estudo qualitativo mais aprofundado do sistema FPSO de exploração, mais precisamente durante a operação de descarga de petróleo, seja com sistema de amarração DICAS ou *Turret*.

Através de um estudo da variação de energia potencial do sistema completo, pode-se obter características peculiares deste, tal como a presença da dinâmica dita "interessante" apenas nos graus de aproamento dos navios. Tal conclusão serviu como ponto de partida para obtenção do modelo arquetípico, o qual contempla apenas os graus de liberdade relativos a aproamentos. A ausência dos graus de liberdade de deslocamento implica, de certa forma, a impossibilidade de identificação de, por exemplo, uma posição de equilíbrio do sistema dita "de risco", caracterizada pela proximidade dos dois navios. Todavia, uma vez tendo-se um conhecimento profundo da dinâmica relevante do sistema, através do modelo arquetípico, e de por exemplo, identificação de regiões de atração de certos pontos de equilíbrio, este pode ser verificado no modelo completo para simples identificação da possibilidade de colisão. Embora para certos pontos de equilíbrio, conhecendo os aproamentos pode-se, intuitivamente, ter uma noção das prováveis posições dos navios.

Através das comparações de resultados do modelo arquetípico com o modelo completo, assim como com resultados experimentais, pode-se observar uma boa correlação dos resultados. Vale a pena ressaltar que as comparações

com o modelo completo, deram-se não somente através de séries temporais, como também através de mapas de bifurcação, os quais apresentam características fundamentais do modelo. Dessa forma o modelo arquetípico como um todo apresentou boa correlação com o modelo completo, e por isso, foi considerado representativo para a dinâmica do sistema que pretende-se investigar.

Uma vez de posse do modelo arquetípico, varias análises foram feitas de maneira a obter um melhor entendimento do sistema. Uma ferramenta utilizada foi a construção de bacias de atração. Através delas foi possível observar o domínio de atração de diferentes pontos de equilíbrio, assim como, em certas situações, verificar uma divisão da região de atração entre dois diferentes pontos. Para o sistema com amarração DICAS, foi confirmada a presença de um segundo ponto de equilíbrio para determinada condição de vento e corrente, os quais dependendo da relação velocidade de vento e corrente, dividem diferentemente a região de atração.

Com relação ao sistema Turret de amarração observou-se uma maior complexidade. Um maior número de parâmetros influenciam a dinâmica de tal sistema, tais como, velocidade e aproamento de vento e corrente, como no sistema anterior, relação de deslocamento entre os navios e posição do Turret no navio FPSO. Para uma melhor compreensão deste sistema, assim como para o sistema DICAS, foram obtidos mapas de bifurcação tendo como parâmetro a relação de velocidades entre vento e corrente. Pôde-se concluir que bifurcações ocorrem também devido a oposição entre vento e corrente, assim como para o



sistema DICAS. Porém, os aproamentos do vento e corrente não precisam estar necessariamente opostos para a ocorrência de bifurcações, o que ocorre no sistema anterior. Principalmente quando o Turret está posicionado mais a meia-nau do navio FPSO, bifurcações ocorrem mesmo para uma diferença de  $\pi/2$  radianos entre os aproamentos. Outra característica observada foi a maior "sensibilidade numérica" do modelo, o qual apresenta pontos de equilíbrios distintos, com valores próximos numericamente um dos outros. Tal característica também pode ser observada no modelo completo.

Em termos de resultados, percebeu-se que para o sistema Turret, pontos de equilíbrio ditos secundários, os quais são resultados de bifurcações devido oposição de vento e corrente, se apresentam em um domínio maior nos mapas de bifurcação, assim como apresentam maior domínio de atração, notado nas bacias de atração. Tal característica se observa principalmente em relação ao navio FPSO, e com maior intensidade para o Turret mais próximo da meia nau do navio.

Uma característica considerada típica de tal sistema, a presença de uma bifurcação de Hopf quando da variação do posicionamento do Turret, também foi constatada no modelo arquetípico. Através de mapas de bifurcação tendo como parâmetro tal posicionamento, foi possível não somente identificar tal fenômeno, quando na ausência de vento e corrente a  $\pi$  radianos, como também a presença de bifurcações folds, quando da variação deste mesmo parâmetro na presença de vento com aproamento diferente da corrente. Tais mapas sem o auxílio do modelo arquetípico seriam difíceis de serem obtidos.

Outras investigações foram procuradas no sentido de analisar variações de características do sistema, e correspondente alteração no comportamento do sistema. A primeira característica analisada foi a influência do comprimento relativo dos navios sobre a dinâmica global. Dessa forma, para uma dada configuração de vento e corrente, foi obtido um mapa de bifurcação tendo como parâmetro o comprimento relativo dos navios. Observou-se que para comprimento do navio aliviador abaixo de 15% (para as condições simuladas) o sistema apresenta bifurcação, possuindo um segundo ponto de equilíbrio, o que pode significar grandes amplitudes de movimento caso o sistema "saltar" de um ponto de equilíbrio para outro, já que o domínio de atração é dividido entre dois atratores. Dessa forma percebe-se que pode-se projetar tal embarcação de maneira a evitar fenômenos indesejáveis do ponto de vista de engenharia.

Outro fenômeno observado nesse sistema foi a variação da dinâmica do sistema durante a operação de descarregamento (*offloading*). Mapas de bifurcação foram obtidos tendo como parâmetro o progresso da operação de descarga, sendo esta caracterizada pela diminuição de deslocamento do navio FPSO e respectivo aumento do navio aliviador. Novamente tais mapas foram obtidos para uma determinada condição de vento e corrente. Observou-se que durante a operação, ocorre uma bifurcação em termos de ponto de equilíbrio tanto para o navio aliviador como para o navio FPSO. Tal característica é indesejável em termos de engenharia, pois implica em uma divisão da região de atração entre dois pontos de equilíbrio, a qual era dominada apenas por um atrator quando do começo da operação. Isso significa que durante a operação,

por ação de variação de algum agente externo, o sistema pode mudar de atrator e gerar deslocamentos relativos dos navios durante regime transiente. Tais deslocamentos podem gerar tensões excessivas nas linhas de conexão entre os navios e prejudicar a operação. Tal evidência motiva o estudo de características ideais do sistema, de maneira a evitar tal fenômeno para uma dada condição ambiental pré-estabelecida em projeto. Vale ressaltar que sem um modelo arquetípico, tal constatação seria muito difícil em termos práticos, visto a complexidade do modelo completo.

De posse de um modelo arquetípico, vários diferentes estudos podem ser feitos sobre o mesmo sistema descrito. Neste trabalho apenas alguns casos ditos "interessantes" de condições ambientais foram investigados. Porém pode-se realizar um estudo sistemático, sobre condições típicas de vento e corrente em determinada região no decorrer de um tempo, e mapear todos os possíveis cenários envolvendo tais condições. Dessa forma, pode-se investigar alternativas de projeto do sistema que objetivem uma melhoria de comportamento.

No presente trabalho, apenas forças de corrente e vento foram levadas em consideração. Porém, forças na embarcação geradas através de ondas também têm grande influência sobre a dinâmica do sistema. Esforços de ondas caracterizam-se não somente por forças de deriva lenta (as quais possuem valor médio não nulo) como também forças oscilatórias, as quais dependendo da frequência podem gerar diferentes reações no sistema. Dessa forma, um aperfeiçoamento que pode ser feito no modelo arquetípico é a introdução de

forças de onda, e a verificação de como os diagramas de bifurcação, por exemplo, se alteram com tais forças. Com a introdução de forças de ondas, tem-se um cenário mais complexo, pois a influência em pontos de equilíbrio dá-se pela combinação de três fatores ambientais. Dessa forma os mapas de bifurcação tendo como parâmetro a relação de velocidade de vento e corrente ( $\sigma$ ) sofreriam alteração para cada condição de onda, e assim mapas de bifurcação em três dimensões podem ser construídos. Estudos feitos neste trabalho tais como a influência sobre a operação de descarregamento, bem como a influência de parâmetros das embarcações, tais como o comprimento do navio aliviador, poderiam ser elaborados e assim avaliar a influência apenas dos esforços de ondas sobre os resultados. Dessa forma, ter-se-ia uma avaliação de qual a influência dos esforços de ondas sobre a dinâmica do sistema completo.

## 6. APÊNDICE

### 6.1 Derivação das funções modulo de seno e coseno

Para desenvolvimento de uma função analítica para os poços potenciais do sistema em estudo, foi necessário obter analiticamente a integral das funções  $|\cos x|$  e  $|\sin x|$ . Porém tais integrais, ou mesmo derivadas dessas funções não foram encontradas em tabelas de funções matemáticas. Por isso foi necessário fazer o desenvolvimento de tal derivada (ou integral).

Sabe que a derivada da função  $\sin^2(x)$  é dada por :

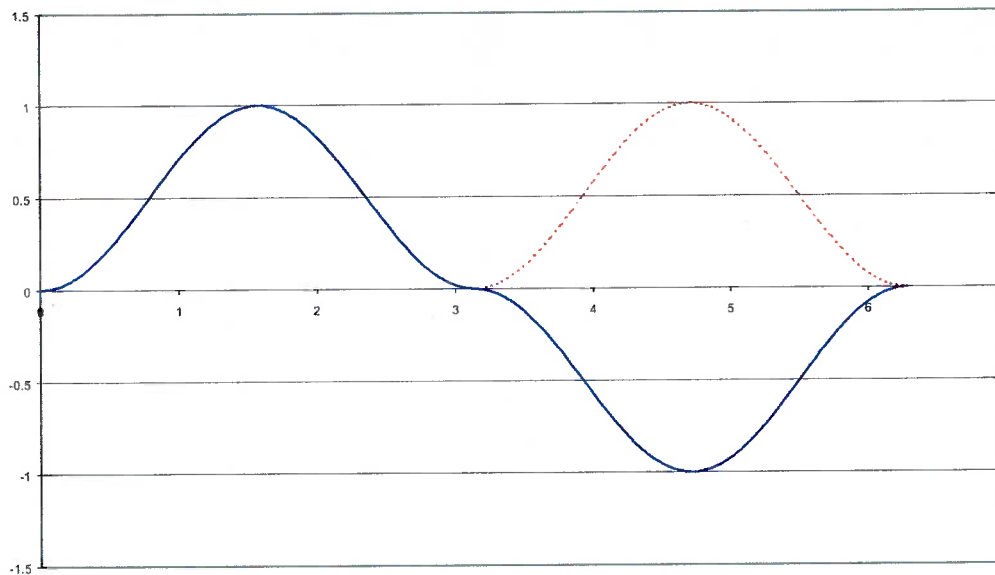
$$\frac{d \sin^2(x)}{dx} = 2.\cos(x).\sin(x) \quad 60$$

No entanto sabe-se também que a função  $\sin(x).|\sin(x)|$  tem mesmo valor numérico da função  $\sin^2(x)$  porém com o sinal da função igual ao sinal da função seno.

Com isso a derivada da função  $f(x) = \sin(x).|\sin(x)|$  deve ser numericamente igual a  $2.\cos(x).\sin(x)$  , porém com o sinal da função coseno. Tal conclusão pode ser tirada de, de maneira simples, analisando o gráfico das funções  $\sin^2(x)$  e  $\sin(x).|\sin(x)|$  (Figura 6.1). Analisando a tangente a cada ponto das duas funções, pode-se concluir que ambas possuem tangentes de

mesmo valor em modulo a cada ponto, porém, com sinais diferentes. Pode-se notar que as tangentes da função  $f(x) = \sin(x)|\sin(x)|$  acompanha o sinal do coseno: valor positivo para ângulos menores que  $\frac{\pi}{2}$  rad, valor negativo entre

$\frac{\pi}{2}$  e  $\frac{3\pi}{2}$  rad, e novamente positivo até  $2\pi$ .



**Figura 6.1 - Função  $\sin(x)|\sin(x)|$  (azul) e  $\sin^2(x)$  (vermelho)**

A partir do que foi dito acima pode-se concluir:

$$\frac{d \sin(x) \cdot |\sin(x)|}{dx} = 2 \cdot \cos(x) \cdot |\sin(x)|$$

61

Porém,

$$\frac{d \sin(x) \cdot |\sin(x)|}{dx} = \frac{d \sin(x)}{dx} \cdot |\sin(x)| + \sin(x) \cdot \frac{d|\sin(x)|}{dx} = 2 \cdot \cos(x) \cdot |\sin(x)| \quad 62$$

Assim isolando a parcela que contém a derivada da função modulo de seno obtém-se:

$$\frac{d|\sin(x)|}{dx} = \frac{2 \cdot \cos(x) \cdot |\sin(x)| - \frac{d \sin(x)}{dx} \cdot |\sin(x)|}{\sin(x)} \quad 63$$

E, por fim :

$$\frac{d|\sin(x)|}{dx} = \frac{\cos(x) \cdot |\sin(x)|}{\sin(x)} = \cot \text{ang}(x) \cdot |\sin(x)| = \cos(x) \cdot \text{sign}(\sin(x)) \quad 64$$

Através da equação 64 foi possível obter a integral de funções presentes no sistema, como por exemplo,  $|\sin x| \cdot \sin x$  ou  $|\sin x| \cdot \cos x$ , através de integração por partes.

Fazendo o mesmo desenvolvimento para a função  $\cos^2(x)$  obtém-se:

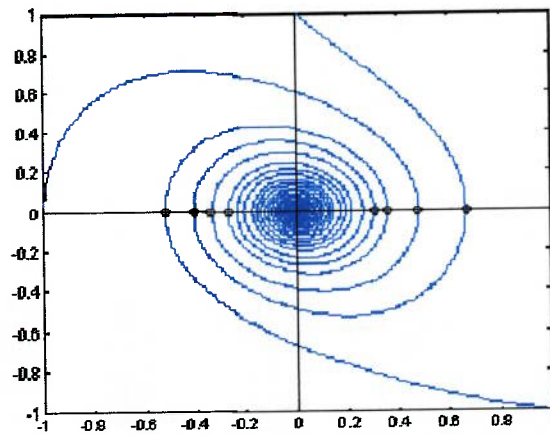
$$\frac{d|\cos(x)|}{dx} = -\frac{\sin(x) \cdot |\cos(x)|}{\cos(x)} = -\tan(x) \cdot |\cos(x)| = \sin(x) \cdot \text{sign}(\cos(x)) \quad 65$$

### 6.3 Algoritmo para construção de bacias de atração

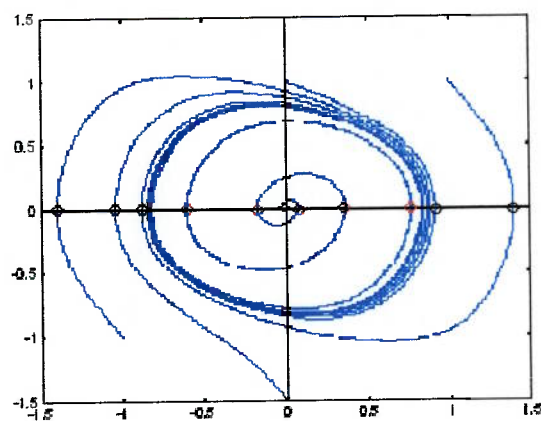
Para a identificação de bacias de atração deve-se utilizar um algoritmo eficiente e rápido, pois para determinação das regiões de atração é necessário simular o modelo, numericamente, para cada diferente condição do parâmetro analisado. No caso deste trabalho, por exemplo, deve-se simular o modelo para cada condição inicial de posição e velocidade. Assim, dependendo da resolução desejada para a bacia de atração, tal processo pode custar muito tempo de simulação.

O algoritmo elaborado neste trabalho baseia-se em convergência de series. Analisando o diagrama de fase de um sistema dinâmico pode-se fazer uma relação entre a característica de um determinado ponto de equilíbrio e a forma do diagrama de fase do sistema ao redor de tal ponto. A principal idéia do algoritmo pode ser melhor explicada através das Figuras 6.2 e 6.3. Tais figuras representam o diagrama de fase de um sistema dinâmico exemplificado no capítulo 2. A primeira figura representa um ponto de equilíbrio assintoticamente estável do sistema, enquanto a segunda um ciclo limite.





**Figura 6.2 - Ponto de equilíbrio estável**



**Figura 6.3 - Ciclo limite**

Com pequenos círculos, estão marcados os pontos de intersecção com a abscissa do diagrama de fase, ou seja, pontos da trajetória com velocidade zero. Pode-se observar na Figura 6.2, que os pontos de intersecção do lado positivo, assim como do lado negativo, representam um série convergente, com valor final  $(0,0)$ . O mesmo pode-se observar na Figura 6.3, porém os pontos

do lado negativo tendem a um valor determinado negativo ( aproximadamente  $-0.75$  no exemplo ), enquanto os pontos do lado positivo tendem a um valor positivo ( aproximadamente  $0.75$  ). Nota-se portanto, que através do reconhecimento da série dos pontos da trajetória de velocidade zero é possível identificar a origem deste. Se a série do lado positivo tende ao mesmo ponto da série do lado negativo, assim o ponto possui estabilidade assintótica. Caso a série do lado negativo convirja para um valor diferente da série do lado positivo, então o ponto central possui uma estabilidade orbital. Ou seja, pode ser um ciclo limite, ou um ponto de equilíbrio estável. Para diferenciar ambos, basta comparar a posição inicial (deslocamento inicial), com o valor de convergência da série. Se o valor de convergência coincidir com a posição inicial para uma dada precisão numérica, este se caracteriza por um ponto de equilíbrio, ou seja, uma órbita estável não isolada no espaço de estado. Caso contrário, o ponto se caracteriza por um ciclo limite, ou seja, um órbita fechada e isolada.

Dessa forma, em um mesmo algoritmo, pode-se identificar cada tipo de ponto de equilíbrio encontrado no sistema em estudo, bem como sua região de atração, apenas analisando o ponto de convergência de cada ponto de origem.

## 7. BIBLIOGRAFIA

AGHAMOHAMMADI, F.; THOMPSON, J. M. T. An experimental study of the large amplitude fish-tailing instabilities of a tanker at a single point mooring. Applied Ocean Research, Vol.12 No. 1, 1990.

ALLGOWER, E.L.; GEORG, K. **Numerical Continuation Methods:** An Introduction. Springer-Verlag, 1990.

BERNITAS, M. M. ; PAPOULIAS, F. A. Stability of single point mooring systems. Applied Ocean Research, 8(1), 49-58,1986.

BERNITAS, M. M.; GARZA-RIOS, L.O.; KIM, B. Mooring Design Base on Catastrophes of Slow Dynamics, Transactions of the SNAME, 1999.

CARR, J. **Applications of Center Manifold Theory, Applied Mathematical Sciences**, v35. Springer-Verlag, 1978/1979.

CLARKE, D.; GEDLING, P.; HINE, G. The application of manoeuvring criteria in hull design using linear theory. Proc. of the Royal Institute of Naval Arch., pp. 45-68, 1983.

FERNANDES, A.C. and SPHAIER, S. Dynamic Analysis of a FPSO System. In: The Proceedings of the Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. I. p:330-35, Honolulu, Hawaii.

GARZA-RIOS, L.O. and BERNITAS, M. M. Mathematical Model for the Slow Motion Dynamics of Turret Mooring Systems, Report to the University of Michigan, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Ann Arbor, Publication No. 336, 1998.

GUCKENHEIMER, JOHN; HOLMES, PHILIP. **Nonlinear oscillations, dynamical systems and bifurcations of vector fields.** Applied mathematical sciences, v. 42. Springer-Verlag, 1983.

HILBORN, R.C. **Chaos and Nonlinear Dynamics, An introduction for scientists and Engineers.** Oxford University Press, 1994.

LEITE, A.J.P., ARANHA, J.A.P., UMEDA, C., DE CONTI, M.B. Current Forces in Tankers and Bifurcation of Equilibrium of Turret System: Hydrodynamic Model and Experiments. In: Applied Ocean Research, 1998.

MORISHITA, H.M. e CORNET, B.J.J. Dynamics of a Turret-FPSO and shuttle vessel due to current. In: IFAC COFERENCE, Fukuoka. Control Applications in Marine Systems. Kyushu, p. 101-6, 1998.

MORISHITA, H. M.; SOUZA JÚNIOR, J. D. R. de; FERNANDES, C. G.  
Nonlinear dynamics of a FPSO and shuttle vessel in tandem configuration. In:  
International Offshore and Polar Engineering Conference, 11. Stavanger, 2001.  
Proceedings. Cupertino : International Society of Offshore and Polar Engineers,  
2001.v. 1, p. 336-342.

NAYFEH, A. H.; BALACHANDIAN, B. **Applied nonlinear dynamics:  
analytical, computational and experimental methods.** Wiley Series in  
Nonlinear Science, 1933.

NISHIMOTO, K., BRINATI, H.L. AND FUCATU, C.H. Analysis of the Point  
Moored Tanker using Manoeuvring Hydrodynamic Model. In: Proceeding of the  
14<sup>th</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering,  
Vol.1 Pt.B. p.253-61, Kopenhagen, 1995.

OBOKATA, J. On the basic design of single point mooring systems. J. of the  
Society of Naval Architects of Japan, vol.161, June 1987.

OCIMF. Predictions of Wind and Current Loads on VLCCs. Oil Companies. In:  
International Marine Forum, 1994.

PARKER, THOMAS; CHUA, LEON. **Practical numerical algorithms for chaotic systems**. Springer-Verlag, 1989.

SIMOS, A. N., TANNURI, E.A., PESCE, C.P. Dynamics of a Turret-FPSO System and Hydrodynamic Model. In: Proceeding of the 17<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference, Lisbon, 1998.

SIMOS, A. N., TANNURI, E.A., ARANHA, J.A.P. Theoretical Analysis and Experimental Evaluation of the Fishtailing Phenomenon in a Single-Point Moored Tanker. In: Proceeding of the 11<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference, Stavanger, Norway 2001.

SOUZA JÚNIOR, J. D. R. de; FERNANDES, C. G. Nonlinear dynamics an archetypal model of ships motions in Tandem. In: International Workshop on Dynamics and Control, 12. Los Angeles, 2002. Dynamics and control of complex systems in nature and society: abstracts. Califórnia : USC, 2002.p. 23.

SOUZA JÚNIOR, J. D. R. de; MORISHITA, H. M.; FERNANDES, C. G.; CORNET, B. J. J. Nonlinear dynamics and control of a shuttle tanker. In: International Conference on Nonlinear Dynamics, Chaos, Control and their Applications in Engineering Sciences,. Campos do Jordão, 2000. ICONNE'2000: proceedings.S. I. : ABCM, 2000.

SOUZA JÚNIOR, J. D. R. de, FERNANDES, C. G. Nonlinear Dynamics of an Archetypal Model of Ship Motions in Tandem In: XII International Workshop on Nonlinear Dynamics and Control, 2002, Los Angeles, California, EUA.

TAKASHIMA, J. Ship maneuvering motion due to tugs boats and its mathematical model. J. of the Society of Naval Architects of Japan, vol.160, Dec. 1986.

THOMPSON, J.M.T.; STEWART, H.B. **Nonlinear dynamics and chaos**. Wiley & Sons Ltd, 1986.