

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE MATEMÁTICA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATEMÁTICA APLICADA

**Análise de Regimes e Grafos como uma Técnica Integrada de
Raciocínio Qualitativo para Diagnóstico de Falhas**

por

JULIO CARLOS OLIJNYK

Dissertação submetida à avaliação, como requisito parcial para a
obtenção do grau de Mestre em Matemática Aplicada

Prof. Waldir Leite Roque

Orientador

Porto Alegre, dezembro de 1997.

Lista de Abreviaturas

IA	Inteligência Artificial
RQ	Raciocínio Qualitativo
QDE	Equação Diferencial Qualitativa
TAD	Teoria da Análise Dimensional
SAMR	Significado Absoluto das Magnitudes Relativas
PHD	Princípio da Homogeneidade Dimensional
SAC	Sistema de Ar Condicionado

Lista de Símbolos

[]	Operador qualitativo
\oplus	Adição qualitativa
\otimes	Multiplicação qualitativa
A	Função quantidade (amount)
D	Função derivada
Am	Magnitude da quantidade
As	Sinal da quantidade
Dm	Magnitude da derivada
Ds	Sinal da derivada
α_+ ou α_-	Operador de proporcionalidade qualitativa
I(x,y)	Operador diferencial qualitativo
QS	Estado Qualitativo
l_i	Landmark
M+,M-	Dependência funcional entre variáveis
ADD(f1,f2,f3)	Operador de adição
MULT(f1,f2,f3)	Operador de multiplicação
MINUS(f1,f2,f3)	Operador de subtração
DERIV(f1,f2)	Operador diferencial
MD	Matriz dimensional

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Estrutura de conhecimentos	15
Figura 2.1 - Vasos comunicantes	23
Figura 2.2 - Modelo dos vasos comunicantes na ontologia centrada em restrições	29
Figura 2.3 - Espaço de qualidade	32
Figura 4.1 - Regulador de pressão	58
Figura 5.1 - Esquema geral do sistema de ar condicionado central da Procergs	72
Figura 5.2 - Troca térmica no fan coil	76
Figura 5.3 - Troca térmica no evaporador	79
Figura 5.4 - Troca térmica no condensador	84
Figura 5.5 - Troca térmica na torre de arrefecimento	88
Figura 6.1 - Vértices equipados com alarmes	94
Figura 6.2 - Exemplo de um sistema grafo	96
Figura 6.3 - $G_R = (V_R, E_R)$	100
Figura 7.1 - Representação de um regime através de grafo	106
Figura 7.2 - Representação de um regime de acoplamento através de grafo	106
Figura 7.3 - Ensemble 1: Representação da troca térmica da água nos fan coils	107
Figura 7.4 - Ensemble 2: Representação da troca térmica da água no evaporador	107
Figura 7.5 - Ensemble 3: Representação da troca térmica do gás Freon 11 no evaporador	107
Figura 7.6 - Ensemble 4: Representação da troca térmica do gás Freon 11 no condensador	108
Figura 7.7 - Ensemble 5: Representação da troca térmica da água no condensador	108
Figura 7.8 - Ensemble 6: Representação da troca térmica da água na torre de arrefecimento	108
Figura 7.9 - Representação completa do sistema SAC através de grafo	109
Figura 7.10 - Representação do sistema SAC dotado de alarmes	110
Figura 7.11 - Conjunto V_R do SAC	111
Figura 7.12 - Conjunto V_R na hipótese 1	111
Figura 7.13 - Conjunto B_R na hipótese 1	112
Figura 7.14 - Conjunto V_R na hipótese 2	112
Figura 7.15 - Conjunto B_R na hipótese 2	112
Figura 7.16 - Conjunto V_R na hipótese 3	113
Figura 7.17 - Conjunto B_R na hipótese 3	113

Figura 7.18 - Conjunto V_R na hipótese 4	114
Figura 7.19 - Conjunto B_R na hipótese 4	114

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Adição Qualitativa	19
Tabela 2.2 - Multiplicação Qualitativa	19
Tabela 4.1 - Ensemble do cano com orifício	59
Tabela 4.2- Matriz dimensional do ensemble do cano com orifício	59
Tabela 4.3 - Matriz dimensional do ensemble do cano com orifício com expoentes incógnitas	60
Tabela 4.4- Matriz de coeficientes do sistema de equações 4.5	61
Tabela 4.5 - Ensemble da válvula de mola	63
Tabela 4.6 - Matriz dimensional do ensemble da válvula de mola	63
Tabela 5.1 - Matriz dimensional do ensemble do fan coil.....	77
Tabela 5.2 - Matriz dimensional do ensemble troca térmica no evaporador.....	80
Tabela 5.3 - Matriz dimensional do ensemble troca térmica no gás do evaporador	82
Tabela 5.4 - Matriz dimensional da troca térmica do gás no condensador.....	84
Tabela 5.5 - Matriz dimensional do ensemble da água no condensador	86
Tabela 5.6 - Matriz dimensional do ensemble da torre de arrefecimento	89

Resumo

O problema de diagnóstico de falhas em sistemas físicos tem sido abordado por diversas técnicas diferentes, tendo várias aplicações nas áreas de engenharia, ecologia, química, medicina entre outras.

O *Raciocínio Qualitativo*, sub-área da Inteligência Artificial, dispõe de uma técnica denominada *Análise de Regimes* que permite tratar de forma qualitativa o problema de diagnóstico. O principal mérito da *Análise de Regime* está na possibilidade de automatizar a construção dos relacionamentos qualitativos que as variáveis de um sistema podem estabelecer entre si. Uma vez definida a estrutura de relacionamentos, é possível inferir como uma falha se propaga no sistema.

Com a finalidade de otimizar o processo de raciocínio empregado na identificação da causa de uma falha, esta tese apresenta uma proposta de associação da *Análise de Regime* e a representação de sistemas através de grafos, para constituir uma técnica integrada de raciocínio qualitativo para diagnóstico de falhas.

Tendo em vista a especialização dos conceitos utilizados na proposta, se fez necessário apresentar primeiramente uma visão geral da área de *Raciocínio Qualitativo* e da sub-área de *Diagnóstico Baseada em Modelos* para, então, introduzir os conceitos de *Análise de Regimes*. Os conceitos de *regimes e derivadas qualitativas parciais* são utilizados e mostra-se que, através dos mesmos, é possível estabelecer o relacionamento qualitativo entre as variáveis de um processo.

Adicionalmente, é mostrada a representação dos relacionamentos através de grafos. Os relacionamentos obtidos na fase de análise de regime são então estruturados na forma de grafos e recebem o tratamento de algoritmos específicos que permitem identificar os componentes causadores de falhas no sistema modelado.

Abstract

The fault diagnosis problem has been approached by many different techniques and it is used in many knowledge areas, for example : engineering, ecology, chemistry, medicine and others.

Qualitative Reasoning (QR), subarea of Artificial Intelligence, has a special technique called Regimes Analysis that treats in a qualitative form the fault diagnosis problem.

The main accomplishment of Regimes Analysis is the possibility of automating the construction of the qualitative relationship among the variables of a system.

Once the structure of the relationship is established, it is possible to infer how a fault is propagated through the system.

This thesis presents a proposal of combination between Regimes Analysis and graph-based systems applied on the construction of an optimized qualitative reasoning for fault diagnosis, as an integrated technique.

Many specialized concepts are used in this proposal, so it is necessary to begin with a general view of qualitative reasoning area and sub-area of model-based diagnosis and finally introduce the Regimes Analysis concepts. Concepts of regimes and qualitative partial derivative are presented and it's shown that it's possible to established the qualitative relationship among the variables of a process.

Additionally, it is presented the representation of relationship using graph models. The relationships established during the Regimes Analysis phase are structured as graph, allowing the application of specific algorithms in order to identify the components that are generating the fault on the modeled system.

Sumário

LISTA DE ABREVIATURAS	2
LISTA DE SÍMBOLOS	3
LISTA DE FIGURAS.....	4
LISTA DE TABELAS.....	6
RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
SUMÁRIO	9
1. INTRODUÇÃO	11
2. UMA VISÃO GERAL SOBRE RACIOCÍNIO QUALITATIVO.....	16
2.1 SURGIMENTO DAS TÉCNICAS DE RACIOCÍNIO QUALITATIVO	16
2.2 ONTOLOGIAS	17
2.2.1 <i>Ontologia Centrada em Dispositivos</i>	18
2.2.2 <i>Ontologia Centrada em Processos</i>	22
2.2.3 <i>Ontologia Centrada em Restrições</i>	27
2.3 ÁLGEBRAS QUALITATIVAS	31
2.3.1 <i>Álgebra de Sinais</i>	32
2.3.2 <i>Álgebras de Ordem de Magnitude</i>	33
2.3.3 <i>Álgebra Dual</i>	34
2.4 MODELOS CAUSAIS	34
3. UMA VISÃO GERAL DO DIAGNÓSTICO BASEADO EM MODELO.....	36
3.1 ABORDAGENS ALTERNATIVAS AO DIAGNÓSTICO BASEADO EM MODELO.....	37
3.1.1 <i>Validação do Comportamento Normal</i>	37
3.1.2 <i>Dicionário de Falhas ou Modelo de Falhas Pré-Estabelecidas</i>	38
3.1.3 <i>Sistemas Baseados em Regras</i>	38
3.1.4 <i>Árvores de Decisão</i>	39
3.1.5 <i>Quando Não Usar Diagnóstico Baseado em Modelo</i>	39
3.2 DESCREVENDO ESTRUTURA E COMPORTAMENTO	40
3.3 AS QUESTÕES FUNDAMENTAIS DO DIAGNÓSTICO BASEADO EM MODELO.....	41
3.3.1 <i>Geração de Hipóteses</i>	42
3.3.2 <i>Testes de Hipóteses</i>	44
3.3.3 <i>Discriminação de Hipóteses</i>	45
3.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS	47
4. ANÁLISE DE REGIMES	48
4.1 UNIDADES DE MEDIDAS.....	48
4.2 PRINCÍPIO DO SIGNIFICADO ABSOLUTO DA MAGNITUDE RELATIVA	49
4.3 CONCEITO DE DIMENSÃO	50
4.4 ESCOLHA DAS QUANTIDADES DE REFERÊNCIA.....	51
4.5 PRINCÍPIO DA HOMOGENEIDADE DIMENSIONAL.....	52
4.6 TEOREMA PI DE BUCKINGHAM.....	53
4.7 O CONCEITO DE REGIMES	56
4.8 CÁLCULO DOS REGIMES	58
4.9 ANÁLISE QUALITATIVA DOS REGIMES	64
4.9.1 <i>Análise intra-regime</i>	64
4.9.2 <i>Análise inter-Regime</i>	66

4.9.3 <i>Análise Inter-Ensemble</i>	68
4.9.4 <i>Análise Qualitativa do Processo</i>	69
4.9.5 <i>Caráter Algorítmico da Análise de Regimes</i>	70
5. ANÁLISE DE REGIMES COMO FERRAMENTA DE RACIOCÍNIO QUALITATIVO	71
5.1 SISTEMA DE AR CONDICIONADO CENTRAL.....	71
5.1.1 <i>Circuito AG</i>	72
5.1.2 <i>Circuito AC</i>	73
5.2 MODELO QUALITATIVO.....	75
5.2.1 <i>Ensemble 1: Modelando a Troca Térmica da Água nos Fan Coils</i>	76
5.2.2 <i>Ensemble 2: Modelando a Troca Térmica da Água no Evaporador</i>	79
5.2.3 <i>Ensemble 3: Modelando a Troca Térmica do Gás Freon 11 no Evaporador</i>	81
5.2.4 <i>Ensemble 4: Modelando a Troca Térmica do Gás Freon 11 no Condensador</i>	83
5.2.5 <i>Ensemble 5: Modelando a Troca Térmica da Água no Condensador</i>	86
5.2.6 <i>Ensemble 6: Modelando a Troca Térmica da Água na Torre de Arrefecimento</i>	88
5.2.7 <i>Regimes de Acoplamento</i>	90
5.2.8 <i>Automatização dos Cálculos de Regimes</i>	92
6. DIAGNÓSTICO ATRAVÉS DE GRAFOS	93
6.1 MODELO DE GRAFO NO DIAGNÓSTICO DE FALHA	94
6.2 CLASSIFICAÇÃO DO PROBLEMA DE DIAGNÓSTICO.....	95
6.3 ELEMENTOS DO GRAFO DE PROPAGAÇÃO DE FALHAS.....	95
6.4 DIAGNÓSTICO DOS SISTEMAS DE FALHA ÚNICA	97
6.5 SISTEMAS DE TEMPO ZERO	97
6.6 ALGORITMO BACKWARD PARA TEMPO ZERO.....	101
6.7 SISTEMAS COM TEMPO DE PROPAGAÇÃO DIFERENTE DE ZERO	102
6.7.1 <i>Tempo de Propagação Desconhecido</i>	102
6.7.2 <i>Tempo de Propagação Conhecido</i>	103
7. DIAGNÓSTICO ATRAVÉS DA ANÁLISE DE REGIME E GRAFOS	105
7.1 APLICANDO A REPRESENTAÇÃO DE GRAFOS AO SISTEMA DE AR CONDICIONADO	107
8. CONCLUSÃO	116
APÊNDICE I	118
APÊNDICE II	121
BIBLIOGRAFIA	125

1. Introdução

A representação de processos do mundo físico através de modelos abstratos, geralmente leva a modelos de equações bastante definidas e que se prestam para um tratamento computacional sob a forma de algoritmos.

Embora os maiores usuários de tais modelos sejam cientistas e engenheiros, depara-se com uma situação curiosa quando é observada a forma como estes profissionais inferem conclusões a respeito da dinâmica dos processos físicos quando não dispõem diretamente das equações destes modelos.

Está sendo referido aqui, o fato de que sendo um engenheiro inquirido sobre o comportamento de determinado processo físico (artificial ou natural), o mesmo não elabora e tenta resolver um conjunto de equações para obter as conclusões preliminares sobre o assunto. Na verdade, ele irá se utilizar de um conjunto de conhecimentos gerais e de sua capacidade de integrá-los para derivar algumas conclusões preliminares sobre o processo. Em um segundo momento, a fim de obter conclusões quantitativamente mais precisas, então o engenheiro poderá utilizar-se de modelos matemáticos formais.

A utilização dos computadores como ferramentas de apoio para análise e resolução de problemas bem definidos, ou que possam estar formalmente descritos sob a forma de algum algoritmo, é bastante conhecida. Por outro lado, o potencial destas máquinas estimula a comunidade científica a tentar extrair das mesmas capacidades que extrapolem o uso tradicional. Em particular, a idéia de desenvolver sistemas que sejam capazes de exercitar alguma espécie de raciocínio sobre os problemas do mundo físico estimulou o surgimento de um ramo da Inteligência Artificial denominado inicialmente de “Qualitative Physics” e posteriormente batizado de “Qualitative Reasoning” ou *Raciocínio Qualitativo* (RQ).

O raciocínio humano é capaz de trabalhar integrando informações incompletas ou pobremente definidas. Assim sendo, a idéia central que estimulou o surgimento do RQ baseava-se na busca de um sistema que fosse capaz de raciocinar sobre o mundo físico da mesma maneira que os cientistas e engenheiros o fazem em suas abordagens de ordem mais geral.

Embora ainda não se tenha alcançado a plenitude de tal objetivo, várias técnicas foram desenvolvidas para atuar em diversas áreas.

Segundo [WER 94], a disciplina *Raciocínio Qualitativo* (RQ) trata de duas questões básicas:

- Identificação da estrutura de um sistema;
- Derivação do comportamento dinâmico destes sistemas, ou seja, com a explicação do funcionamento do sistema.

Existem determinadas situações onde é suficiente a elaboração de um raciocínio de natureza qualitativa e não necessariamente quantitativa. Mesmo que o processo exija resultados quantitativos, inicialmente podemos nos dedicar a obter conclusões de natureza qualitativa para que a partir destes indicadores qualitativos possamos direcionar quais os tipos de técnicas quantitativas deveremos explorar.

Outro cenário, onde é constatada uma demanda de *Raciocínio Qualitativo*, é aquele onde não existem condições para descrever o processo de maneira formal, como por exemplo através de equações diferenciais, pois faltam dados sobre o problema ou a complexidade exigida tornam a tarefa demasiadamente árdua.

Para exemplificar tais situações podem ser citadas aplicações na área industrial onde é suficiente determinar a tendência do comportamento de variáveis físicas como a pressão ou temperatura para a tomada de decisão do tipo: se a temperatura aumentar então a pressão, perigosamente, também aumentará, indicando a necessidade de liberação de um maior fluxo de um líquido de refrigeração para atenuar a temperatura.

Um caso representativo da situação onde faltam dados para a descrição formal do processo através de equações diferenciais está na área ecológica, onde muitas vezes é possível ter acesso apenas a um conjunto de comportamento exteriores do ecossistema e o conhecimento dos cientistas baseia-se em fundamentos empíricos. Em [GUE 95a] é visto um exemplo aplicado ao estudo das condições para a proliferação de algas no rio Guaíba em Porto Alegre, RS - Brasil.

O RQ não é uma técnica que se opõem à análise quantitativa, na verdade, ela pode ser vista como uma camada mais geral, que pode servir para direcionar o uso de técnicas quantitativas.

Uma explicação do comportamento de um sistema do ponto de vista de RQ é uma sequência ordenada no tempo de eventos bem definidos, a partir da qual fique claro porque e como os eventos ocorrem.

O RQ, assim como outras sub-áreas da inteligência artificial, é uma abordagem interdisciplinar, pois vale-se de ferramentas diversas que permitem a inferência sobre os estados qualitativos de um sistema.

Existem muitas áreas onde as técnicas de RQ já possuem aplicações estabelecidas. Em [TRA 95] estão descritos 40 projetos nas áreas de controle de processo, engenharia, ecologia, circuitos eletrônicos, negócios e medicina.

A seguir estão citados alguns destes projetos:

- Monitoramento de plantas químicas e redes de energia elétrica (Sistema ARTIST);
- Projeto de suprimento de ar para projetos espaciais (Sistema SQUALE);
- Simulação do comportamento de motores elétricos antes de sua construção;
- Tutorial para ensino de biologia para o primeiro grau;
- Análise do efeito de agentes potencialmente mutantes e mudanças no meio ambiente sobre plantas;
- Diagnóstico de circuitos eletrônicos;
- Modelo de apoio ao planejamento, controle e fluxo de caixa;
- Interpretação de eletrocardiogramas (Sistema KARDIO);
- Controle de tráfego urbano.

Conforme visto nos exemplos, existem muitas áreas de atuação do RQ, sendo uma delas o diagnóstico de falhas.

A área de diagnóstico de falhas dentro do RQ está baseada em uma abordagem chamada de Diagnóstico Baseado em Modelo (Model-Based Diagnosis).

O Diagnóstico Baseado em Modelo está centrado no conceito de que a identificação de uma falha pode ser feita a partir do conhecimento da estrutura interna do sistema e do comportamento em condições normais de seus componentes.

A identificação da existência da falha e de sua localização é possível, por este enfoque, a partir da comparação do estado observado com aquele conhecido como sendo o esperado (correto), dispensando portanto a existência de uma biblioteca a priori ou regras que definam o mal funcionamento do sistema, como por exemplo fazem os sistemas especialistas baseados em regras.

O funcionamento dos programas de diagnóstico baseados em modelo pode ser descrito de forma sucinta a partir dos seguintes passos:

- Geração de um conjunto de possíveis diagnósticos a partir do conhecimento do modelo que descreve o dispositivo ;
- Teste do conjunto de possíveis diagnósticos contra os sintomas observados;
- Discriminação entre os diagnósticos testados daqueles que coerentemente descrevem a situação de falha.

Várias propostas já foram implementadas utilizando-se dos conceitos de Diagnóstico Baseado em Modelo. Em [RAN 92] encontram-se alguns exemplos na seguinte lista:

- | | |
|----------|---|
| INTER | - Sistema para identificação de falhas em circuitos eletrônicos; |
| ABEL | - Sistema de auxílio a diagnóstico médico; |
| SOPHIE | - Sistema tutorial de apoio ao ensino especializado; |
| LOCALIZE | - Sistema de apoio para identificação de lesões nervosas periféricas; |
| LES/LOX | - Sistema para detecção de falhas no carregamento de oxigênio em lançamentos espaciais; |
| GDE | - Sistema de diagnóstico de falhas múltiplas em circuitos eletrônicos. |

Dentre as várias implementações de sistemas de RQ, existe uma proposta apresentada em [ROQ 91] para utilização de conceitos de uma técnica denominada de análise de regimes.

A análise de regimes é uma abordagem que se baseia no fato de que dado um conjunto de variáveis que representem grandezas físicas de um fenômeno é possível identificar um conjunto de funcionais adimensionais, chamados de regimes, que são originados das combinações destas variáveis, de acordo com um certo princípio que será visto adiante.

A grande peculiaridade reside na idéia de que as combinações das variáveis que geram os regimes não são combinações quaisquer e sim combinações que guardam entre si uma relação direta com a lei física que rege o processo, caso esta exista.

Importante observar que após os regimes serem obtidos, necessariamente não estará identificada uma expressão explícita da lei física, porém estará evidenciada, numa primeira abordagem, de que forma as variáveis físicas se relacionam entre si.

Uma vez obtido o relacionamento entre as variáveis do processo pode ser construído um raciocínio que permite explicar a relação de causa-efeito entre as variáveis. Então, é justamente a possibilidade de estabelecer o relacionamento entre as variáveis que permite que a técnica da análise de regimes seja usada como uma ferramenta no diagnóstico de falhas.

Por outro lado, até o momento os poucos trabalhos que existem nesta área não fazem menção sobre alguma estrutura formal que possa ser utilizada para dar suporte computacional estruturado a aplicação da análise de regimes enquanto técnica de diagnóstico. Ou seja, após obter os regimes que caracterizam o problema, de que forma poderíamos expressar através de algoritmos o problema de diagnóstico ?

Neste sentido, o presente trabalho vem propor a utilização de algoritmos específicos de diagnóstico de falhas baseados em grafos, apresentado originalmente por [RAO 93], como uma camada complementar à análise de regime para obtenção de uma ferramenta completa de diagnóstico de falhas ou influências entre as variáveis de um processo.

Em resumo, propõe-se explorar a junção de duas técnicas independentes para a construção de um método de diagnóstico.

De forma esquemática serão utilizadas as seguintes camadas de conhecimento:

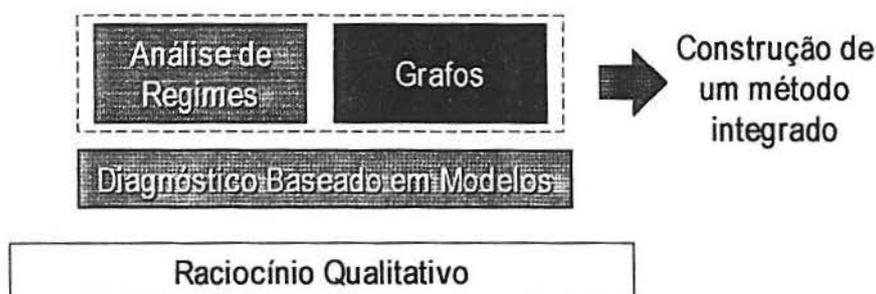


Figura 1.1 - Estrutura de conhecimentos

2. Uma Visão Geral sobre Raciocínio Qualitativo

2.1 Surgimento das Técnicas de Raciocínio Qualitativo

Quando é oferecido a um engenheiro um modelo que contem os princípios básicos que descrevem um dado fenômeno, ele passa a construir uma espécie de raciocínio de senso comum que lhe permite tirar conclusões de caráter qualitativo sobre o processo estudado.

A idéia de explorar este senso comum inerente aos engenheiros e cientistas quando os mesmos fazem avaliações de caráter qualitativo dos fenômenos, entusiasmou a comunidade de IA para a construção de técnicas que tentassem simular esta habilidade.

Em 1977, surgiu o que se chamava de *Naive Physics*, que se propunha a construir um modelo do mundo que capturasse o senso comum adotado pelos humanos. Também neste ano surgia o projeto *Artificial Engineer* no MIT, cujo propósito era criar um modelo que fosse coerente com o senso comum adotado por engenheiros e especialistas quando estes tratam de problemas de suas áreas.

De forma mais objetiva, a necessidade de tratar qualitativamente alguns problemas está baseada na constatação de que em muitas situações não estão disponíveis os dados quantitativos desejados para a construção de modelos numéricos, ou mesmo os referidos modelos numéricos são de complexidade exagerada para uma abordagem mais pragmática.

Em tais situações, ou mesmo em outras de menor complexidade são muitas vezes aceitáveis conclusões de caráter qualitativo mais geral.

Embora a discussão tenha se fixado em exemplos de sistemas físicos, é importante observar que outras áreas como o gerenciamento de negócios e organizações também apresentam necessidades que se enquadram nas aplicações de *Raciocínio Qualitativo*.

Em geral, as tarefas de tomada de decisão nas organizações são complexas e muito peculiares a cada situação vivida, exigindo uma combinação de conhecimentos e habilidades que envolvem dados quantitativos e qualitativos. Porém, a tarefa de decisão em si, não é uma consequência direta somente da análise dos dados disponíveis, até porque os mesmos, muitas vezes, estão incompletos ou imprecisos. As decisões, às vezes, são feitas a partir de uma “intuição dos especialistas”.

Esta intuição é um agregado de conhecimentos de difícil representação, que em geral é expressa em termos qualitativos e quantitativos simultaneamente.

Para tratar os problemas de engenharia ou de negócios mencionados acima, tem-se a necessidade de elaborar um sistema que possa processar os dados em um nível elevado de abstração e que deve fornecer um resultado semelhante aquele fornecido pelos especialistas no que se refere as suas características qualitativas e suas relações de causa-efeito. Além disso, o sistema deve ser capaz de trabalhar com um formalismo que expresse aspectos qualitativos e quantitativos, ou seja, combine um formalismo simbólico-numérico.

Tal método deve ser capaz de detectar as tendências de determinados processos, como também deve ser capaz de explicar como o sistema obteve determinados resultados.

A teoria inicial da *Naive Physics* recebeu várias contribuições e ao longo do tempo assumiu uma maior abrangência, a fim de atender as características mencionadas anteriormente, tornando-se o que hoje é conhecido por *Qualitative Reasoning* ou *Raciocínio Qualitativo (RQ)*.

2.2 Ontologias

Conforme Werthner em [WER 94], as diversas abordagens de RQ podem englobar três vertentes básicas de pensamento que são denominadas de ontologias.

As três ontologias fundamentais são :

- *Ontologia centrada em dispositivos (device-centered) ;*
- *Ontologia centrada em processos (process-centered);*
- *Ontologia centrada em restrições (constraint-centered).*

Estas ontologias são descritas sucintamente a seguir, a partir da visão apresentada por Werthner em [WER 94] e Travé-Massuyès em [TRA 95a].

Cabe observar que serão encontrados vários conceitos cujas denominações no original em inglês são muito semelhantes ao conceito em português (ex: process - processo, histories - histórias, objects - objetos) e que neste caso, após apresentá-las, serão referenciadas em português a partir de então. No entanto, existem outras que apesar de ser possível identificar a tradução com precisão no contexto (view - visão, landmark - marco), serão referenciadas no original após sua apresentação, a fim de facilitar futuras referências bibliográficas ou utilizações de softwares específicos.

2.2.1 Ontologia Centrada em Dispositivos

A ontologia centrada em dispositivo é uma abordagem de De Kleer e Brown [DEK 84] que descreve os dispositivos físicos através de componentes individuais e conduítes que interligam estes componentes.

Uma característica importante é o encapsulamento dos componentes, ou seja, dois componentes interligados formam um componente maior e assim sucessivamente.

Através dos conduítes e dos dispositivos físicos fluem a eletricidade, líquido, gases, força ou qualquer outra forma de elemento que esteja sendo processado.

O comportamento do sistema é descrito através de atributos destes elementos, como por exemplo, pressão e temperatura para gases ou líquidos, corrente e potência elétrica para a eletricidade.

Os componentes e conduítes tem associados um conjunto de equações lineares compostas de variáveis qualitativas e *derivadas qualitativas* destas variáveis.

As equações tem por objetivo descrever o comportamento do sistema na medida que modelam os componentes, as suas interconexões e o material que flui entre os componentes.

De Kleer e Brown denominaram de *confluências (confluences)* estas equações lineares multivariáveis cujos parâmetros assumem valores qualitativos no intervalo discreto $\{-, 0, +\}$.

O conjunto total das *confluências* descreve os aspectos estáticos e dinâmicos do sistema e está baseada nas leis físicas do processo.

A idéia desta abordagem é permitir, a partir da descrição dos componentes e do conjunto de equações qualitativas que descrevem o processo, obter uma visão que contenha todos os possíveis estados futuros do sistema, bem como a transição entre estes estados. Este resultado é chamado de *explicação causal* do comportamento do sistema.

Importante observar que as equações qualitativas baseiam-se no conhecimento das leis físicas que regem o processo, ou seja, a tarefa de modelar o problema pressupõe o conhecimento das leis físicas.

As equações qualitativas obedecem o seguinte mapeamento :

Os números reais são mapeados para os valores qualitativos utilizando-se o operador $[\]$.

Assim, $[x]$ representa o valor qualitativo da variável x no intervalo discreto $\{-, 0, +\}$.

Logo, o operador $[x]$ pode ser definido através de:

$$[\]: R^+ \longrightarrow +, R^- \longrightarrow - \text{ e } \{0\} \longrightarrow 0$$

A derivada qualitativa é representada por ∂x .

∂x é a representação qualitativa de $\frac{\partial x}{\partial t}$, podendo assumir um dos valores $\{-, 0, +\}$, conforme esteja indicando um incremento, decremento ou um estado estável (sem mudanças).

As operações de adição qualitativa (\oplus) e multiplicação qualitativa (\otimes) são resumidas nos quadros abaixo. Existem situações onde a operação \oplus não é definida. Estes casos são entendidos a partir da observação que o sinal “+” representa o intervalo $(0, \infty)$ e o sinal “-” representa o intervalo $(-\infty, 0)$, portanto não havendo resultado determinado para estas situações.

Tabela 2.1 - Adição Qualitativa

\oplus	+	-	0
+	+	?	+
-	?	-	-
0	+	-	0

Tabela 2.2 - Multiplicação Qualitativa

\otimes	+	-	0
+	+	-	0
-	-	+	0
0	0	0	0

A fim de verificar uma aplicação em um nível maior de detalhes, será analisado o seguinte exemplo:

Suponha que se deseja descrever um sistema composto por um regulador de pressão. Um regulador de pressão é um dispositivo em cujo interior passa um fluxo de líquido e seu principal objetivo é manter a pressão constante em sua saída, independente da pressão de entrada.

Como salientado anteriormente, em primeiro lugar, nesta ontologia, é preciso identificar as leis físicas que descrevem o comportamento do sistema. A lei física que se aplica neste caso é a lei que descreve o fluxo através de um orifício, ou seja:

$$q = \gamma k \left(\frac{2p}{\rho} \right)^{1/2}$$

onde q = fluxo na válvula;
 k = área do orifício por onde passa o fluxo;
 p = pressão do líquido;
 γ = coeficiente de descarga;
 ρ = densidade do líquido.

Agora, a lei será descrita em termos qualitativos. Para realizar esta tarefa serão consideradas as seguintes regras:

$$[a \times b] \rightarrow [a] \otimes [b]$$

$$0 \oplus [a] \rightarrow [a]$$

$$0 \otimes [a] \rightarrow 0$$

$$[+] \otimes [a] \rightarrow [a]$$

$$[-] \otimes [a] \rightarrow [-a]$$

Aplicando estas regras a lei física, tem-se o seguinte resultado qualitativo:

$$[q] \equiv [\gamma] \otimes [k] \otimes \left[\left(\frac{2p}{\rho} \right)^{1/2} \right] \equiv [+] \otimes [+] \otimes \left[\left(\frac{2p}{\rho} \right)^{1/2} \right] \equiv [p]$$

(Neste caso k foi substituído por “+”, pois a área do orifício será sempre positiva no exemplo).

Para que sejam obtidas as condições nas derivadas, a equação original é diferenciada:

$$\frac{dq}{dt} = \gamma \left(\frac{2p}{\rho} \right)^{1/2} \frac{dk}{dt} + \gamma \frac{k}{\rho} \left(\frac{\rho}{2p} \right)^{1/2} \frac{dp}{dt}$$

Transformando em termos qualitativos, tem-se:

$$\partial q \equiv \left([+] \otimes \left[\left(\frac{2p}{\rho} \right)^{1/2} \right] \otimes \partial k \right) \oplus \left([+] \otimes [k] \otimes \left[\left(\frac{\rho}{2p} \right)^{1/2} \right] \otimes \partial p \right)$$

$$\partial q \equiv ([p] \otimes \partial k) \oplus ([k] \otimes [p] \otimes \partial p)$$

com $k > 0$ e $p > 0$ temos $\partial q \equiv \partial k \oplus \partial p$

Assim são obtidas até agora as *confluências* do sistema da seguinte forma:

$$\partial q \equiv \partial k \oplus \partial p$$

$$[q] \equiv [p]$$

As equações acima foram montadas para que se tenha uma idéia geral da aplicação da ontologia em um caso prático. A continuação do exemplo implicaria na montagem das equações físicas que descrevessem cada dispositivo físico componente do sistema, por exemplo válvula, mola, sensor. Após, as equações deveriam ser transformadas qualitativamente, da mesma forma que foi feito com a equação geral do sistema .

Estas equações são baseadas em dois princípios básicos:

1. Os condútes conservam o elemento que flui através dos mesmos. Pode ser interpretada como uma contrapartida qualitativa da lei das correntes de Kirchhof .

2. Considerando que os dispositivos físicos, ao contrário dos conduítes, podem armazenar os elementos, então os ganhos e perdas destes elementos em um circuito fechado devem ser zerados. Como exemplo, podemos tomar a diferença de pressão ou potencial elétrico. Este princípio lembra a lei das Voltagens de Kirchhoff.

Após obter a lei física do processo de forma qualitativa (lei do fluxo em um orifício) e o conjunto de leis descrevendo os componentes do regulador, pode ser derivado o comportamento do sistema, pois a partir de algumas variáveis (variáveis de entrada), o comportamento de todas as variáveis de estado é obtido pelo relacionamento estabelecido pelo conjunto de equações qualitativas.

2.2.2 Ontologia Centrada em Processos

Esta abordagem foi apresentada por Forbus em 1984 [FOR 84] e seus conceitos principais são *processos (processes)* e *objetos (objects)*.

A proposta é identificar todos os *processos* que são responsáveis pela dinâmica dos elementos físicos do sistema, como por exemplo, fluxo dos fluidos, transferência de calor, etc.

Os *objetos* são as representações dos componentes físicos do sistema, como válvulas, bombas, motores, trocadores de calor e outros.

Os *processos* podem mudar o estado dos *objetos* e a relação entre os *objetos* é descrita através de variáveis. Os *processos* são as únicas primitivas que podem mudar o estado das variáveis.

As variáveis são descritas através da propriedade *Amount (quantidade - A)* e a *Derivative (derivada -D)*.

Cada um destes elementos (*A* e *D*) possui associado um *sinal (s)* e uma *magnitude (m)*.

As funções *A* e *D* fazem o mapeamento das variáveis em números.

Am - Magnitude da quantidade;

As - Sinal da quantidade;

Dm - Magnitude da derivada;

Ds - Sinal da derivada.

Em comparação com a abordagem centrada em dispositivos, esta abordagem acrescenta, além da análise de sinais, informações relativas à *magnitude* das variáveis.

Uma *view* descreve o relacionamento entre os *objetos* e as variáveis qualitativas que descrevem estes *objetos*, ou seja, descreve o estado dos objetos.

Um exemplo de *view* é o seguinte: a descrição da situação de um material qualquer em uma embalagem, que é o caso mais genérico de um líquido envasado como no exemplo em estudo.

View:

Material-Embalado(p)

Objetos

Esta seção descreve os objetos manipulados pela *view*.

emb embalagem

sub substância

Pré-condições

Esta seção descreve as condições físicas que devem existir para que a *view* seja válida.

Substância-Embalada (emb,sub)

Condição de Quantificação

As condições descritas por esta seção podem ser mudadas dinamicamente pelo processo. Ela contém relações entre as variáveis do processo.

Lembrando que A (amount) é a função que mapeia quantidade das variáveis.

$$A(\text{quantidade-de-em}(\text{sub,emb})) > 0$$

Relações

Esta seção descreve as relações que são impostas entre as variáveis dos *objetos* que participam da *view*.

Existe um $p \in$ pedaço-de-material

$$\text{quantidade-de}(p) = \text{quantidade-de-em}(\text{sub,emb})$$

feito-de(p)=sub

localização(p)=dentro-de(sub)

A *view* se tornará ativa quando as *pré-condições* e as *condições de quantidade* forem válidas.

Como é possível observar, o conceito de *view* é mais complexo do que a combinação de valores atribuídos às variáveis, sendo que seus componentes podem ser identificados como sendo:

- *Objetos* e outras *views* que a compõem. O conjunto de *objetos* e *views* componentes são chamados de *indivíduos*;
- *Pré-condições* para a existência da *view*;
- *Condições* para as *quantidades*;
- *Relações funcionais* entre as *quantidades*. Estas relações existem quando as *condições de quantidades* e as *pré-condições* da *view* são atendidas.

Uma vez montadas as *views* necessárias é possível definir o *processo* que descreverá o sistema em estudo. No exemplo presente, o fluxo de líquido de um vaso para outro existirá enquanto houver uma diferença de pressão entre os vasos. No momento que tal diferença desaparecer, o processo termina.

Um processo sempre inicia em um estado do sistema e termina por criar ou induzir a outro estado.

É importante observar que o processo é o único capaz de efetuar uma mudança no relacionamento existente entre os *objetos* e as variáveis.

O processo assemelha-se a uma *view*, no entanto possui como elemento extra a seção que descreve as influências exercidas por algumas variáveis sobre outras.

A influência entre variáveis no processo é descrita, fazendo uso de dois operadores, a saber:

- α_+ ou α_- que descreve a proporcionalidade qualitativa entre duas variáveis, ou seja, $x \alpha_+ y$ significa que x é qualitativamente proporcional a y . Pode ser visto como sendo a influência indireta de y sobre x .

- $I(x,y)$ que descreve a influência de y em x , ou seja, pode ser interpretado como um operador diferencial, onde $y = \frac{dx}{dt}$.

Através dos operadores α e I o *processo* altera os valores das variáveis, conseguindo com isto mudar o relacionamento existente entre os *objetos*.

O *processo* do exemplo poderia ser assim descrito:

Processo

Fluxo-do-Fluido (fonte,destino,caminho)

Objetos

Esta seção descreve os objetos manipulados pelo processo.

fonte	substância
destino	substância
caminho	caminho-do-fluido

Pré-condições

Esta seção descreve as condições físicas que devem existir para que o processo seja válido.

Fluido-Conectado(fonte,destino,caminho)

Caminho-Livre(caminho)

A condição acima verifica se o caminho entre os vasos estará livre (desobstruído), ou seja, se não haverá uma válvula ou se houver, ela deverá estar aberta.

Condição de Quantificação

As views mencionadas abaixo (Líquido-embalado) são particularizações da view Material-embalado descrita anteriormente.

Líquido-embalado(fonte)

Líquido-embalado(destino)

$Am[\text{pressão}(\text{fonte})] > Am[\text{pressão}(\text{destino})]$

Relações

Esta seção descreve as relações que são impostas entre as variáveis dos objetos que participam do processo.

taxa-do-fluxo $\alpha + (Am[\text{pressão}(\text{fonte})] - Am[\text{pressão}(\text{destino})])$

Influências

Esta seção introduz o conceito de causalidade, ou seja, em que direção a propagação de efeitos ocorre no processo, alterando os sinais das variáveis. Através do operador I, o processo altera o valor de algumas variáveis, alterando portanto a situação.

$I + (\text{quantidade-de}(\text{destino}), \text{Am}[\text{taxa-de-fluxo}])$

$I - (\text{quantidade-de}(\text{fonte}), \text{Am}[\text{taxa-de-fluxo}])$

A *história* serve para registrar as mudanças que ocorrem no sistema, inclusive as mudanças nos *objetos*.

Assim o raciocínio exercido através desta ontologia pode ser sintetizado da seguinte forma:

1. Criação das *views* que retratam os *objetos* e seus *relacionamentos*, das *condições de quantidade* que estabelecem as relações entre *views* e finalmente os *processos*.

2. Resolver as influências entre variáveis através dos operadores α e I, atribuindo desta maneira valores para as *derivadas qualitativas* D.

3. Observar se algumas variáveis passaram de alguns valores limites estabelecidos inicialmente, representando neste caso uma mudança importante na estrutura do sistema, ocasionando talvez a ativação de outros *processos* e *views*. No exemplo, uma situação limite é a pressão de ambas colunas de água serem iguais, $(A[\text{pressão}(C)] = A[\text{pressão}(D)])$.

2.2.3 Ontologia Centrada em Restrições

Proposta por Kuipers em 1986 [KUI 89], a idéia é construir um modelo, a partir de um número limitado de operadores qualitativos, que represente todo o conjunto de relacionamentos possíveis entre as variáveis do processo estudado.

A ontologia baseada em restrições toma como base as equações diferenciais que descrevem o sistema dinâmico que está sendo estudado. A partir destas equações são derivadas as *Equações Diferenciais Qualitativas (QDE - Qualitative Differential Equation)* que serão a base do raciocínio a ser elaborado.

Enquanto as *confluências* são estáticas, as *QDE* usam um operador qualitativo de derivação.

Observando a metodologia empregada por esta ontologia verifica-se que ela está mais voltada para a tarefa de derivar um raciocínio sobre o sistema em uso do que as tarefas de modelagem conforme as duas outras metodologias estudadas.

As variáveis que caracterizam o sistema são descritas através de funções do tempo.

Uma função f é definida conforme a seguir :

$$f: [t_0, t_n] \rightarrow R^*; \text{ onde } [t_0, t_n] \subseteq R^* \text{ e } R^* = R \cup \{-\infty, \infty\}$$

Toda função tem associado um conjunto de *pontos de referências (landmarks)* que definem os pontos críticos pelos quais o sistema passou. Estes pontos devem, por definição, conter obrigatoriamente $f(t_0)$, $f(t_n)$, 0 (*zero*) e outros valores $f(t)$ que podem ser incluídos ao longo do processo.

O conjunto de *landmarks* é ordenado, de tal maneira que temos $l_1 < l_2, \dots < l_n$.

O *estado qualitativo (qualitative state)* $QS(f, t)$ em um ponto t é descrito por um par $\langle Q_{val}, Q_{dir} \rangle$ onde:

$$Q_{val} \begin{cases} l_i & \text{Se } f(t) = l_i, \text{ ou seja, } f(t) = \text{landmark.} \\ (l_i, l_{i+1}) & \text{Se } f(t) \in (l_i, l_{i+1}), \text{ ou seja, } f(t) \text{ difere de um landmark. Neste caso,} \\ & Q_{val} \text{ passa a ser descrito pelo intervalo de valores compreendidos} \\ & \text{entre dois landmarks.} \end{cases}$$

O princípio que está sendo aplicado neste caso é que a descrição qualitativa salienta os *landmarks* e os demais pontos no intervalo entre os *landmarks* são resumidos pelos valores dos *landmarks* que definem o intervalo, pois não representam pontos críticos.

$$Q_{dir} \begin{cases} inc \text{ se } f'(t) > 0 \\ dec \text{ se } f'(t) < 0 \\ std \text{ se } f'(t) = 0 \end{cases}$$

O comportamento qualitativo da função f no intervalo $[t_0, t_n]$ é descrito pelo conjunto de *estados qualitativos* existentes neste intervalo, isto é, $QS(f, t_0), QS(f, t_0, t_1), QS(f, t_1), QS(f, t_1, t_2), \dots, QS(f, t_{n-1}, t_n), QS(f, t_n)$.

O sistema por sua vez é composto por um conjunto de funções f , ou seja, $F = (f_1, f_2, \dots, f_n)$.

Os pontos de tempo do sistema que estão associados aos *landmarks* são denominados de *distinguished points* (*pontos distintos*).

Os *pontos distintos* do sistema serão a união dos *pontos distintos* de todas as funções que descrevem o sistema. Assim o *estado qualitativo* do sistema, ou seja, o *estado qualitativo* de F de n funções será:

$$QS(F, t_i) = [QS(f_1, t_i), QS(f_2, t_i), QS(f_3, t_i), \dots, QS(f_n, t_i)]$$

$$QS(F, t_i, t_{i+1}) = [QS(f_1, t_i, t_{i+1}), QS(f_2, t_i, t_{i+1}), QS(f_3, t_i, t_{i+1}), \dots, QS(f_n, t_i, t_{i+1})]$$

Caso alguma das funções não possuam os pontos t_i ou t_i, t_{i+1} entre seus *pontos distintos*, então escolhe-se os *pontos distintos* t_k, t_{k+1} de tal maneira que t_i e t_{i+1} estejam contidos neste intervalo.

Durante a simulação, as funções do sistema podem gerar novos *landmarks* além daqueles que foram previstos inicialmente. Estes novos pontos são aqueles onde a função atinge Q_{dir} igual a $std(f'(t)=0)$. Esta característica é importante pois cria a possibilidade de fornecer novos pontos críticos que provavelmente o usuário não havia pensado anteriormente.

Aplicando a atual ontologia para o exemplo dos vasos comunicantes que foi usado na ontologia anterior, tem-se o seguinte modelo.

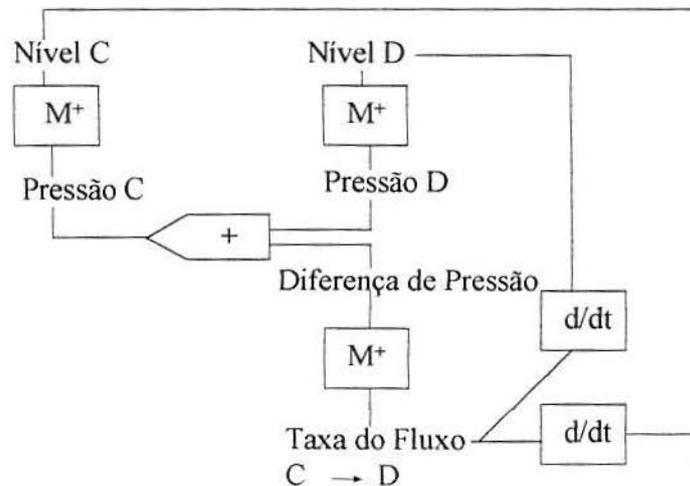


Figura 2.2 - Modelo dos vasos comunicantes na ontologia centrada em restrições

Observe-se que os objetos são representados através das variáveis qualitativas que por sua vez representam funções. A relação entre estas variáveis é estabelecida através de operadores qualitativos.

Conforme citado anteriormente, o sistema é composto por funções do tempo que nesta caso são: nível da água nos vasos, pressão nos vasos, diferença de pressão e o fluxo da água.

Os principais operadores desta ontologia são:

$M+, M-$ Representam uma dependência funcional entre duas variáveis. É um relacionamento monotônico (positivo ou negativo) equivalente ao operador α da ontologia orientada para o processo. $M+(f_1, f_2)$ é definido por $f_1, f_2: [m, n] \rightarrow R^*$ se e somente se $f_1(t) = g(f_2(t))$ para todo $t \in [m, n]$, onde g tem como domínio $f_2([m, n])$ e é diferenciável e $g'(x) > 0$ para todo x no interior do domínio.

$ADD(f_1, f_2, f_3)$ Representa um operador de adição em f_1, f_2, f_3 conforme a definição:

$$f: [m, n] \rightarrow R^*, \text{ tal que se e somente se } f_3(t) = f_1(t) + f_2(t) \text{ para todo } t \in [m, n].$$

$MULT(f_1, f_2, f_3)$ Representa um operador de multiplicação em f_1, f_2, f_3 conforme a definição:

$$f: [m, n] \rightarrow R^*, \text{ tal que se e somente se } f_3(t) = f_1(t) * f_2(t) \text{ para todo } t \in [m, n].$$

$MINUS(f_1, f_2, f_3)$ Representa um operador de subtração em f_1, f_2, f_3 conforme a definição:

$$f: [m, n] \rightarrow R^*, \text{ tal que se e somente se } f_3(t) = f_1(t) - f_2(t) \text{ para todo } t \in [m, n].$$

$DERIV(f_1, f_2)$ Representa um operador diferencial em f_1, f_2 conforme a definição:

$$f: [m, n] \rightarrow R^*, \text{ tal que se e somente se } f_1'(t) = f_2(t) \text{ para todo } t \in [m, n].$$

Este operador representa o caráter dinâmico do sistema.

A interpretação do modelo expresso anteriormente é a seguinte:

$M+(\textit{pressão} (C), \textit{nível}(C))$

$M+(\textit{pressão} (D), \textit{nível}(D))$

$ADD(\textit{pressão} (D), \textit{diferença de pressão}, \textit{pressão} (C))$

$DERIV(\textit{nível}(C), \textit{fluxo}(C \rightarrow D))$

$DERIV(\textit{nível}(D), \textit{fluxo}(C \rightarrow D))$

$M+(\textit{fluxo}(C \rightarrow D), \textit{diferença de pressão})$

A ontologia deriva os próximos estados utilizando a descrição acima e os estados iniciais das variáveis, , ou seja, todos os comportamentos consistentes com as *QDEs* do sistema, chegando aos estados de equilíbrio possíveis.

2.3 Álgebras Qualitativas

Conforme pode ser verificado na descrição das principais ontologias qualitativas, é necessária a existência de uma álgebra que suporte as operações propostas por estas teorias.

A questão que se coloca é como abrir mão de uma representação convencional do fenômeno feita através de números reais, onde as entidades são caracterizadas por valores numéricos, para uma representação onde lida-se com agregações destes números, de tal forma que as entidades assumam valores em um *espaço qualitativo* caracterizado por +, -, zero ou pequeno, médio, grande, por exemplo.

Além de permitir a representação no *espaço de qualidade*, é fundamental que as estruturas matemáticas que manipulam tais valores garantam regras de propagação e cálculos de natureza qualitativa com a consistência exigida pela álgebra.

Em particular, seria interessante que a coerência de tais estruturas de manipulação algébrica seja mantida também ao manipular com números reais, pois assim permitiria-se trabalhar simultaneamente com dados qualitativos e quantitativos.

A idéia central da álgebra qualitativa está na partição do conjunto dos reais. Assim sendo, um valor qualitativo corresponde a um subconjunto na linha \Re , conforme figura a seguir.

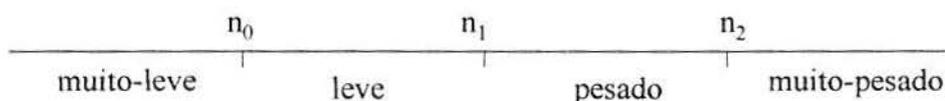


Figura 2.3 - Espaço de qualidade

Manipulações algébricas, como a adição e produto, mantêm consistência com as estruturas equivalentes definidas em \mathfrak{R} . Neste caso a adição e produto (\oplus e \otimes) são denominadas de funções qualitativas de adição e produto em correspondência as funções reais.

Em particular muitos estudos analisam o conceito de igualdade qualitativa, ou seja, afirma-se que dois objetos simbólicos são iguais quando o subconjunto de números reais associados a seus valores qualitativos não apresentam uma intersecção vazia. Uma grande dificuldade no cálculo qualitativo está no fato de que o mesmo não é transitivo.

Observemos que a álgebra intervalar é um caso limite da álgebra qualitativa na qual as partições são infinitas e as fronteiras são números reais.

A álgebra qualitativa pode ser vista desde uma situação de menor grau de informação (álgebra de sinais) até uma situação de máxima informação (álgebra intervalar, que pode também representar os números reais).

A álgebra intervalar tem sido usada em várias aplicações uma vez que é adequada para trabalhar com dados imprecisos, quando a imprecisão pode ser expressa em termos de intervalos de valores.

Por outro lado, existem algumas estruturas desenvolvidas especificamente para o *Raciocínio Qualitativo* como por exemplo a álgebra de sinais, álgebra de ordem de magnitude e a álgebra dual.

2.3.1 Álgebra de Sinais

Esta álgebra está baseada na partição mais simples da reta \mathfrak{R} , ou seja, valores negativos, zero e valores positivos. O conjunto de símbolos são $S = \{ +, -, 0, ? \}$.

O símbolo ? significa sinal indeterminado sendo necessário para aproximações envolvendo os operadores de adição e produto.

Os operadores são definidos de maneira trivial, por exemplo, $+ \oplus + = +$, $+ \oplus - = ?$, etc.

Embora este tipo de partição bastante simples induza a algumas limitações, também oferece algumas vantagens. As principais vantagens são:

- A igualdade qualitativa é transitiva se o elemento intermediário é diferente de ? ;
- A soma e o produto são associativos.

Estas propriedades tornam o cálculo qualitativo viável, e particularmente útil para modelar tendências (aumento, diminuição ou estabilização) quando empregado para acompanhar o sinal da variação dos parâmetros do processo.

2.3.2 *Álgebras de Ordem de Magnitude*

A maior limitação da álgebra de sinais é o fato de que o resultado de uma operação é diretamente dependente da magnitude dos parâmetros. O conhecimento apenas do sinal leva em muitas situações a resultados indeterminados, por exemplo, $+ \oplus - = ?$.

Para equacionar tal limitação foram propostas estruturas que trabalham com um grau de particionamento maior, ou seja, um refinamento na partição da reta \mathfrak{R} a fim de capturar a ordem de magnitude das variáveis envolvidas. Neste caso, obrigatoriamente é necessário considerar um certo grau de informações quantitativas, abrindo mão de uma visão totalmente simbólica.

Portanto, a diferença fundamental com a álgebra de sinais está no fato de que um dado conjunto de símbolos corresponde a uma infinidade de partições da reta \mathfrak{R} , no que se refere a escolha dos limites, por exemplo, n_0, n_1, n_2 na Figura 2.3. Consequentemente, tabelas simbólicas para \oplus e \otimes não são únicas, embora continuem a manter consistência para os números reais.

Embora a introdução de um maior refinamento na álgebra de ordem de magnitude resolva as limitações geradas pela simplicidade no particionamento da álgebra de sinais, também gera dificuldades para o cálculo qualitativo na medida que não possui as mesmas propriedades da álgebra de sinais.

Além da não transitividade, também não atende a associatividade dos operadores \oplus e \otimes e a distributividade. Isto significa que a mesma expressão aritmética pode produzir resultados diferentes dependendo da sequência em que são feitos. Embora os resultados qualitativos sejam garantidamente os mesmos, isto quer dizer que a minimização da solução não é garantida.

2.3.3 Álgebra Dual

Quando tratamos de problemas de características qualitativas, é freqüente encontrarmos situações onde as grandezas envolvidas não são diretamente mensuráveis, ou quando o são, tem associadas faixas de valores. Podemos citar como exemplos os sistemas que se utilizam das referências de densidade baixa, média ou alta, ou ainda tamanhos pequeno, médio, grande e extra-grande.

O espaço onde estas grandezas assumem seus valores é denominado de *espaço de qualidade* da variável, por exemplo, o espaço tamanho pode ser descrito por { pequeno, médio, grande, extra-grande } e o espaço peso por { muito-leve, leve, normal, pesado, muito-pesado }.

A Álgebra Dual é uma proposta de Guerrin [GUE 95] que tem por objetivo representar os valores qualitativos através de um modelo que guarde referência com um conjunto dos números inteiros.

São implementados os operadores da álgebra numérica (adição, subtração, multiplicação, divisão, inversa, potenciação e radiciação), além de um conjunto grande de funções (distância entre valores, posição em um ranking, etc.), a realização não somente de operações entre variáveis de um mesmo espaço de qualidade (ex: pequeno \oplus grande), como também operações entre espaços de qualidades diferentes (ex: leve \oplus pequeno).

Em [ROQ 95] encontra-se a descrição da implementação de tais conceitos através de um software que permite que sejam definidos livremente os espaços de qualidades de interesse e que sejam realizadas as operações previstas na Álgebra Dual, utilizando-se internamente para isto de um conjunto de bibliotecas em linguagem C e que ficam totalmente transparente para o usuário do sistema.

2.4 Modelos Causais

Uma capacidade importante dos especialistas é a indicação de causalidade entre as variáveis do fenômeno. Este tipo de conhecimento nem sempre é capturado pelas equações matemáticas.

A consequência da causalidade é a possibilidade de não somente realizar uma análise do fenômeno, como também explicar os resultados obtidos por esta análise.

Assim sendo, é possível classificar os modelos qualitativos em duas categorias:

- Modelos não causais, que se utilizam somente de relações algébricas entre as variáveis do processo, como as equações convencionais;

- Modelos causais, que codificam a causalidade, além das relações algébricas.

Quando utilizamos modelos causais, a causalidade é um conhecimento a priori fornecido pelos especialistas.

A utilização de tal mecanismo é útil quando não temos acesso ao modelo de equações que explique as leis que regem o processo. Muitos dos modelos mentais utilizados por especialistas lançam mão de redes causais, o que demonstra ser possível extrair o modelo causal do conhecimento do especialista.

Além disso, a tarefa de explicar os processos de um fenômeno parece ser bastante difícil sem lançar mão da causalidade. Neste sentido o uso de grafos, por exemplo, facilitam bastante o processo de rastreamento das etapas do raciocínio utilizado.

Conforme será visto em capítulo adiante, o presente trabalho optou pelo uso de grafo para implementar a proposta de construção de uma ferramenta de diagnóstico de falhas.

Embora mais difícil, existem propostas de implementar a habilidade de explicar os processos do fenômeno estudado através de modelos não causais. A partir de um conjunto de equações algébricas não direcionais, o problema é recuperar um caminho que explique como se propagaria um distúrbio no sistema. Por exemplo, de Kleer e Brown [DEK 84] trabalharam neste sentido, através do que chamaram de Mythical Causality, enquanto Iwasaki [IWA 88] construiu uma proposta denominada de Causal Ordering, onde a técnica principal está baseada na identificação de subsistemas de equações dentro do modelo funcional.

Porém ainda que se consiga restabelecer uma interpretação causal do fenômeno através destas técnicas, resta saber se esta interpretação é consistente com aquela que seria entendida como causal por um especialista.

3. Uma Visão Geral do Diagnóstico Baseado em Modelo

Conforme Randall em [RAN 92], a questão fundamental do Diagnóstico Baseado em Modelos está na tarefa de comparação entre o comportamento previsto para o sistema e o comportamento efetivamente observado. Qualquer diferença entre o comportamento predito de um dispositivo e aquele que está ocorrendo é chamado de *discrepância*.

A suposição básica adotada no Diagnóstico Baseado em Modelo é que se o modelo estiver correto, então qualquer discrepância observada pode ser classificada como a ocorrência de uma falha do sistema.

Poderia ser argumentado que, conceitualmente, esta suposição é sempre um erro, no sentido de que um modelo é uma aproximação da realidade, isto é, não é o dispositivo analisado propriamente dito e sim a sua representação através de uma aproximação matemática que sempre deixará de incorporar algumas características do dispositivo real.

Neste caso, pode-se compensar tal limitação com a idéia de que os elementos não representados no modelo podem não ter significado prático para o objetivo para qual o modelo será usado.

A tarefa de diagnóstico pode ser detalhada nas seguintes atividades:

- Realização de observações sobre o dispositivo, em geral, através de medidas nas entradas e saídas do sistema;
- Descrição da estrutura interna do sistema em termos de seus componentes e interconexões;
- Descrição do comportamento de cada um dos componentes.

Posto estas atividades, a questão que se estabelece é: Qual é o componente cujo comportamento falho está ocasionando as discrepâncias observadas.

Esta abordagem, além da denominação de Diagnóstico Baseado em Modelo, também já recebeu outras denominações como: “Reasoning from First Principles” (porque se utiliza de princípios básicos de causalidade) e “Deep Reasoning” (uma tentativa de diferenciar esta metodologia dos sistemas especialista baseados em regras).

3.1 *Abordagens Alternativas ao Diagnóstico Baseado em Modelo*

Ao longo do tempo várias outras abordagens alternativas foram apresentadas para a questão de diagnóstico, além da proposta do Diagnóstico Baseado em Modelo.

Antes de prosseguir a análise da proposta baseada em modelo, em um nível de detalhe maior, , serão vistas algumas outras alternativas tradicionais nesta área.

A abordagem mais tradicional utiliza o sistema de diagnóstico para garantir que o dispositivo, por exemplo um dispositivo eletrônico ao final de uma linha de produção, está executando todas as funções para o qual foi projetado.

A segunda abordagem constrói um dicionário de falhas antecipadamente. Após executa-se uma simulação do comportamento geral do sistema para cada uma das falhas previstas dos componentes. Ao final se obtém uma lista de falhas e os respectivos sintomas.

A terceira abordagem captura a experiência de especialistas de uma forma empírica, utilizando esta experiência para construir sistemas especialistas baseados em regras.

Por último podemos citar as árvores de decisão que capturam o conhecimento de diagnóstico e oferecem uma forma organizada de estruturar as informações que conduzem a identificação do comportamento falho.

A questão que se coloca é quando usar estas abordagens e quais seus limites.

3.1.1 *Validação do Comportamento Normal*

Esta abordagem traz implicitamente um grave problema, na medida que o que ela faz na verdade não é um diagnóstico e sim uma verificação do comportamento do dispositivo para validar se o mesmo executa todas as tarefas previstas.

Não está sendo avaliado um comportamento falho, pois ainda não existe o comportamento.

Diagnóstico baseado em modelos partem de um sintoma e chegam a um componente que esteja com a falha, então de certa forma fazem o inverso da validação proposta nesta abordagem.

A opção de partir de um sintoma específico e voltar até atingir o componente responsável pela falha é mais eficaz do que exaurir todos os comportamentos até identificar um que justifique a *discrepância*.

3.1.2 *Dicionário de Falhas ou Modelo de Falhas Pré-Estabelecidas*

Nesta abordagem as falhas são pré-identificadas, ou seja, são conhecidas a priori.

Assim sendo, o desafio está em criar um conjunto de registros de falhas grande o suficiente para que o diagnóstico possa ser útil na prática e ao mesmo tempo simples o suficiente para permitir a sua simulação.

Uma característica importante que o sistema deve ter é que sempre que uma falha é identificada em um dado componente, o sistema deve ser capaz de estabelecer todos os comportamentos errados possíveis que podem ser gerados a partir desta falha.

Esta abordagem possui a peculiaridade de agregar um grau de refinamento a questão mais geral do Diagnóstico Baseado em Modelos que é o fato de que enquanto na proposta do Diagnóstico Baseado em Modelo, uma falha é definida por exclusão, ou seja, tudo aquilo que não é o comportamento normal do sistema, o modelo de falhas pré-estabelecidas sugere uma falha específica que poderá ser aproveitada para futuros testes.

Outra questão prática que se impõem é que, muitas vezes, um conjunto pequeno de falhas conhecidas pode justificar a quase totalidade de situações de mal funcionamento de um dado sistema.

3.1.3 *Sistemas Baseados em Regras*

Os sistemas especialistas tradicionais baseados em regras são construídos a partir da captura do conhecimento e experiência dos especialistas através de associações empíricas e regras que ligam os sintomas a defeitos principais possíveis.

Uma característica que se estabelece neste método é o fato da abordagem utilizar fortemente o conhecimento de um dispositivo específico do que ao invés do conhecimento da estrutura e comportamentos do sistema. A consequência deste fato é que a cada novo dispositivo é preciso que se desenvolva e amadureça o conhecimento das novas regras e que as mesmas sejam incorporadas ao sistema de diagnóstico.

Esta situação se torna crítica quando os dispositivos objetos da análise possuem um ciclo de vida pequeno, como ocorre com dispositivos eletrônicos, onde sua existência possuem um ciclo cada vez menor. O tempo necessário para que um conjunto de

padrões de regras seja derivado das observações dos especialistas pode ser grande demais para a vida útil do dispositivo.

A abordagem baseada em modelo está calcada na descrição formal do dispositivo e não no conhecimento empírico estabelecido por um especialista, o que hoje em dia significa dizer que com os projetos apoiados por computador (CAD) fica cada vez mais fácil obter a descrição já na criação do dispositivo, pois os mesmos já se encontram nesta forma.

Quando fala-se sobre as regras capturadas na abordagem dos sistemas especialistas, deve-se lembrar que além daquelas derivadas da experiência empírica, também podem ser utilizadas aquelas que são obtidas do conhecimento da estrutura e comportamento do sistema. Porém a questão que se estabelece é justamente esta: Qual é a melhor forma de representar a estrutura e o comportamento de um sistema? Obtidos de forma empírica ou derivada do conhecimento, regras baseadas em estruturas do tipo Se/Então oferecem poucos subsídios sobre como representar a estrutura e comportamento do sistema estudado e sobre a tarefa de diagnóstico.

3.1.4 Árvores de Decisão

A grande vantagem das árvores de decisão é o fato delas proverem uma maneira organizada, portanto possível de ser estruturada sob a forma de algoritmos, para estabelecer a sequência de testes que precisam ser verificados para concluir-mos qual o componente falho.

Por outro lado, elas já representam o conhecimento obtido, ou seja, elas não indicam como construir o relacionamento entre as variáveis representadas em sua estrutura.

Como será visto adiante, a proposta deste trabalho consiste justamente em usar uma estrutura de árvore (grafo) como uma etapa final do processo de diagnóstico, isto é, será utilizado seu potencial de representação altamente organizado para relacionamentos previamente estabelecidos.

3.1.5 Quando Não Usar Diagnóstico Baseado em Modelo

Comparando a técnica de Diagnóstico Baseada em Modelo com as demais alternativas é possível definir o seu escopo de aplicação.

Em princípio, existem duas situações extremas que indicam que a técnica baseada em modelo não é apropriada.

Quando o problema é extremamente complexo, onde a identificação de componentes e seus relacionamentos estão sujeitos a uma quantidade muito grande de variáveis ou as mesmas são de difícil representação, implicando que a tarefa de construção de um modelo que prediga o comportamento do sistema pouco pragmático. Neste caso, pode ser mais eficaz coletar a experiência do dia a dia e transformá-la em regras para futuro uso no diagnóstico de situações similares.

No outro extremo, se o dispositivo é tão simples que seja relativamente fácil enumerar as situações de mal funcionamento, parece ser mais pragmático a criação de um dicionário de falhas.

Assim é possível situar a utilização da técnica de Diagnóstico Baseada em Modelo nas situações onde a estrutura e comportamento do sistema são razoavelmente conhecidos e é simples o suficiente para ser representado através de um modelo, embora operacionalmente complexo para se aplicar simulações que vise capturar seu comportamento através de regras. Além desta situação, também é indicada sua aplicação quando não for possível enumerar a priori o conjunto de falhas possíveis.

3.2 Descrevendo estrutura e comportamento

Podemos constatar vários tipos de abordagens para a representação da estrutura do sistema diagnosticado, porém é possível verificar um conjunto comum de conceitos.

- Representação hierárquica da estrutura - Os componentes são representados de forma hierárquica, ou seja, pode-se partir de uma visão global do sistema e descendo na descrição dos componentes até chegar a um nível primitivo.

Por exemplo, mais adiante será estudado um sistema de ar condicionado central onde é estabelecida uma visão geral dos vários componentes e suas interligações, tendo assim identificado bombas de água, trocadores de calor, compressor e torre de arrefecimento. Poderia-se então, descer na hierarquia e identificar os componentes da bomba de água, o que levaria a uma descrição dos seus componentes eletro-mecânicos e assim sucessivamente.

Denomina-se de *observações* ao conjunto de medidas obtidas em alguns pontos do sistema.

Os componentes cujo mal funcionamento é consistente com todas as *observações* de falhas constatadas são chamados de *candidatos*.

A abordagem hierárquica permite que o diagnóstico seja também hierárquico, isto é, trabalha-se até o nível onde os componentes responsáveis pelo mal funcionamento sejam identificados, ou seja, até os *candidatos* estarem isolados.

- Representação centrada no objeto - Existe uma correspondência direta entre cada componente e uma estrutura de dados (objeto de dados) correspondente. A cada estrutura de dados está associado a descrição de seu comportamento.

- Representação isomórfica - Além de associar a cada componente um objeto de dados, existe uma correspondência direta entre a topologia de interconexões entre os componentes do dispositivo e a interconexão entre os objetos de dados.

No exemplo do sistema de ar condicionado central, pode-se identificar cada componente (bomba de água, compressor, etc) com um objeto de dados específico e cada interconexão entre estes componentes como uma estrutura que permita fazer a conexão entre estes objetos, representando o fluxo de informação entre eles.

- Representação do comportamento - O comportamento pode ser representado por um conjunto de expressões que transcrevem o inter-relacionamento entre as variáveis que compõem o modelo do sistema. Estas expressões podem ser expressas através de equações algébricas ou outros mecanismos.

Além de representar o comportamento através do inter-relacionamento, estas equações já podem fornecer uma interpretação do comportamento causal do dispositivo.

Como será verificado adiante, o presente trabalho se utilizará da técnica de análise de regimes para construir as expressões que representam o comportamento do sistema.

3.3 As Questões Fundamentais do Diagnóstico Baseado em Modelo

Em [RAN 92] é apresentado a visualização do diagnóstico através de três estágios de hipóteses: geração de hipóteses, teste de hipóteses e discriminação das hipóteses.

Em todos os casos é possível avaliar a situação na suposição mais simples de que existe apenas um ponto único de falha ou evoluir para o cenário onde podem existir múltiplos pontos de falhas.

Em [RAO 93] é demonstrado que o problema de múltiplos pontos de falha, mostra-se computacionalmente intratável quando desejamos construir um algoritmo de identificação de falhas em um grafo, por ser considerado NP-completo.

3.3.1 Geração de Hipóteses

A tarefa principal é: dada uma *discrepância*, identificar qual o componente cujo o mal funcionamento pode justificar a existência da *discrepância*.

As técnicas clássicas de IA dizem que um bom gerador de hipóteses deve ser :

- Completo - capaz de gerar todas as hipóteses possíveis;
- Não redundante - gerar cada hipótese apenas uma vez;
- Consistente - Gerar poucas hipóteses que se mostrem incorretas.

A seguir serão avaliadas algumas versões possíveis de um gerador de hipóteses, desde aquele que seja o menos sofisticado até uma que seja o mais elaborado a ponto de adicionar novas informações ao problema.

1. O gerador mais simples que seja completo, é aquele em que todos os componentes do dispositivo ou sistema sejam enumerados. Por exemplo, no caso do sistema de ar condicionado central, o gerador deve identificar todos os componentes tais como bombas de água, câmaras de troca de calor, compressor, etc.

Embora completo, este gerador não pode ser classificado como inteligente.

2. Pode ser melhorado seu desempenho criando uma nova versão do gerador, estabelecendo que para que um dado componente seja *suspeito*, ele deve estar conectado à *discrepância*.

Aqui cabe um esclarecimento na nomenclatura utilizada:

Suspeito - É qualquer componente que faça parte de uma hipótese e que seja capaz de estabelecer um vínculo com a *discrepância* observada.

Candidato - É qualquer componente cujo mal funcionamento justifique todas as observações de *discrepâncias* do sistema, portanto já passou pela fase de testes das hipóteses.

Assim sendo, um componente será um *suspeito*, somente se for possível estabelecer uma conexão dele até a *discrepância*. Para realizar isto, o gerador deverá partir da *discrepância* e percorrer todo o sistema, identificando os componentes que estão conectados neste caminho. Na proposta deste trabalho será utilizado um algoritmo

específico para percorrer este caminho denominado de *Backward*, conforme poderá ser visto adiante.

Já é incluída nesta versão, o fato do sistema possuir suas interconexões direcionadas, ou seja, a comunicação entre os componentes é feita seguindo um determinado sentido pré-estabelecido. Isto implica que quando o sistema é examinado a partir da *discrepância*, esta sendo percorrido o sentido reverso do fluxo entre os componentes, portanto alcançando somente aqueles componentes que estão neste caminho reverso.

3. É possível refinar a versão do gerador de hipóteses, mais uma vez, se for atendida a observação de que entre todos os componentes que estão no caminho reverso da *discrepância*, existem aqueles que possuem entradas que não influenciam na saída, fazendo com que seja desnecessário seguir o caminho reverso desta entrada.

Isto pode ser visualizado a partir do seguinte exemplo:

Dada uma porta lógica do tipo OR com entradas 1 e 0, o modelo fará a predição de uma saída igual a 1. No entanto, suponha que a saída observada seja igual a 0 (zero).

Neste caso existem três hipóteses:

A) A porta está com problema, não gerando a saída correta;

B) A entrada que deveria estar com valor 1, na verdade, está com valor igual a 0. Neste caso, o problema deve estar nos componentes que estão ligados a esta entrada e portanto deve ser seguido o fluxo no sentido reverso a partir desta entrada.

C) A terceira possibilidade aponta para um problema na entrada que deveria estar com valor zero. Esta não é propriamente uma hipótese, pois independente do valor ser zero (conforme modelo) ou 1 (se houvesse algum problema), isto em nada afetaria a saída se admitirmos que a porta está funcionando corretamente. Portanto, o gerador não deve considerar nenhum componente que esteja ligado a esta entrada como passível de ser um suspeito.

4. Finalmente, pode ser acrescentado uma versão final para o gerador se for aproveitada a seguinte suposição:

Quando houver mais de uma discrepância, pode ser identificado um conjunto de *suspeitos* para cada uma delas e então (assumindo a condição de um único ponto de falha) fazer a intersecção entre os conjuntos de *suspeitos*, reduzindo o número total de suspeitos. Isto quer dizer que, os *suspeitos* de serem os geradores da falha devem ser aqueles que justificam simultaneamente todas as *discrepâncias* ativas.

Todas as questões levantadas anteriormente como aperfeiçoamentos do gerador de hipóteses serão formalmente descritas e utilizadas adiante, quando for apresentado o método escolhido para análise de falhas em um sistema grafo dotado de alarmes.

3.3.2 Testes de Hipóteses

O segundo estágio das hipóteses elaboradas para justificar uma *discrepância* é o teste das hipóteses geradas, o que quer dizer que o interesse passa a ser a verificação de cada um dos *suspeitos* para validar se os mesmos suportam todas as *observações* feitas sobre os dispositivos.

Existem algumas técnicas para aplicar os testes, com variado grau de refinamento, entre as quais podem ser citadas:

- Técnica de simulação com modelo de falhas - Esta é a técnica mais simples, onde para cada suspeito produzido pelo gerador, é aplicado um modelo de falhas. Um modelo de falhas consiste na enumeração de todas as maneiras conhecidas de mal funcionamento de um componente.

O comportamento do sistema é simulado com as entradas originais e é assumido que o *candidato* apresenta um mal funcionamento conforme previsto em seu modelo de falhas.

Se as *observações* forem inconsistentes com o comportamento previsto pelo modelo de falha, a hipótese é descartada. Caso contrário, isto é, a hipótese de mal funcionamento é coerente com as *observações* realizada no sistema, então a hipótese é armazenada.

Ao final, é obtido um conjunto de hipóteses explicando o mal funcionamento de cada *suspeito*, de forma a justificar as observações de falha no sistema (*discrepâncias*).

- Técnica baseada em restrições - Apresentado em [DAV 82], a idéia básica é modelar cada componente através de um conjunto de expressões chamadas de *restrições* (*constraints* - que podem ser equações algébricas, por exemplo) e testar os *suspeitos* para verificar se é válido admitir que somente os *suspeitos* estão com mal funcionamento.

Em um sistema onde o conjunto de componentes e suas interligações são representados por expressões algébricas, é verificado se há uma inconsistência entre a saída observada e a aquela prevista pelo modelo para um dado conjunto de entrada. Caso haja uma inconsistência, então alguma expressão (que está modelando um componente) está inconsistente.

Uma vez concluído que existe uma inconsistência no sistema examinado, passa-se a procurar a expressão que está inconsistente e então a mesma é retirada do conjunto de expressões que descreve o sistema a fim de remover a inconsistência. Isto é a aplicação da questão básica levantada inicialmente, ou seja: É válido admitir que somente os suspeitos estão com mal funcionamento ?

A expressão é removida do sistema e fica-se livre para colocar em seu lugar o valor que interessar (não obedecendo mais a expressão retirada) a fim de verificar se com o novo valor justifica-se a *inconsistência* observada no sistema.

Se a *inconsistência* for justificada, então mantém-se a hipótese de que o componente descrito pela expressão retirada é um *candidato*, caso contrário o mesmo é liberado desta condição.

Uma característica geral desta técnica, assim como outras de Diagnóstico Baseado em Modelo, reside no fato de que não é necessário especificar como um componente está falhando, pois um mal funcionamento consiste simplesmente na situação onde o componente não está fazendo o que deveria, não importando como. Isto traz a grande vantagem da técnica tornar-se abrangente, pois ela diagnostica o problema independente da natureza particular do mal funcionamento, não exigindo, portanto, um conhecimento a priori dos modos de mal funcionamento.

Por outro lado, embora a técnica baseada em um modelo de falhas (item anterior) exige um conhecimento a priori (portanto torna-se menos abrangente), porém uma vez identificado o problema, pode ser mais específica na determinação da natureza do problema, pois conhece especificamente o que causa aquele tipo de falha.

3.3.3 Discriminação de Hipóteses

Uma vez feita a geração de hipóteses e procedido aos testes das hipóteses geradas, então finalmente resta a seguinte tarefa: como distinguir entre as hipóteses, quando mais de uma delas são aprovadas na fase de testes.

A estratégia neste caso passa por realizar uma das seguintes alternativas:

Realizar uma nova observação (medida em algum lugar do sistema) a respeito do comportamento do dispositivo, ou seja, gerar uma informação adicional que permita distinguir entre as hipóteses.

Mudar as entradas estabelecidas e refazer as observações sobre as saídas obtidas, isto é, executar novamente a fase de teste de hipóteses com entradas diferentes das originais.

Para cada uma das alternativas cabe observar o seguinte:

• *Obtenção de Informação Adicional para Discriminação de Hipóteses*

Quando se trata de adicionar uma nova informação, é possível utilizar várias técnicas com grau variado de sofisticação. Da mesma forma que foi trabalhado na geração de hipóteses, pode-se começar do método mais simples ao mais sofisticado.

A) O método mais simples consiste em escolher um ponto do dispositivo que ainda não tenha sido medido e obter dele uma nova informação. Utilizar então, esta nova informação para regerar as hipóteses, realizando os testes novamente. Se ainda persistir mais de uma hipótese, escolher um outro ponto para uma nova medição e reiniciar o ciclo até encontrar uma única hipótese que justifique a *discrepância*.

B) Uma versão mais sofisticada pode ser feita se, a exemplo do que foi feito no estágio de geração de hipóteses, utilizando o conhecimento sobre o comportamento dos componentes do sistema para pré-selecionar os locais onde não devemos investir em uma nova medida. Isto é, existem determinados pontos do dispositivo que, como no exemplo da porta OR, não agregarão informações adicionais para identificação da origem da falha, portanto devem ser evitados na escolha do novo local de medição.

C) Muitas vezes, mesmo aplicando os métodos anteriores, continua a existir um conjunto de hipóteses com o mesmo nível de informação. Neste caso, pode-se lançar mão do conhecimento da história de cada componente e atribuir um grau de probabilidade de falha ao mesmo. A partir desta associação de probabilidade de falha aos componentes, decide-se por aplicar uma nova medida (observação) para aquele que apresentar maior probabilidade de falha.

Em geral, as informações dos vários métodos acima são combinadas para explorar um novo ponto de medição para auxiliar na discriminação de hipóteses com o mesmo grau de informação.

• *Re-execução de Testes para Discriminação de Hipóteses*

A tarefa que se impõe com esta opção é selecionar um conjunto de entradas que possam reduzir o número de hipóteses de falha, ou seja, reduzir o número de *suspeitos*.

Para que um *suspeito* continue válido ele deverá justificar os sintomas observados originalmente, bem como os novos sintomas gerados a partir das novas entradas.

Enquanto que na alternativa anterior a questão fundamental é decidir qual o ponto do sistema que iremos escolher para recolhermos uma nova *observação*, aqui a questão é qual o melhor conjunto de entrada que devemos estabelecer para gerar as novas informações.

Se o conjunto de testes é conhecido previamente, a melhor escolha do conjunto de entrada será aquele que divida o conjunto de *suspeitos* em dois, ou seja, permita uma pesquisa binária classificando o grupo dos *suspeitos* que possam tornar-se *candidatos* e o grupo que possa ser desprezado.

Por outro lado, se o conjunto de testes é desconhecido ou na prática se mostra infinito, então deverá ser elaborada uma estratégia específica. Em linhas gerais, a idéia é projetar o teste para validar um *suspeito* por vez, e a saída gerada pela nova entrada possa classificar se o *suspeito* está funcionando corretamente ou não.

Porém este é apenas um conceito geral nestes casos, pois dependendo da situação o problema se torna bastante complexo, podendo ser classificado como NP-completo.

3.4 Considerações Gerais

Foi apresentado nos itens anteriores uma visão global das principais características da proposta de Diagnóstico Baseado em Modelo.

Especificamente será de interesse deste trabalho utilizar a idéia de geração de hipóteses, pois a investigação estará centrado na criação de um modelo e na descrição de seu comportamento através do agrupamento de duas técnicas específicas (Análise de Regimes e Grafos) na fase de geração de hipóteses. No escopo desta proposta não estão envolvidas as fases de teste e discriminação.

4. Análise de Regimes

O RQ é uma área interdisciplinar que visa o estudo de técnicas as quais buscam a modelagem de processos físicos quanto a sua estrutura e comportamento, possibilitando então a execução de tarefas de análise, controle, simulação e diagnóstico.

Uma das teorias que é utilizada como ferramenta de apoio ao RQ, é a *Teoria da Análise Dimensional (TAD)*. Esta teoria conhecida principalmente dos físicos, serviu de base para que Bhaskar and Nigam [BHA 90] desenvolvessem um trabalho onde o conceito de *regime* é introduzido, além da descrição de algumas técnicas a partir das quais é possível fazer uma análise do comportamento qualitativo dos processos físicos. Posteriormente Roque [ROQ 91] estendeu estes conceitos, criando uma técnica que permite um tratamento computacional completo e denominou esta técnica de *Análise de Regimes*.

A seguir serão verificados os principais conceitos que sustentam a *TAD* e a *Análise de Regimes*, para que posteriormente possam ser utilizados como uma ferramenta de diagnóstico em RQ.

4.1 Unidades de Medidas

O processo de medida de uma quantidade física geralmente envolve o uso de uma determinada unidade. Embora isto geralmente ocorra, não é uma obrigatoriedade, pois existem casos onde a medida necessariamente não se utiliza de uma unidade, como por exemplo, a utilização do seno de um ângulo como medida de sua abertura .

Segundo Isaacson [ISA 75], uma unidade pode ser definida como sendo uma magnitude selecionada de uma determinada quantidade física com a qual outras magnitudes da mesma quantidade física podem ser expressas como sendo múltiplas desta unidade. Por exemplo, 25 metros é igual a 25 vezes a unidade de comprimento metro.

Um aspecto importante no uso das unidades é o fato de que é possível criar unidades que são derivadas da combinação de outras unidades de referência. Por exemplo, ao se medir o volume de um corpo, utiliza-se uma medida de volume derivada do comprimento, isto é, o metro cúbico, assim como o trabalho pode ser medido em joules que está relacionado com as medidas de força (newton) e comprimento (metro).

O questionamento que pode ser feito é sobre qual o critério que deve ser adotado para definir quais são as unidades que devem ser escolhidas como referências, para que a partir destas, as demais possam ser derivadas. No contexto atual da discussão, será assumido que não há nenhum motivo específico para escolher esta ou aquela unidade como referência, além do fato de se tentar utilizar aquelas que pareçam intuitivamente mais simples de perceber e manusear. Posteriormente, será verificado que é possível estabelecer alguns princípios formais para orientar tal escolha.

4.2 Princípio do Significado Absoluto da Magnitude Relativa

Podem ser utilizadas uma variedade de unidades diferentes para medir a mesma quantidade física. Por exemplo, a distância pode ser medida em metros, anos-luz ou microns. Apesar de unidades diferentes implicarem em magnitudes diferentes para uma mesma quantidade física, é desejável que a magnitude relativa de dois exemplos da mesma quantidade seja independente da unidade adotada.

Para visualizar a questão, digamos que o comprimento de um objeto é duas vezes maior que o comprimento de outro quando medimos em centímetros. A mesma relação 2, ou seja, o fato de um ser o dobro do outro deve ser encontrada se medirmos ambos os objetos em polegadas.

Bridgman [BRI 22] sintetizou esta idéia no que ele chamou de princípio do *Significado Absoluto das Magnitudes Relativas (SAMR)*.

Bridgman demonstra que a condição necessária e suficiente para que as unidades obedeçam o princípio *SAMR* é que as unidades derivadas sejam formadas a partir de um produto de potências das unidades consideradas como o conjunto de referência.

Um exemplo é a unidade derivada aceleração que é expressa em metro x segundo⁻², ou seja, um produto de potência (PP) de metro e segundo.

As unidades usadas como referências também satisfazem *SAMR*, uma vez que podem ser vistas como o caso particular onde o expoente da unidade em si é igual a um e os demais expoentes de outras unidades iguais a zero.

Assim, se for tomada a quantidade S , como sendo uma quantidade derivada das quantidades de referência A , B e C , por exemplo, então o *SAMR* garante que:

$$S = k.A^a B^b C^c$$

onde k , a , b , c são constantes, ou seja, S é um produto de potências das quantidades A , B , C e possivelmente uma constante k .

A demonstração deste princípio encontra-se no Apêndice I .

O princípio *SAMR* é muito importante, sendo de fato o motivo porque em geral as unidades físicas derivadas são definidas como produtos de potência das unidades de referências.

Existem, no entanto, casos onde a *SAMR* não pode ser aplicada, como por exemplo, nos casos em que a medida não se utiliza de unidades, conforme referenciado no início do capítulo. Entre estes casos, temos medidas que se referenciam a colocação da magnitude em um ranking de valores sem unidades, por exemplo a dureza de minerais em geologia que é medida na escala de Moh ou o nível de acidez medido em pH.

4.3 Conceito de Dimensão

Considerando que uma unidade derivada é expressa em termos de um produto de potências das unidades de referências, pode-se utilizar a maneira com que este produto é constituído para caracterizar a relação entre uma dada unidade derivada e as suas unidades de referências. Esta relação chamaremos de *dimensão*.

Quando uma determinada unidade varia na potência *n-ésima* de uma das unidades de referência, então diz-se que ela é da *dimensão n* em relação a esta unidade de referência.

Se uma dada quantidade *v* possui as *dimensões a, b e c* em relação as quantidades básicas massa, comprimento e tempo então temos : $v = M^a L^b T^c$.

Se tomarmos a área (*A*), por exemplo, diremos que sua dimensão em relação a quantidade comprimento (*L*) é 2, pois $A \equiv L^2$. Utilizando o mesmo raciocínio, dizemos que as dimensões da velocidade em relação ao comprimento e o tempo são LT^{-1} , ou seja, a velocidade varia na potência 1 de *L* e na potência (-1) de *T*.

Uma quantidade pode ter a *dimensão* reduzida a zero. Neste caso dizemos que ela é adimensional. Quantidades adimensionais podem ser resultados do quociente de duas quantidades similares. Por exemplo, a deformação de um material pode ser expressa como a razão da variação do comprimento sobre o comprimento original.

De uma forma mais geral, é viável afirmar que quantidades adimensionais são o resultado de qualquer combinação em que as dimensões das quantidades de referência resultem em zero. Tais combinações são conhecidas como produtos adimensionais.

4.4 Escolha das Quantidades de Referência

Quando se trabalha na mecânica clássica é possível derivar todas as grandezas a partir das quantidades de referência massa (M), comprimento (L) e tempo (T).

Entretanto, MLT não constitui-se na única possibilidade de um sistema de referência para a descrição da mecânica clássica, existindo por exemplo a alternativa FLT , ou seja, força, comprimento e tempo.

Além disso, a medida que trata-se com quantidades físicas térmicas, elétricas ou magnéticas, passa a ser interessante introduzir novas referências.

O exemplo do sistema MLT serve para nos indicar a seguinte questão :

Quais são as condições que um conjunto de quantidades físicas deve preencher para que estas quantidades possam ser tomadas como o sistema de referência (base), a partir do qual as demais quantidades serão derivadas ?

O que aconteceria se, por exemplo, o comprimento, o tempo e a velocidade fossem tomados como unidades de referências. Um dos problemas que surgiria em função desta escolha, seria como definir a massa em função das unidades de referência. Além disso, haveria dificuldade em estabelecer uma maneira única de expressar a velocidade.

O exemplo mencionado sugere um primeiro requisito para identificação de um conjunto base, isto é, estabelece-se que nenhuma variável do conjunto pode ser derivada de qualquer outra variável do mesmo conjunto. Intuitivamente justifica-se esta condição porque se uma variável de referência for derivada de outra, então ela não estará apresentando nenhuma contribuição nova para o conjunto, podendo portanto ser perfeitamente dispensada do conjunto base.

Então, agora, é introduzido o seguinte conceito:

Dado um conjunto de quantidades, que atenda as seguintes condições:

1. Nenhum membro do conjunto pode ser derivado de qualquer outro membro do conjunto ;
2. Cada uma das outras quantidades que não pertencem ao conjunto, deve poder ser derivada do conjunto base.

Então, este conjunto é chamado de *conjunto completo*.

4.5 Princípio da Homogeneidade Dimensional

Quando é aplicado o processo de multiplicação ou divisão a diferentes variáveis físicas, está sendo gerado como resultado um produto de potência que passa a ter um novo significado dimensional. Se 10 metros for dividido por 2 segundos, obtém-se 5 metros/segundo, gerando uma quantidade derivada, que no caso é chamada de velocidade e que possui as dimensões LT^{-1} .

Uma equação física é composta por termos que são adicionados e/ou subtraídos entre si de forma a manter uma consistência dimensional. Estes termos representam quantidades físicas variáveis (ou simplesmente variáveis) que podem estar na forma de uma única variável ou na forma de produtos de potências, por exemplo, na equação que descreve a distância percorrida por um projétil, tem-se : $s = ut + \frac{1}{2} gt^2$.

Partindo do princípio que só é possível adicionar ou subtrair variáveis que representem o mesmo tipo de quantidades física, então é correto afirmar que as dimensões destes termos devem ser iguais, ou seja, dimensionalmente equivalentes.

O Princípio da Homogeneidade Dimensional (PHD) postula que as leis físicas devem ser dimensionalmente consistentes, ou seja, que a representação dimensional do lado esquerdo deve ser igual a do lado direito, em qualquer equação.

Por exemplo, se for tomada a equação anterior, constata-se que cada termo possui uma representação dimensional igual a L , senão vejamos:

s distância total do projétil [L]

ut distância percorrida pelo projétil no tempo t a uma velocidade constante u

$$\left[\left(\frac{L}{T} \right) T \equiv L \right]$$

$\frac{1}{2} gt^2$ distância adicional percorrida no tempo t , como resultado da aceleração g

$$\left[\left(\frac{L}{T^2} \right) T^2 \equiv L \right]$$

Observa-se que embora alguns termos pareçam superficialmente diferentes, eles devem ter sua estrutura dimensional igual. Na verdade, esta observação traduz uma constatação conceitual mais profunda de Isaacson[ISA 75], ou seja: o processo de

construção matemática das equações depende basicamente da descoberta de aspectos diferentes da mesma variável física.

4.6 Teorema Pi de Buckingham

O teorema central da análise dimensional foi enunciado em 1914 por Buckingham[BUC 14], e é conhecido como Teorema Pi de Buckingham .

O teorema estabelece que:

Se existe uma equação dimensionalmente homogênea relacionando n quantidades físicas em termos de r dimensões referenciais independentes, então a equação pode ser reduzida a um relacionamento entre $(n-r)$ produtos de potências adimensionais, considerando que os membros do relacionamento são independentes entre si.

De uma forma resumida o teorema postula que se uma equação é dimensionalmente homogênea, então ela pode ser representada por um relacionamento entre um conjunto completo de produtos adimensionais.

O conceito de completo está sendo usado aqui conforme descrito anteriormente, ou seja, um conjunto de produtos adimensionais formado a partir de n quantidades é completo se nenhum membro do conjunto é derivado de outros membros e se todos os outros produtos formados a partir das mesmas n quantidades podem ser derivadas dos membros do referido conjunto.

Utilizando o exemplo anterior, $s = ut + \frac{1}{2}gt^2$, para verificar o significado do teorema, obtem-se a seguinte redução:

$$1 = \frac{ut}{s} + \frac{1}{2} \left(\frac{gt^2}{s} \right)$$

Ao dividir todos os membros por s , cada membro tornou-se um produto adimensional, e a equação original foi reduzida a um relacionamento entre os mesmos

$$\left(\frac{ut}{s} e \frac{gt^2}{s} \right).$$

Considerando que existem 4 quantidades físicas envolvidas (u , s , t e g) então temos $n = 4$ e que existem 2 dimensões independentes (L e T), então temos $r = 2$.

Assim, segundo o teorema devem ser esperados $(n-r)$ produtos adimensionais, ou seja, 2 produtos para expressar a equação.

Outro aspecto a observar é que nenhum dos dois produtos pode ser formado a partir do outro. Neste caso basta verificar que as variáveis u e g constam em apenas um deles, inviabilizando uma combinação que permita derivar um produto do outro.

É interessante notar que o conjunto completo não é unicamente definido, isto é, pode haver outros grupos compostos por produtos adimensionais que atendam aos requisitos para formar um grupo completo. Por exemplo, $\frac{u}{gt}$ e $\frac{u^2}{sg}$.

A prova formal do teorema é apresentada no Apêndice II e em [WHI 68] e [DRO 53] encontram-se um tratamento bastante rigoroso. Uma forma geral e não rigorosa de visualizar o teorema é a seguinte:

Como já foi verificado, uma equação física deve ser dimensionalmente homogênea, ou seja ela pode ser escrita na forma:

$$a_1 A_1 + a_2 A_2 + \dots + a_m A_m = 0 \quad (4.1)$$

onde os termos A são quantidades dimensionalmente equivalentes e os a são coeficientes numéricos (provavelmente ± 1) ou funções de produtos adimensionais.

No exemplo anterior tem-se:

$$s = ut + \frac{1}{2} gt^2$$

$$ut + \frac{1}{2} gt^2 - s = 0, \text{ que está na forma de (4.1)}$$

No entanto, é possível dividir a equação (4.1) por A_m , obtendo:

$$a_1 \frac{A_1}{A_m} + a_2 \frac{A_2}{A_m} + \dots + a_m = 0 \quad (4.2)$$

que expressa um relacionamento somente entre produtos adimensionais e coeficientes numéricos.

Continuando no mesmo exemplo tem-se:

$$\frac{ut}{s} + \frac{1}{2} \left(\frac{gt^2}{s} \right) - 1 = 0, \text{ que está na forma de (4.2)}$$

A equação (4.1) pode ser re-escrita da seguinte forma:

$$g(a_1, a_2, \dots, a_n) = 0 \tag{4.3}$$

Da mesma forma, a equação (4.2) pode ser apresentada como:

$$f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-r}) = 0 \tag{4.4}$$

onde os π_i representam os produtos adimensionais referidos no teorema de Buckingham.

4.7 O conceito de regimes

Como foi visto no item anterior, é possível representar uma equação dimensionalmente homogênea através de uma função de um conjunto completo de produtos de potências adimensionais, ou seja, na forma da equação (4.4) :

$$f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-r}) = 0$$

onde n representa o número de variáveis da equação e r representa o número de dimensões referenciais independentes.

Embora o teorema de Buckingham informe que é possível extrair $(n - r)$ produtos adimensionais associados a um fenômeno físico descrito por uma equação dimensionalmente homogênea, ele não indica o significado físico destes produtos.

Se for tomado como ponto de partida a expressão (4.4) e forem agregados alguns novos conceitos, então será possível estabelecer uma forma de extrair informações de caráter qualitativo do fenômeno físico estudado.

O método para a construção de um raciocínio qualitativo está sistematizado em [BHA 90] e [ROQ 91] e constitui-se dos conceitos e procedimentos descritos a seguir.

Denomina-se de *processo* ao conjunto de informações que descrevem um sistema físico sendo investigado. Formalmente, um *processo* será representado através de um conjunto de variáveis que descrevem o fenômeno físico e que obedecem o Princípio de Homogeneidade Dimensional apresentado em 4.5.

Como mencionado anteriormente, o teorema de Buckingham não fornece detalhes sobre a interpretação física dos produtos adimensionais abordados em seu postulado, porém se for possível garantir que estes produtos possam ser caracterizados pelo fato de que em sua formação exista apenas uma variável que não esteja no conjunto de variáveis de referência, poderemos, como ficará claro no texto adiante, realizar uma interpretação do significado físico das relações desta variável dependente com as variáveis de referência, auxiliando diretamente no raciocínio sobre o problema.

Os produtos adimensionais originados do teorema de Buckingham e que tenham como característica a presença de uma única variável que não faça parte do conjunto de variáveis de referência entre suas variáveis denominam-se de *regimes*. Portanto, um *regime* pode ser descrito como um funcional adimensional que possui, entre as variáveis que o compõem, apenas uma variável que não pertence ao conjunto de referência e

além disto, do ponto de vista de raciocínio qualitativo, poderemos atribuir um significado físico às relações entre suas variáveis.

A condição da presença de uma única variável na construção dos *regimes* é derivada de um teorema da análise combinatória proposto por [Hall 35].

Em um *processo* que contenha n variáveis podem ser selecionadas p variáveis que sejam de interesse analisar. Estas variáveis são chamadas de *variáveis de performance*, sendo representadas pela sigla p . As r variáveis restantes do conjunto devem, obrigatoriamente, constituir-se em um conjunto completo de variáveis de referência. Este conjunto completo de referência será chamado de *base* e deve atender as condições de um conjunto completo descrito em 4.4, ou seja:

- A) As suas representações dimensionais devem ser linearmente independentes;
- B) Todas as dimensões do processo devem estar incluídas.

Assim sendo, um conjunto de variáveis de *performance* poderá ser definido entre as variáveis do *processo*, desde que as variáveis restantes constituam-se em uma *base*.

Um conjunto de variáveis de *performance* e um conjunto *base* em um *processo* formam um conjunto, que passará a ser denominado de um *ensemble*. Se for possível formar mais de um subconjunto de variáveis de *performance* e de *base* em um mesmo *ensemble*, então diz-se que o *ensemble* tem mais de uma *representação*.

Agora, é possível pensar um *regime* como sendo um produto adimensional previsto no teorema de Buckingham e que de acordo com o teorema de Hall, sua composição possui apenas uma variável de *performance*, e as demais variáveis pertencem ao conjunto *base*.

4.8 Cálculo dos Regimes

Para ilustrar o método para cálculo de regimes será considerado o exemplo de um processo que descreve um regulador de pressão.

A função de um regulador de pressão é manter constante a pressão na sua saída. Podemos analisar este dispositivo como sendo composto de dois componentes - um cano com um orifício e uma válvula de mola (Fig 4.1). Cada um dos componentes pode ser representado por um *ensemble*.

Regulador de Pressão

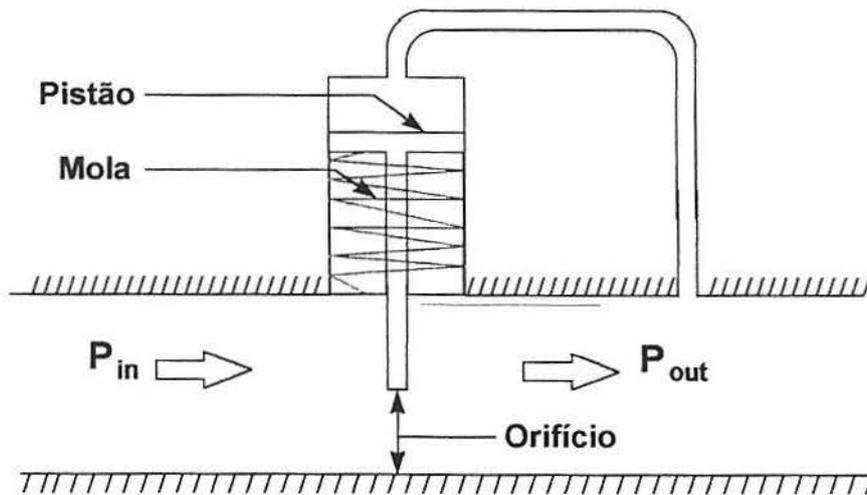


Figura 4.1 - Regulador de pressão

Primeiramente serão calculados os *regimes* para o *ensemble* do cano com orifício. As variáveis que compõem o *ensemble* estão descritas na tabela a seguir.

Tabela 4.1 - Ensemble do cano com orifício

Variável	Símbolo	M	L	T
Pressão de saída	P_{out}	1	-1	-2
Taxa de fluxo no orifício	Q	0	3	-1
Pressão na entrada	P_{in}	1	-1	-2
Abertura do orifício	A_{open}	0	2	0
Densidade do fluido	ρ	1	-3	0

Matriz Dimensional

O primeiro passo consiste na construção de uma matriz que chamaremos de *matriz dimensional (MD)*.

Cada variável identificada no problema será uma entrada em uma linha da *MD* e cada unidade associada às variáveis estará representada em uma das colunas e em cada célula estará a dimensão da variável em relação a respectiva unidade, conforme abaixo.

Tabela 4.2- Matriz dimensional do ensemble do cano com orifício

	M	L	T
P_{out}	1	-1	-2
Q	0	3	-1
P_{in}	1	-1	-2
A_{open}	0	2	0
ρ	1	-3	0

Cálculo do Número de Variáveis de Performance

Em segundo lugar, será identificado o número de variáveis de *performance* que o *ensemble* suporta, que de acordo com o que foi visto no item 4.7, será equivalente ao número de *regimes*, pois em cada *regime* haverá somente uma variável de *performance*.

Um *regime* é um caso especial dos produtos de potência adimensionais postulados nos teoremas de Buckingham, onde estamos estabelecendo obrigatoriamente a presença de uma única variável de *performance*.

Sejam os expoentes das variáveis P_{out} , Q , P_{in} , A_{open} e ρ denotados por α_1 , α_2 , α_3 , α_4 e α_5 , respectivamente.

Agora, é possível inserir na matriz MD a seguinte representação:

Tabela 4.3 - Matriz dimensional do ensemble do cano com orifício com expoentes incógnitas

	M	L	T
P_{out}	α_1	$-\alpha_1$	$-2\alpha_1$
Q	0	$3\alpha_2$	$-\alpha_2$
P_{in}	α_3	$-\alpha_3$	$-2\alpha_3$
A_{open}	0	$2\alpha_4$	0
ρ	α_5	$-3\alpha_5$	0

Qualquer que seja o produto de potências montado a partir das variáveis do *ensemble*, inclusive os *regimes*, deverão ter a soma das colunas igual a zero para que o produto seja adimensional em M, L e T .

A questão é melhor representada através do seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned}
 M: & \quad \alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_5 = 0 \\
 L: & \quad -\alpha_1 + 3\alpha_2 - \alpha_3 + 2\alpha_4 - 3\alpha_5 = 0 \\
 T: & \quad -2\alpha_1 - \alpha_2 - 2\alpha_3 = 0
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

Conforme o teorema de Buckingham, o número de produtos adimensionais, que no caso presente significam *regimes* e portanto também o número de variáveis de *performance*, pode ser obtido da diferença $(n-r)$, onde n representa o número de variáveis físicas do *ensemble* e r é o número mínimo de dimensões linearmente independentes (LI) a partir das quais as variáveis do processo possam ser expressadas, ou seja, que formam um conjunto *base*. Para obter com precisão o número de dimensões LI (r), será utilizado o resultado da teoria linear de equações que informa

que em um conjunto de equações, o número de variáveis independentes a partir das quais as demais são expressas, pode ser obtido através do posto (rank) da matriz associada ao conjunto de equações.

No caso presente, as equações que estão sendo referidas são as equações (4.5) geradas pela potenciação das variáveis para formar os *regimes* e a matriz é aquela associada a este conjunto, ou seja:

Tabela 4.4- Matriz de coeficientes do sistema de equações 4.5

1	0	1	0	1
-1	3	-1	2	-3
-2	-1	-2	0	0

No exemplo, $n=5$ e $r = 3$ e $p = (n-r) = (5-3) = 2$, logo existem dois *regimes* e podem ser escolhidos duas variáveis de *performance*.

Escolha das Variáveis de Performance

Agora que é sabido quantas variáveis de *performance* podem ser estabelecidas, cabe identificar quais são.

Conforme visto em 4.7, as variáveis de *performance* são aquelas variáveis de interesse, ou seja, as variáveis cujo comportamento no *processo* está se querendo analisar. Porém, a escolha deve ser tal que as variáveis restantes formem uma *base*.

Assim sendo, apesar da relativa liberdade em estabelecer quais são as variáveis de interesse, esta escolha está amarrada a condição de que as demais variáveis formem uma *base*, isto é, sejam LI e contenham todas as dimensões do *ensemble*.

No exemplo, serão usadas as variáveis P_{in} , A_{open} e ρ como uma *base* e Q e P_{out} como as variáveis de *performance*.

Cálculo dos Regimes

Para cada regime π_i é definido um produto de potência composto por uma variável de *performance* e as demais variáveis que compõem a *base*, de tal forma que o resultado seja um funcional adimensional.

$$\pi_i = y_i (x_1^{\alpha_{i1}} x_2^{\alpha_{i2}} \dots x_r^{\alpha_{ir}})$$

onde y_i é a variável de *performance* e $(x_1^{\alpha_{i1}} x_2^{\alpha_{i2}} \dots x_r^{\alpha_{ir}})$ são as variáveis de *base* e os coeficientes $\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{ir}$ são tais que π_i seja adimensional.

Escolhe-se o expoente da variável de performance igual a unidade a fim de facilitar futuro cálculo, não causando entretanto, perda de generalidade.

$$\pi_{e1} = Q (P_{in}^{\alpha_3} \cdot A_{open}^{\alpha_4} \cdot \rho^{\alpha_5})$$

Resolvendo para cada unidade, temos:

$$M: \alpha_3 + \alpha_5 = 0$$

$$L: 3 - \alpha_3 + 2 \alpha_4 - 3 \alpha_5 = 0 \rightarrow \alpha_3 - 2 \alpha_4 + 3 \alpha_5 = 3$$

$$T: -1 - 2\alpha_3 = 0 \rightarrow -2\alpha_3 = 1$$

$$\alpha_3 = -1/2, \alpha_4 = -1, \alpha_5 = +1/2$$

obtendo-se então:

$$\pi_{e1} = \frac{Q \rho^{1/2}}{A_{open} P_{in}^{1/2}}$$

Para o segundo *regime* tem-se:

$$\pi_{e2} = P_{out} (P_{in}^{\alpha_3} \cdot A_{open}^{\alpha_4} \cdot \rho^{\alpha_5})$$

Resolvendo para cada unidade, tem-se:

$$M: 1 + \alpha_3 + \alpha_5 = 0 \rightarrow \alpha_3 + \alpha_5 = -1$$

$$L: -1 - \alpha_3 + 2 \alpha_4 - 3 \alpha_5 = 0 \rightarrow \alpha_3 - 2 \alpha_4 + 3 \alpha_5 = -1$$

$$T: -2 - 2\alpha_3 = 0 \rightarrow -2\alpha_3 = 2$$

$$\alpha_3 = -1, \alpha_4 = 0, \alpha_5 = 0$$

obtem-se então:

$$\pi_{e2} = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

Agora os *regimes* serão calculados para o *ensemble* da válvula de mola.

As variáveis que compõem o *ensemble* estão descritas na tabela a seguir.

Tabela 4.5 - Ensemble da válvula de mola

Variável	Símbolo	M	L	T
Deslocamento da mola	x	0	1	0
Pressão no topo do pistão	P	1	-1	-2
Constante de elasticidade da mola	k	1	0	-2

Tabela 4.6 - Matriz dimensional do ensemble da válvula de mola

	M	L	T
x	0	1	0
P	1	-1	-2
k	1	0	-2

Cálculo do Número de Variáveis de Performance

$$n = 3, r = 2$$

$$p = (3-2) = 1$$

Escolha da Variáveis de Performance

Para variável de *performance* é escolhida a variável *x* e forma-se uma base com *P* e *k*.

Cálculo dos Regimes

$$\pi_{v1} = x (P^{\alpha_1} \cdot k^{\alpha_2})$$

Resolvendo para cada unidade, tem-se:

$$M: \alpha_2 + \alpha_3 = 0$$

$$L: 1 - \alpha_2 = 0$$

$$T: -2\alpha_2 - 2\alpha_3 = 0$$

$$\alpha_2 = 1, \alpha_3 = -1$$

obtem-se então:

$$\pi_{v1} = \frac{xP}{k}$$

4.9 Análise Qualitativa dos Regimes

Uma vez calculado os regimes podemos estabelecer três tipos de análises:

- *Análise intra-regime* : Examinamos como as variáveis internamente em um regime se relacionam uma com as outras;
- *Análise inter-regime*: Examinamos como diferentes regimes se relacionam entre si;
- *Análise inter-ensemble*: Examinamos o relacionamento entre ensembles distintos.

4.9.1 Análise intra-regime

A análise intra-regime é feita a partir da aplicação da *derivada parcial qualitativa* da variável de *performance* com respeito a cada uma das variáveis de base, mantendo as demais variáveis de *base* fixas, conforme definidas em 2.2.1. A obtenção destas *derivadas parciais qualitativas* é mostrada a seguir.

Considerando que o regime foi denotado através da expressão

$$\pi_i = y_i(x_1^{\alpha_{i1}} x_2^{\alpha_{i2}} \dots x_r^{\alpha_{ir}})$$

onde y_i é a variável de *performance* e $(x_1^{\alpha_{i1}} x_2^{\alpha_{i2}} \dots x_r^{\alpha_{ir}})$ são as variáveis de base e os coeficientes $\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{ir}$ são tais que π_i seja adimensional, então a variável de *performance* pode ser expressa na forma de um produto, ou seja:

$$y_i = \pi_i (x_1^{-\alpha_{i1}} x_2^{-\alpha_{i2}} \dots x_r^{-\alpha_{ir}})$$

e agora a expressão de uma *derivada parcial* intra-regime pode ser obtida da seguinte forma:

$$\frac{\partial y_i}{\partial x_j} = \frac{-\alpha_{ij} y_i}{x_j}$$

Sabendo o sinal do expoente α_{ij} , obtem-se uma noção qualitativa da *derivada parcial*, isto é:

$$\partial_s [y_i]^{x_j} = \frac{-\alpha_{ij}}{|\alpha_{ij}|} = \pm 1$$

Executando uma análise *intra-regime* no último exemplo do regulador de pressão, tem-se:

Para o *ensemble* do cano com orifício

$$\pi_{c1} = \frac{Q\rho^{1/2}}{A_{open} P_{in}^{1/2}}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial P_{in}} > 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial A_{open}} > 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \rho} < 0$$

A interpretação das parciais qualitativa anteriores é a seguinte:

- Um aumento da pressão de entrada ($\Delta P_{in} > 0$), ocasionará um aumento da taxa de fluxo do fluido ($\Delta Q > 0$). Se desejarmos ser mais precisos, podemos afirmar que um aumento na potência $1/2$ de P_{in} ocasionará o aumento em Q na potência 1.
- Um aumento na área do orifício ($\Delta A_{open} > 0$), ocasionará um aumento da taxa de fluxo do fluido ($\Delta Q > 0$).
- Um aumento na densidade do fluido ($\Delta \rho > 0$) na potência $1/2$, ocasionará uma diminuição da taxa de fluxo do fluido ($\Delta Q < 0$).

Para o segundo regime do *ensemble* tem-se:

$$\pi_{c2} = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

$$\frac{\partial P_{out}}{\partial P_{in}} > 0$$

- Um aumento da pressão de entrada ($\Delta P_{in} > 0$), ocasionará um aumento da pressão de saída ($\Delta P_{out} > 0$).

Para o *ensemble* da válvula de mola

$$\pi_{v1} = \frac{xP}{k}$$

$$\frac{\partial x}{\partial k} > 0$$

$$\frac{\partial x}{\partial P} < 0$$

- Um aumento na constante de elasticidade da mola ($\Delta k > 0$), ocasionará um aumento do deslocamento da mola ($\Delta x > 0$).
- Um aumento na pressão do topo do pistão ($\Delta P > 0$), ocasionará uma diminuição do deslocamento da mola ($\Delta x < 0$).

4.9.2 Análise inter-Regime

Em um *ensemble* podem existir variáveis de *base* que são comuns a dois ou mais regimes. Estas variáveis comuns (ou linearmente dependentes entre si), são denominadas de variáveis de *contato*.

A análise inter-regime estabelece um relacionamento entre duas variáveis de *performance* de regimes distintos que compartilham a mesma variável de *contato*.

A notação para as derivadas parciais que caracterizam a análise inter-regime é derivada do seguinte desenvolvimento:

Dados dois regimes π_i e π_j podem ser derivadas as seguintes parciais:

$$y_i = \pi_i x^{\alpha_{ic}} (x_1^{-\alpha_{i1}} x_2^{-\alpha_{i2}} \dots x_{r-1}^{-\alpha_{ir-1}})$$

$$y_j = \pi_j x^{\alpha_{jc}} (x_1^{-\alpha_{j1}} x_2^{-\alpha_{j2}} \dots x_{r-1}^{-\alpha_{jr-1}})$$

onde x_c é a variável de *contato* e y_i e y_j são as variáveis de *performance* dos regimes π_i e π_j , respectivamente.

Então a *derivada qualitativa parcial* inter-regime é a razão:

$$\left[\frac{\left(\frac{\partial y_i}{\partial x_c} \right)}{\left(\frac{\partial y_j}{\partial x_c} \right)} \right]$$

ou

$$\left[\frac{\partial y_i}{\partial y_j} \right]^{x_c} = \frac{\alpha_{ic} y_i}{\alpha_{ij} y_j}$$

onde $]^{x_c}$ denota o fato de que as variáveis de *performance* foram derivadas parcialmente em relação à variável de *contato* x_c , mantida as demais variáveis da *base* constantes.

No exemplo do regulador de pressão, onde foram identificados no *ensemble* do cano com orifício dois regimes, tem-se a seguinte análise inter-regime:

$$\pi_{c1} = \frac{Q \rho^{1/2}}{A_{open} P_{in}^{1/2}}$$

$$\pi_{c2} = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

$$\left[\frac{\partial P_{out} / \partial P_{in}}{\partial Q / \partial P_{in}} \right] = \left[\frac{\partial P_{out}}{\partial Q} \right]^{P_{in}} > 0$$

De onde concluí-se que um aumento na taxa do fluxo ($\Delta Q > 0$) devido a uma alteração na pressão de entrada (P_{in}) e mantidas as demais variáveis de *base* constantes, ocasionará um aumento na pressão de saída ($\Delta P_{out} > 0$).

4.9.3 Análise Inter-Ensemble

Quando duas variáveis de ensembles diferentes são dimensionalmente linearmente dependentes, surge a possibilidade de construir um regime que acopla os dois ensembles. Este regime é chamado de *regime de acoplamento* e permite que seja estabelecido um raciocínio através de ensembles.

A análise inter-ensemble permite analisar o comportamento geral de um sistema composto por mais de um dispositivo.

Para se proceder à análise, deve-se primeiramente construir o *regime de acoplamento*, que conforme foi dito anteriormente, é especificado através de duas variáveis dimensionalmente linearmente dependentes. Assim dado o seguinte *regime de acoplamento*

$$\pi_{AB} = \frac{y_{A_i}}{y_{B_j}^\alpha}$$

onde AB denota o *regime de acoplamento* entre os ensembles A e B, y_{A_i} e y_{B_j} são duas variáveis dimensionalmente linearmente dependentes e α é coeficiente que estabelece a não linearidade dimensional das variáveis, dada pela relação

$$[y_{A_i}] = [y_{B_j}]^\alpha$$

Assim a expressão da análise inter-ensemble é dada pela parcial da variável y_{A_i} com respeito a y_{B_j} , isto é :

$$\left[\frac{\partial y_{A_i}}{\partial y_{B_j}} \right]^{\pi_{AB}} = \alpha \frac{y_{A_i}}{y_{B_j}}$$

No exemplo do regulador de pressão, é possível construir um *regime de acoplamento* que traduza a conexão entre os *ensembles* do cano com orifício e a válvula com mola.

Os regimes de acoplamentos obtidos são:

$$\pi_{cv1} = \frac{P}{P_{out}}$$

$$\pi_{cv2} = \frac{P_{in}}{P}$$

$$\pi_{cv3} = \frac{A_{open}}{x^2}$$

com as seguintes derivadas qualitativas

$$\frac{\partial P}{\partial P_{out}} > 0$$

$$\frac{\partial P_{in}}{\partial P} > 0$$

$$\frac{\partial A_{open}}{\partial x} > 0$$

Estas informações permitem concluir que um aumento na pressão de saída irá gerar um aumento na pressão no topo do pistão. Enquanto que um aumento na pressão do topo do pistão ocasionará um aumento na pressão de entrada.

O último regime fornece uma informação de caráter geométrico, ou seja, um aumento no deslocamento da mola, implicará em um aumento na área do orifício.

4.9.4 Análise Qualitativa do Processo

Reunindo todas as informações aplicadas ao exemplo do regulador de pressão, é possível estabelecer o seguinte raciocínio:

Um aumento da pressão de entrada P_{in} implicará, segundo o regime $\pi_{c2} = P_{out}/P_{in}$, em um aumento na pressão de saída P_{out} . Porém um aumento em P_{out} implicará em um aumento em P , conforme o regime de contato $\pi_{cv1} = P / P_{out}$. Um aumento em P implica em uma diminuição no deslocamento da mola, conforme visto no regime $\pi_{v1} = x P / k$. A diminuição em x leva a uma diminuição na área do orifício, conforme o regime de acoplamento $\pi_{cv3} = A_{open} / x^2$. Agora, uma diminuição na área do orifício

ocasiona uma diminuição na taxa de fluxo do líquido, conforme o regime $\pi_{c1} = Q\rho^{1/2} / A_{open} \cdot P_{in}^{1/2}$. Finalmente, através da análise inter-regime, verificamos que uma diminuição em Q ocasiona uma diminuição em P_{out} , visto que $[\partial P_{out} / \partial Q]^{pin} > 0$.

Assim, obtém-se o comportamento de retroalimentação do dispositivo, ou seja, quando é detectado um aumento de pressão na entrada, o sistema, após elevar a pressão de saída em um primeiro momento, acaba ao final da cadeia de acontecimentos respondendo com a diminuição da pressão na saída.

4.9.5 Caráter Algorítmico da Análise de Regimes

O cálculo e a subsequente análise dos regimes obedecem a um método bastante definido conforme visto nos passos descritos nos itens anteriores.

Os resultados quantitativos obtidos em cada passo, bem como a apresentação do raciocínio através de *derivadas parciais* podem ser codificados em uma linguagem de programação, preferencialmente uma linguagem que manipule cálculos algébricos.

Em [ROQ 91] é apresentado o sistema QDR, onde o Raciocínio Qualitativo através da Análise de Regime é automatizado, utilizando na sua construção todos os conceitos de análise intra, inter-regime e inter-ensemble. A implementação do sistema foi feita utilizando-se da linguagem REDUCE.

5. Análise de Regimes como Ferramenta de Raciocínio Qualitativo

A fim de demonstrar a utilização da Análise de Regimes como uma alternativa eficaz para a elaboração de *Raciocínio Qualitativo* sobre o comportamento de sistemas dinâmicos, a metodologia será demonstrada através da modelagem de um sistema real de ar condicionado central .

Será utilizado um modelo simples do sistema de ar condicionado central instalado no prédio da Cia. de Processamento de Dados do estado do Rio Grande do Sul (Procergs).

Este sistema foi escolhido pelo fato de representar um sistema físico com vários componentes eletromecânicos acoplados, o que permitirá avaliar de forma realista a utilização da ferramenta .

Outro aspecto importante consiste no fato de que tal sistema exige o acompanhamento constante de engenheiros e técnicos para sua manutenção. Durante este trabalho de manutenção os técnicos devem tomar decisões com base em informações disponíveis a respeito das variáveis físicas presentes no momento.

Este cenário parece ser apropriado para a aplicação das técnicas de *Raciocínio Qualitativo*.

5.1 Sistema de Ar Condicionado Central

Utilizando uma abordagem global, o sistema de ar condicionado central pode ser visto como três circuitos independentes integrados através de trocadores de calor.

O circuito que será denominado de circuito de água gelada (AG) é um circuito fechado que encarrega-se de retirar o calor do ar ambiental interno do prédio através de trocadores de calor do tipo Fan Coil.

O calor absorvido do ar ambiental interno pela água gelada é repassado, por sua vez, para o evaporador do circuito frigorígeno.

O circuito frigorígeno é constituído basicamente por dois trocadores de calor (evaporador e condensador) e um compressor tipo centrífugo que encarrega-se de circular o refrigerante Freon 11 entre os trocadores.

O calor absorvido pelo gás Freon 11 do circuito de água gelada no evaporador é transferido, no condensador, para o circuito de água de condensação (AC).

O circuito AC é, ao contrário do circuito AG, um circuito aberto. A sua função é retirar o calor, no condensador, do gás refrigerante e transferi-lo para o ambiente externo através da água de condensação.

A transferência de calor da água para o ar do ambiente externo ocorre nas torres de arrefecimento, quando a água cai em queda livre.

Um esquema geral do sistema pode ser visto na figura 5.1.

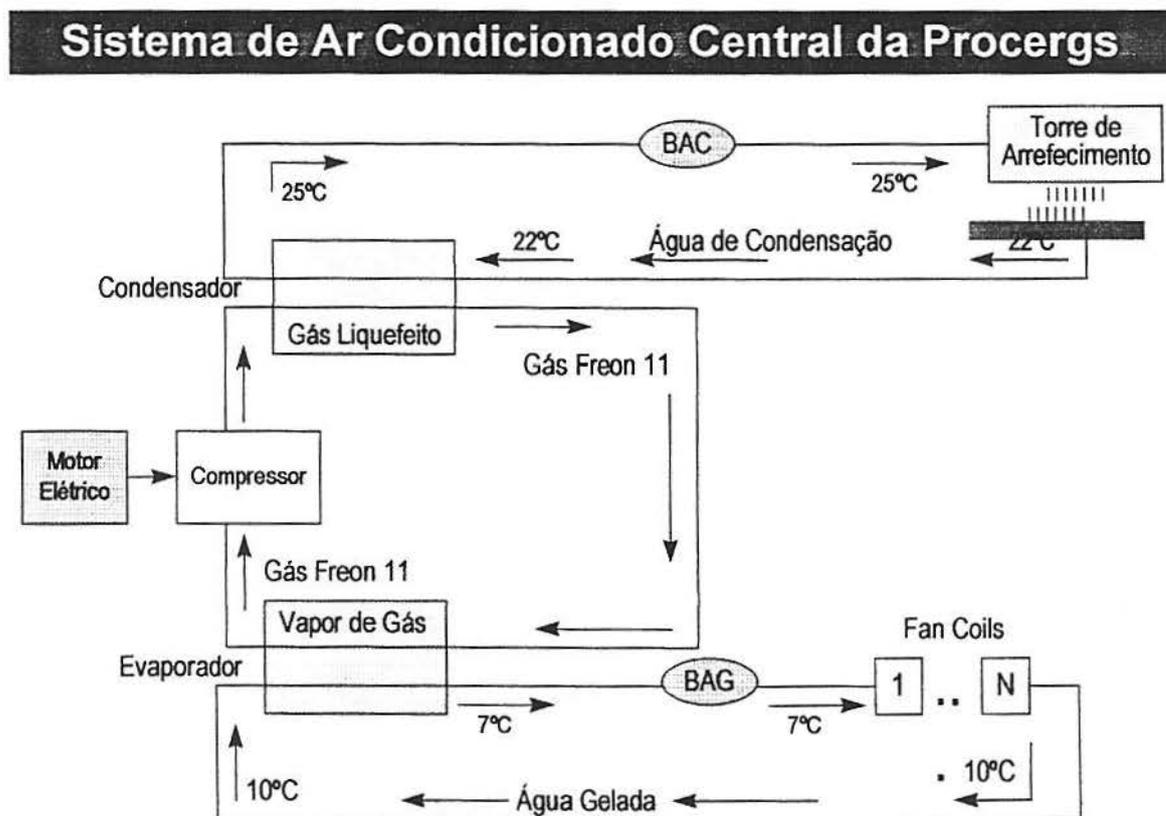


Figura 5.1 - Esquema geral do sistema de ar condicionado central da Procergs

5.1.1 Circuito AG

Os principais componentes do circuito AG são duas bombas de água gelada (BAG), um conjunto de trocadores térmicos do tipo Fan Coils e a câmara de baixa pressão do circuito frigorígeno (Evaporador).

As bombas BAG fazem circular água gelada, ou seja, a uma temperatura inferior à temperatura do ambiente interno do prédio.

Os trocadores térmicos (Fan Coils) são formados por serpentinas com tubulações de cobre em cujo interior circula a água gelada e em suas paredes externas circula o ar presente no prédio e que está a uma temperatura superior a da água.

Tendo em vista a existência do gradiente de temperatura entre o ar do interior do prédio e a água gelada processa-se uma troca térmica nos Fan Coils, fazendo com que a temperatura do ar diminua e a da água aumente.

A água gelada, agora com temperatura superior àquela que possuía antes de receber a carga térmica proveniente do ar interno do prédio, continua a circular após passar pelos Fan Coils até chegar ao evaporador .

O evaporador é constituído de dutos de cobre em cujo interior circula a água gelada descrita anteriormente. Externamente aos dutos (porém ainda no interior da câmara) circula o gás FREON11 que pelo fato de ser submetido à baixa pressão passa ao estado de vapor.

A passagem para o estado de vapor provoca a ocorrência de uma troca térmica entre a água que circula dentro dos dutos e o gás. O resultado é que a água perde energia térmica e retorna ao circuito AG com temperatura inferior aquela que possuía quando entrou no evaporador.

A partir deste ponto o vapor de FREON11 é succionado pela ação de um compressor, sendo então comprimido no condensador.

5.1.2 Circuito AC

Os principais componentes do circuito AC são duas bombas de água de condensação, a torre de arrefecimento e o condensador.

No interior do condensador existem dutos nos quais circula a água impulsionada pela bomba de água condensação (BAC). Exteriormente aos dutos, (porém no interior do condensador) circula o gás FREON11 que ao ser submetido a alta pressão se liquefaz.

O gás, ao se liquefazer, libera calor provocando uma troca térmica, onde há perda de energia para a água de condensação fazendo com que haja uma elevação na temperatura da mesma. Em outras palavras, ao sair do condensador, a água possui uma temperatura maior do que aquela que tinha ao entrar.

Para simplificar o problema serão desconsideradas as perdas do processo, permitindo afirmar que a energia térmica entregue pelo gás à água de condensação é a energia retirada anteriormente da água gelada no circuito AG, que por sua vez havia retirado energia térmica do ar do interior do prédio.

A água de condensação ao sair do condensador é impulsionada pelas bombas de condensação (BAC) em direção às torres de arrefecimento na parte exterior do prédio.

Ao chegar no topo da torre, a água é distribuída em queda livre em direção aos coletores que a introduzem novamente no circuito AC.

A troca térmica que ocorre nas torres de arrefecimento, acontece de 2 maneiras básicas:

- Durante a queda, as partículas de água enfrentam o atrito do ar do meio ambiente, fazendo com que parte de suas moléculas se desprendam e passem para o estado de vapor absorvendo calor das moléculas que ainda continuam em estado líquido.

- Quando a temperatura do ar externo é menor do que a temperatura da água, existe a troca térmica entre estes por simples condução de calor.

A água de condensação, agora com temperatura inferior àquela que possuía ao entrar na torre de arrefecimento, é coletada e direcionada novamente para a câmara de condensação.

Assim, como foi possível verificar, o processo de refrigeração consiste de forma resumida nas seguintes etapas:

1. Retirar o calor do ar interno do prédio, transferindo para água gelada que circula nos FAN COILS,
2. Retirar o calor da água gelada que ingressa no evaporador, transferindo para o vapor de FREON11;
3. Retirar o calor do gás FREON11 que é liqüefeito no condensador, transferindo para a água de condensação ;
4. Retirar o calor da água de condensação que sai da câmara de alta pressão (condensador) e é enviada as torres de arrefecimento, transferindo para o ar externo.

5.2 Modelo Qualitativo

Para modelar os componentes do Sistema de Ar Condicionado Central é preciso conhecer as variáveis físicas representativas do processo de refrigeração.

Conforme definido no item 4.7, um *ensemble* é constituído de um conjunto de variáveis de *performance* e um conjunto de variáveis de *base*, ou seja, é a representação de uma parte ou de todo o processo físico que desejamos estudar.

A fim de representar o conjunto de variáveis de todo o *processo* de refrigeração, optou-se por modelar o sistema utilizando os seguintes *ensembles*:

1. *Ensemble* representativo da troca térmica que ocorre com a água e o ar interno do prédio. Este processo ocorre nos fan coils.

2. *Ensemble* representativo da troca térmica que acontece com a água quando ela circula no interior do evaporador. Falando em termos de componentes mecânicos estamos representando a parte do circuito de água gelada que se encontra dentro do evaporador.

3. *Ensemble* representativo da troca térmica que acontece com o gás Freon 11 quando ele circula no interior do evaporador. O componente mecânico representado é a câmara de baixa pressão do evaporador.

4. *Ensemble* representativo da troca térmica que acontece com o gás Freon 11 quando ele circula no interior do condensador. O componente mecânico representado é a câmara de alta pressão do condensador.

5. *Ensemble* representativo da troca térmica que acontece com a água quando ela circula no interior do condensador. Falando em termos de componentes mecânicos estamos representando a parte do circuito de água de condensação que se encontra dentro do condensador.

6. *Ensemble* representativo da troca térmica que ocorre com a água e o ar externo ao prédio. Este processo ocorre na torre de arrefecimento.

Uma vez modelados cada *ensemble* é possível fazer uma análise, identificando quais as influências sofridas pelas variáveis físicas escolhidas como variáveis de *performance* a partir das demais variáveis definidas como variáveis de *base* em um dado *regime* (análise intra-regime) e entre *regimes* do mesmo *ensemble* (análise inter-regime).

Posteriormente, será estabelecido uma análise inter-ensemble, a fim de verificar a influência das variáveis de um *ensemble* sobre outro.

5.2.1 Ensemble 1: Modelando a Troca Térmica da Água nos Fan Coils

As variáveis representativas da troca térmica que ocorre nos fan coils são as seguintes:

<i>Aumento da temperatura da água gelada no fan coil</i>	T_{agf}	Θ
<i>Calor específico da água</i>	C_{ca}	$L^2T^{-2}\Theta^{-1}$
<i>Fluxo da água gelada</i>	F_{ag}	MT^{-1}
<i>Taxa de transferência de calor do ar interno do prédio para a água gelada</i>	Q_{int}	ML^2T^{-3}

Troca Térmica no Fain Coil

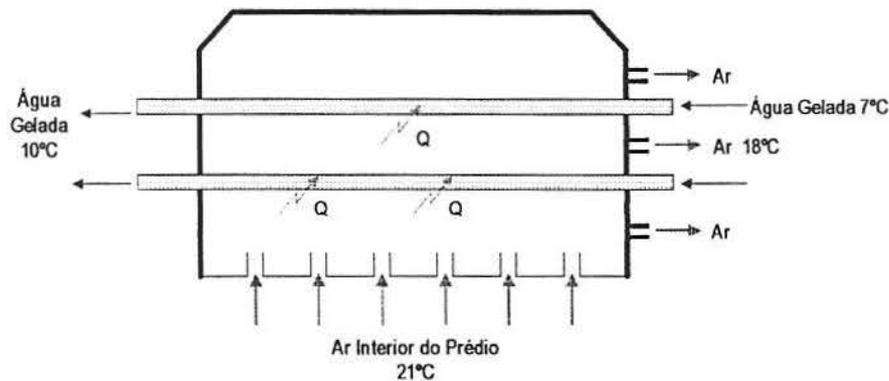


Figura 5.2 - Troca térmica no fan coil

A seguir será aplicado o mesmo método de cálculo de *regimes* proposto em 4.8.

1. Matriz Dimensional

Tabela 5.1 - Matriz dimensional do ensemble do fan coil

	M	L	T	Θ
T_{agf}	0	0	0	1
C_{ea}	0	2	-2	-1
F_{ag}	1	0	-1	0
Q_{int}	1	2	-3	0

2. Cálculo do número de variáveis de Performance

O posto da matriz acima é igual a 3, ou seja, $r = 3$.

Assim sendo, o número de variáveis de performance (p) é dado por:

$$n = 4 \quad (T_{agf}, C_{ea}, F_{ag}, Q_{int})$$

$$r = 3$$

$$p = (n - r) = 1$$

3. Escolha da variável de Performance.

Utilizaremos o aumento da temperatura (T_{agf}) como a variável de *performance* e as demais variáveis (C_{ea} , F_{ag} , Q_{int}) para formar a *base*.

4. Cálculo dos Regimes

$$\pi_{T_{agf}} = T_{agf} (C_{ea}^{\alpha_1} F_{ag}^{\alpha_2} Q_{int}^{\alpha_3})$$

Resolvendo para cada unidade temos:

$$M : \alpha_2 + \alpha_3 = 0$$

$$L : 2\alpha_1 + 2\alpha_3 = 0$$

$$T : -2\alpha_1 - \alpha_2 - 3\alpha_3 = 0$$

$$\Theta : 1 - \alpha_1 = 0$$

Resolvendo o sistema, obtemos:

$$\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 1, \alpha_3 = -1$$

e assim o *regime* tem a seguinte expressão:

$$\pi_{T_{agf}} = \frac{T_{agf} C_{ea} F_{ag}}{Q_{int}}$$

Os sinais indicados pela *derivadas qualitativas* do processo são:

$$\frac{\partial T_{agf}}{\partial Q_{int}} > 0;$$

$$\frac{\partial T_{agf}}{\partial F_{ag}} < 0;$$

Analisando as *derivadas qualitativas*, pode-se inferir, por exemplo, que a medida que a troca térmica entre a água e o ar do ambiente interno do prédio cresce (Q_{int}), também é acentuado o aumento de temperatura no circuito de água gelada (T_{agf}). Tudo isto assumindo que as demais variáveis se mantêm constantes, ou seja, o fluxo de água e o calor específico da água.

Por outro lado, assumindo o calor específico da água e a troca térmica constantes, pode-se inferir que a medida que o fluxo de água cresce, diminui o acréscimo de temperatura da água que circula no fan coil, ou seja, diminui a diferença de temperatura entre a entrada e saída da água do fan coil.

5.2.2 Ensemble 2: Modelando a Troca Térmica da Água no Evaporador

Este *ensemble* é representado pelas seguintes variáveis físicas :

Queda de temperatura da água gelada
no evaporador

$$T_{age} \quad \Theta$$

Calor específico da água

$$C_{ea} \quad L^2T^{-2}\Theta^{-1}$$

Fluxo da água gelada

$$F_{ag} \quad MT^{-1}$$

Taxa de transferência de calor da água gelada
para o gás do evaporador

$$Q_{age} \quad ML^2T^{-3}$$

Troca Térmica no Evaporador

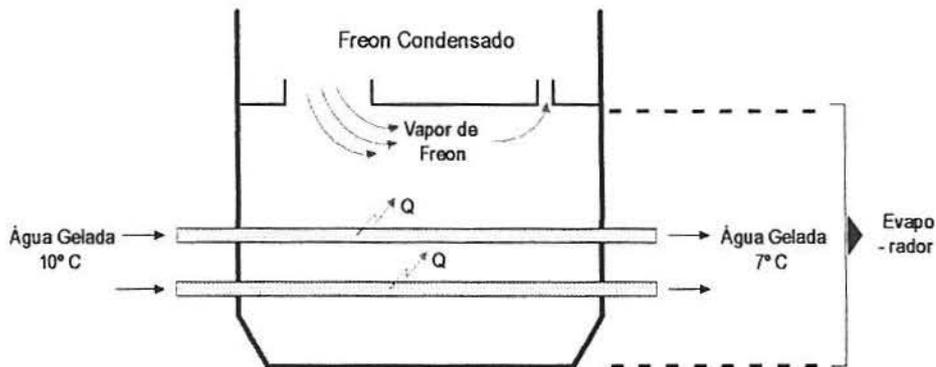


Figura 5.3 - Troca térmica no evaporador

As variáveis que caracterizam este *ensemble* são equivalentes às utilizadas no *ensemble* representante da troca térmica ocorrida nos fan coils, porque se trata essencialmente do mesmo processo, ou seja, enquanto no fan coil o circuito de água gelada está absorvendo calor do ar interno, aqui ele está transferindo este calor para o gás no evaporador. Portanto, do ponto de vista da água as mesmas variáveis são consideradas, porém com significado físico próprio ao *ensemble* em questão.

Evidentemente que muitas outras variáveis estão envolvidas no processo, porém a utilização de um determinado conjunto de variáveis é ditado pelo grau de detalhamento

que queremos aplicar a nossa análise e quais aspectos nos interessa avaliar. Por exemplo, não foram considerados os elementos de geometria da superfície onde ocorre a troca térmica e problemas de isolamento.

A variável de calor específico é utilizada para modelar a propriedade física inerente ao líquido e que influencia diretamente nas transferências de calor entre a água e o gás.

1. Matriz Dimensional

Tabela 5.2 - Matriz dimensional do ensemble troca térmica no evaporador

	M	L	T	Θ
T_{age}	0	0	0	1
C_{ea}	0	2	-2	-1
F_{ag}	1	0	-1	0
Q_{age}	1	2	-3	0

2. Cálculo do número de variáveis de Performance

O posto da matriz acima é igual a 3, ou seja, $r = 3$.

Assim sendo, o número de variáveis de performance (p) é dado por:

$$n = 4 \quad (T_{age}, C_{ea}, F_{ag}, Q_{age})$$

$$r = 3$$

$$p = (n - r) = 1$$

3. Escolha da variável de Performance.

Utilizando a queda de temperatura da água gelada (T_{age}) como variável de performance e as demais variáveis (C_{ea}, F_{ag}, Q_{age}) para formar a base.

4. Cálculo dos Regimes

$$\pi_{T_{age}} = T_{age} (C_{ea}^{\alpha_1} F_{ag}^{\alpha_2} Q_{age}^{\alpha_3})$$

Resolvendo para cada unidade temos:

$$M : \alpha_2 + \alpha_3 = 0$$

$$L : 2\alpha_1 + 2\alpha_3 = 0$$

$$T : -2\alpha_1 - \alpha_2 - 3\alpha_3 = 0$$

$$\Theta : 1 - \alpha_1 = 0$$

Resolvendo o sistema, obtemos:

$$\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 1, \alpha_3 = -1$$

e assim o *regime* tem a seguinte expressão:

$$\pi_{T_{age}} = \frac{T_{age} C_{ea} F_{ag}}{Q_{age}}$$

5.2.3 Ensemble 3: Modelando a Troca Térmica do Gás Freon 11 no Evaporador

As variáveis escolhidas como sendo representativas deste processo são as seguintes:

Pressão do freon no evaporador	P_{fe}	$ML^{-1}T^{-2}$
Calor latente de evaporação do gás	L_e	L^2T^{-2}
Taxa resultante de transferência térmica para o freon no evaporador	Q_{fe}	ML^2T^{-3}
Área de transferência térmica	A_{fe}	L^2

Importante observar que este *ensemble*, possui dois outros ensembles vizinhos, que são o circuito de água gelada e o gás no condensador (próximo *ensemble* a ser examinado). Assim, a taxa de transferência térmica para o gás do evaporador (Q_{ge})

consiste absorção de calor da água gelada menos a energia transferida para o *ensemble* do condensador.

1. Matriz Dimensional

Tabela 5.3 - Matriz dimensional do ensemble troca térmica no gás do evaporador

	M	L	T
P_{fe}	1	-1	-2
L_e	0	2	-2
Q_{fe}	1	2	-3
A_{fe}	0	2	0

2. Cálculo do número de variáveis de Performance

O posto da matriz acima é igual a 3, ou seja, $r = 3$.

Assim sendo, o número de variáveis de performance (p) é dado por:

$$n = 4 \text{ (} P_{fe}, L_e, Q_{fe}, A_{fe} \text{)}$$

$$r = 3$$

$$p = (n - r) = 1$$

3. Escolha da variável de Performance.

Utilizando a pressão do freon (P_{fe}) como a variável de *performance* e as demais variáveis (L_e, Q_{fe}, A_{fe}) para formar a *base*.

4. Cálculo do Regime

$$\pi_{P_{fe}} = P_{fe} (L_e^{\alpha_1} Q_{fe}^{\alpha_2} A_{fe}^{\alpha_3})$$

Resolvendo para cada unidade tem-se:

$$M : 1 + \alpha_2 = 0$$

$$L : -1 + 2\alpha_1 + 2\alpha_2 + 3\alpha_3 = 0$$

$$T : -2 - 2\alpha_1 - 3\alpha_2 = 0$$

Resolvendo o sistema, obtém-se:

$$\alpha_1 = 1/2, \alpha_2 = -1, \alpha_3 = 1$$

e assim o *regime* tem a seguinte expressão:

$$\pi_{P_{fe}} = \frac{P_{fe} L_e^{1/2} A_{fe}}{Q_{fe}}$$

A derivada parcial qualitativa em relação à variável Q_{fe} é a seguinte:

$$\frac{\partial P_{fe}}{\partial Q_{fe}} > 0$$

Assumindo que A_{fe} e L_e se mantêm constantes, a análise intra-regime permite raciocinar que a medida que aumenta a quantidade de calor total no interior do evaporador (calor absorvido da água gelada menos o calor transferido para o condensador), então aumenta a pressão do gás P_{fe} .

Considerando que há uma troca de estado do gás, optou-se por utilizar o calor latente como variável representativa ao invés do calor específico.

5.2.4 Ensemble 4: Modelando a Troca Térmica do Gás Freon 11 no Condensador

Conforme já visto na descrição do processo, a troca térmica do gás no condensador é um processo “simétrico” ao que ocorre com o gás no evaporador

Por esta razão, as variáveis que caracterizam este *ensemble* são equivalentes aquelas utilizadas para descrever o *ensemble* de troca térmica do gás no evaporador, ou seja:

<i>Pressão do freon no condensador</i>	P_{fc}	$ML^{-1}T^{-2}$
<i>Calor latente de condensação do gás</i>	L_e	L^2T^{-2}
<i>Taxa resultante de transferência térmica para o freon no condensador</i>	Q_{fc}	ML^2T^{-3}

Troca Térmica no Condensador

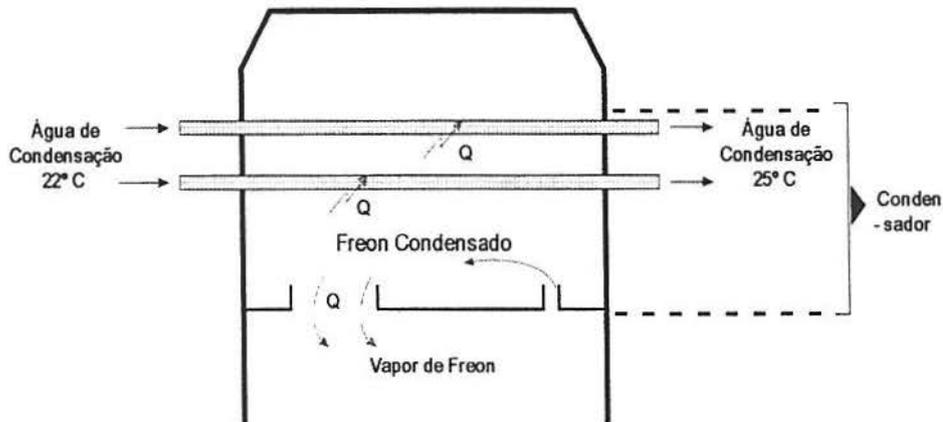


Figura 5.4 - Troca térmica no condensador

Neste caso os *ensembles* vizinhos são o gás no evaporador e o circuito de água de condensação (próximo *ensemble* a ser examinado). Assim, a taxa de transferência térmica para o freon do condensador (Q_{fc}) consiste na absorção de calor do vapor de freon advindo da câmara de baixa pressão (evaporador) menos a energia transferida para o *ensemble* do circuito de água de condensação.

1. Matriz Dimensional

Tabela 5.4 - Matriz dimensional da troca térmica do gás no condensador

	M	L	T
P_{fc}	1	-1	-2
L_c	0	2	-2
Q_{fc}	1	2	-3
A_{fc}	0	2	0

2. Cálculo do número de variáveis de Performance

O posto da matriz acima é igual a 3, ou seja, $r = 3$.

Assim sendo, o número de variáveis de performance (p) é dado por:

$$n = 4 \text{ (} P_{fc}, L_c, Q_{fc}, A_{fc} \text{)}$$

$$r = 3$$

$$p = (n - r) = 1$$

3. Escolha da variável de Performance.

Será utilizado a pressão do gás (P_{gc}) como a variável de *performance* e as demais variáveis (L_c, Q_{fc}, A_{fc}) para formar a *base*.

4. Cálculo do Regime

$$\pi_{P_{fc}} = P_{fc} (L_c^{\alpha_1} Q_{fc}^{\alpha_2} A_{fc}^{\alpha_3})$$

Resolvendo para cada unidade temos:

$$M : 1 + \alpha_2 = 0$$

$$L : -1 + 2\alpha_1 + 2\alpha_2 + 3\alpha_3 = 0$$

$$T : -2 - 2\alpha_1 - 3\alpha_2 = 0$$

Resolvendo o sistema, obtem-se:

$$\alpha_1 = 1/2, \alpha_2 = -1, \alpha_3 = 1$$

e assim o *regime* tem a seguinte expressão:

$$\pi_{P_{fc}} = \frac{P_{fc} L_c^{1/2} A_{fc}}{Q_{fc}}$$

A derivada parcial qualitativa em relação a variável Q_{fc} é a seguinte:

$$\frac{\partial P_{fc}}{\partial Q_{fc}} > 0$$

Assumindo que A_{fc} e L_c se mantêm constantes, pela análise intra-regime é possível raciocinar que a medida que diminui a quantidade de calor total no interior do condensador (calor absorvido do vapor de freon vindo do evaporador menos o calor transferido para o circuito de água de condensação), então diminui a pressão do gás P_{fc}

5.2.5 Ensemble 5: Modelando a Troca Térmica da Água no Condensador

Da mesma forma que o *ensemble* do gás no condensador é um simétrico do *ensemble* do gás no evaporador, a troca que ocorre com a água de condensação repete o processo do que ocorre com a água do circuito de água gelada, porém absorvendo calor do condensador ao invés de perder calor para o evaporador como ocorre com o seu simétrico.

Este *ensemble* é representado pelas seguintes variáveis físicas :

<i>Aumento da temperatura da água de condensação no condensador</i>	T_{acc}	Θ
<i>Calor específico da água</i>	C_{ea}	$L^2T^{-2}\Theta^{-1}$
<i>Fluxo da água de condensação</i>	F_{ac}	MT^{-1}
<i>Taxa de transferência de calor do freon para a água de condensação no condensador</i>	Q_{acc}	ML^2T^{-3}

1. Matriz Dimensional

Tabela 5.5 - Matriz dimensional do ensemble da água no condensador

	M	L	T	Θ
T_{acc}	0	0	0	1
C_{ea}	0	2	-2	-1
F_{ac}	1	0	-1	0
Q_{acc}	1	2	-3	0

2. Cálculo do número de variáveis de Performance

O posto da matriz acima é igual a 3, ou seja, $r = 3$.

Assim sendo, o número de variáveis de performance (p) é dado por:

$$n = 4 \quad (T_{acc}, C_{ea}, F_{ac}, Q_{acc})$$

$$r = 3$$

$$p = (n - r) = 1$$

3. Escolha da variável de Performance.

A taxa de transferência térmica do freon para a água de condensação será utilizada como variável de *performance* e as demais variáveis (T_{acc} , C_{ea} , F_{ac}) para formar a *base*.

4. Cálculo dos Regimes

$$\pi_{Q_{acc}} = Q_{acc} (T_{acc}^{\alpha_1} C_{ea}^{\alpha_2} F_{ac}^{\alpha_3})$$

Resolvendo para cada unidade temos:

$$M : 1 + \alpha_3 = 0$$

$$L : 2\alpha_2 + 2 = 0$$

$$T : -2\alpha_2 - \alpha_3 - 3 = 0$$

$$\Theta : \alpha_1 - \alpha_2 = 0$$

Resolvendo o sistema, obtemos:

$$\alpha_1 = -1, \alpha_2 = -1, \alpha_3 = -1$$

e assim o *regime* tem a seguinte expressão:

$$\pi_{Q_{acc}} = \frac{Q_{acc}}{T_{acc} C_{ea} F_{ac}}$$

A derivada qualitativa em relação a variável F_{ac} é:

$$\frac{\partial Q_{acc}}{\partial F_{ac}} > 0$$

A partir da *derivada qualitativa* anterior, verifica-se que algum problema que acarrete na diminuição do fluxo de água de condensação, por exemplo obstrução nos dutos, ocasionará diminuição da quantidade de calor absorvida pelo circuito de água de condensação.

5.2.6 Ensemble 6: Modelando a Troca Térmica da Água na Torre de Arrefecimento

De forma oposta do que ocorre nos fan coils, a troca térmica na torre de arrefecimento libera calor para o ar externo ao prédio, ao invés de absorver o calor do meio interno. Porém o processo na sua essência é o mesmo, tendo as variáveis físicas semelhanças com aquelas utilizadas no *ensemble* do fan coil.

Queda da temperatura da água de condensação

que circula na torre

$$T_{act} \quad \Theta$$

Calor específico da água

$$C_{ea} \quad L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$$

Fluxo da água de condensação

$$F_{ac} \quad M T^{-3}$$

Taxa de transferência de calor da água de condensação com o ar externo na torre

$$Q_{act} \quad M L^2 T^{-3}$$

Troca Térmica na Torre de Arrefecimento

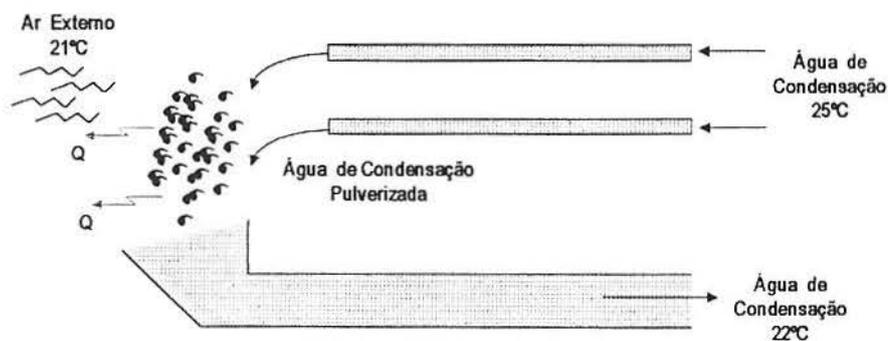


Figura 5.5 - Troca térmica na torre de arrefecimento

1. *Matriz Dimensional***Tabela 5.6 - Matriz dimensional do ensemble da torre de arrefecimento**

	M	L	T	Θ
T_{act}	0	0	0	1
C_{ea}	0	2	-2	-1
F_{ac}	1	0	-1	0
Q_{act}	1	2	-3	0

2. *Cálculo do número de variáveis de Performance*

O posto da matriz acima é igual a 3, ou seja, $r = 3$.

Assim sendo, o número de variáveis de performance (p) é dado por:

$$n = 4 \quad (T_{act}, C_{ea}, F_{ac}, Q_{act})$$

$$r = 3$$

$$p = (n - r) = 1$$

3. *Escolha da variável de Performance.*

O aumento da temperatura (T_{act}) será utilizado como a variável de *performance* e as demais variáveis (C_{ea} , F_{ac} , Q_{act}) para formar a *base*.

4. *Cálculo dos Regimes*

$$\pi_{T_{act}} = T_{act} (C_{ea}^{\alpha_1} F_{ac}^{\alpha_2} Q_{act}^{\alpha_3})$$

Resolvendo para cada unidade temos:

$$M : \alpha_2 + \alpha_3 = 0$$

$$L : 2\alpha_1 + 2\alpha_3 = 0$$

$$T : -2\alpha_1 - \alpha_2 - 3\alpha_3 = 0$$

$$\Theta : 1 - \alpha_1 = 0$$

Resolvendo o sistema, obtém-se:

$$\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 1, \alpha_3 = -1$$

e assim o *regime* tem a seguinte expressão:

$$\pi_{T_{act}} = \frac{T_{act} C_{ea} F_{act}}{Q_{act}}$$

Os sinais indicados pelas *derivadas qualitativas* do processo para Q_{act} e F_{ag} são:

$$\frac{\partial T_{act}}{\partial Q_{act}} > 0$$

$$\frac{\partial T_{act}}{\partial F_{ag}} < 0$$

Analisando as *derivadas qualitativas* acima, pode-se inferir, por exemplo, que a medida que a troca térmica entre a água e o ar do ambiente externo ao prédio cresce (Q_{act}), também é acentuada a queda de temperatura da água de condensação que circula na torre (T_{act}). Tudo isto assumindo que as demais variáveis se mantêm constantes (fluxo de água e calor específico da água).

Por outro lado, assumindo o calor específico da água e a troca térmica constantes, pode-se inferir que a medida que o fluxo de água cresce, diminui a diferença de temperatura da água, ou seja, a queda na temperatura é menor.

5.2.7 Regimes de Acoplamento

Uma vez determinados os regimes que caracterizam cada *ensemble*, é possível evoluir o raciocínio mediante a tentativa de identificar se existe algum nível de acoplamento entre dois *ensembles* vizinhos, de tal maneira que o comportamento de alguma variável em um deles afete o comportamento de uma outra variável no *ensemble* vizinho.

Para identificar tal situação, deve-se procurar por variáveis em ambos *ensembles* que mantenham entre si uma dependência linear do ponto de vista dimensional. Estas variáveis são conhecidas como variáveis de *contato* e foram estudadas no item 4.9.3 .

Os *ensembles* vizinhos que caracterizam o circuito frigorígeno (evaporador e condensador) são um exemplo desta situação.

O *ensemble* da troca térmica da água gelada com o gás no evaporador (*ensemble 2*) e o *ensemble* da troca térmica do gás no evaporador (*ensemble 3*) podem ser acoplados através das variáveis de *contato* Q_{age} e Q_{fe} .

O *regime de contato* entre os *ensemble 2 e 3* que caracteriza a situação tem a seguinte expressão:

$$\pi_{agefe} = \frac{Q_{age}}{Q_{fe}}$$

O sinal da *derivada parcial* neste caso é:

$$\frac{\partial Q_{age}}{\partial Q_{fe}} > 0$$

Ou seja, existe uma relação diretamente proporcional entre um aumento ou diminuição da taxa de transferência térmica da água gelada para o gás freon e a taxa de resultante de transferência térmica para o gás freon no evaporador.

Por outro lado, a comunicação entre os *ensembles* do freon no evaporador (*ensemble 3*) e o gás no condensador (*ensemble 4*) pode ser traduzida através das variáveis de *contato* P_{fc} e P_{fe} , definindo o seguinte *regime de contato*:

$$\pi_{fefc} = \frac{P_{fc}}{P_{fe}}$$

com a parcial

$$\frac{\partial P_{fc}}{\partial P_{fe}} > 0$$

significando que um aumento ou diminuição de pressão em um dos *ensembles* corresponderá ao mesmo comportamento na pressão do outro *ensemble*.

Finalmente, para encerrar o contato nos *ensembles* do circuito frigorígeno, é possível estabelecer o relacionamento entre os *ensembles* do gás freon no condensador (*ensemble 4*) e a água de condensação no condensador (*ensemble 5*).

As variáveis de *contato* são Q_{fc} e Q_{acc} e podem ser expressa no *regime de acoplamento* a seguir.

$$\pi_{fcacc} = \frac{Q_{fc}}{Q_{acc}}$$

Porém contrariamente às parciais anteriores, a relação é negativa, ou seja:

$$\frac{\partial Q_{fc}}{\partial Q_{acc}} < 0$$

Significando que um aumento na taxa de transferência de calor do freon para a água de condensação que circula no condensador, implica em uma diminuição na taxa resultante de transferência térmica para o gás freon no condensador.

5.2.8 Automatização dos Cálculos de Regimes

Embora tenha-se apresentado de forma extensiva os cálculos de regime nos itens anteriores, os mesmos tiveram sua origem em um sistema automatizado que foi desenvolvido com a finalidade específica de auxiliar o presente trabalho.

Tal sistema constitui-se em uma segunda versão do sistema QDR (ver item Caráter Algorítmico da Análise de Regimes), porém, ao invés de ser de característica mais abrangente e utilizar a linguagem REDUCE, possui o objetivo específico de cálculo de regimes e foi implementado na linguagem de computação algébrica Maple V.

6. Diagnóstico através de grafos

Como visto anteriormente, a análise de regime pode fornecer elementos para identificar o relacionamento existente entre as variáveis de um conjunto que obedeça determinada lei física. Isto significa dizer que o comportamento do sistema pode ser modelado a partir dos regimes identificados, ou seja, é possível criar um modelo que explique o comportamento do sistema levando-se em conta o relacionamento das variáveis que o constituem.

Uma vez criado um modelo é possível responder à pergunta do tipo: Qual o efeito de uma alteração em uma variável sobre o comportamento qualitativo das demais ?

Foi mostrado no capítulo anterior que este tipo de questionamento pode ser atendido pelas análises intra e inter-regimes e inter-ensembles. No entanto, este tipo de simulação demonstra o raciocínio em um determinado sentido apenas, ou seja, dada a variação qualitativa de uma variável, percorre-se as possíveis influências que esta variação pode exercer sobre outras variáveis.

Na prática, muitas vezes, o interesse é responder a questões no sentido oposto: Dado um determinado comportamento de uma variável, quais seriam as origens deste comportamento. Em outras palavras, quem são as variáveis que influenciaram na geração do comportamento observado.

Neste caso, o objetivo é construir um diagnóstico que explique o comportamento final de um processo.

Interessante observar que apesar de geralmente estas situações de diagnóstico envolverem a tarefa de procurar as causas de uma falha observada, ela é de um caráter mais abrangente, ou seja, necessariamente não são apenas questões sobre falhas, mas também o interesse de identificar as causas de um determinado comportamento que seja classificado como sendo o suficientemente diferente e importante para ativar uma busca das suas origens.

Esta ativação, como será visto adiante, pode ser feita através do conceito de alarmes, ou seja, toda vez que um alarme disparar significa que um determinado comportamento (falha ou algo previamente classificado como especial) foi detectado.

6.1 Modelo de grafo no diagnóstico de falha

Neste capítulo serão estudados os componentes do modelo de grafo apresentados em [RAO 93] para o diagnóstico de falhas. Serão analisados os algoritmos propostos, deixando para o próximo capítulo a abordagem em que será vinculada a análise de regime ao modelo de grafos proposto.

No modelo original, os vértices do grafo representam os componentes físicos do sistema (no exemplo da ar condicionado central poderiam ser as bombas de água, condensador, a torre de resfriamento , etc).

As arestas representam a propagação de falhas entre os componentes.

Além dos vértices e arestas, o modelo dispõe de alarmes que são os elementos que indicam que uma falha ocorrida no sistema se propagou até um vértice equipado com alarme. Um alarme pode estar acionado ou não.

Um alarme acionado representa a detecção de uma falha propagada até o vértice. Esta falha pode ser originada no próprio vértice ou em algum vértice do grafo que possui um caminho até o alarme acionado.

Por exemplo, no grafo abaixo o vértice *a* ao apresentar uma falha pode propagá-la até o vértice *e* que tem seu alarme acionado.

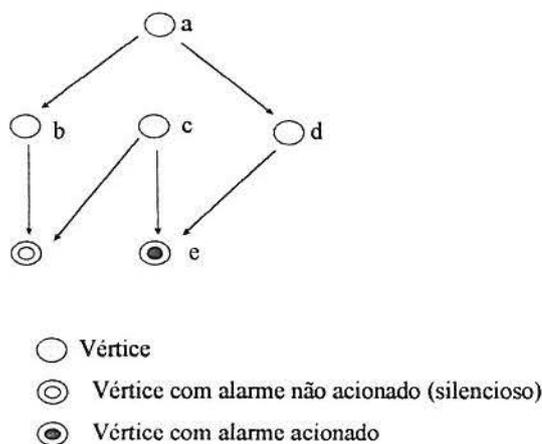


Figura 6.1 - Vértices equipados com alarmes

6.2 Classificação do problema de diagnóstico

O problema básico de diagnóstico consiste em identificar o conjunto de vértices que potencialmente podem ser a causa de um conjunto de alarmes estarem acionados.

O problema de diagnóstico será dividido em dois casos:

I. Sistemas onde a causa da falha é única, ou seja, apenas um vértice é responsável pelo acionamento do conjunto de alarmes.

II. Sistemas de falhas múltiplas, ou seja, um conjunto de vértices são responsáveis pelo acionamento do conjunto de alarmes.

Os sistemas de falha única podem ser resolvidos com algoritmos específicos de ordem polinomial, porém os sistemas de falhas múltiplas se mostram computacionalmente intratáveis.

Os sistemas de falha única são ainda divididos em duas categorias:

I. Sistemas com tempo de propagação zero, ou seja, o tempo de propagação de uma falha parece instantâneo para um observador humano ou máquina.

II. Sistemas com tempo de propagação diferente de zero, isto é, o tempo de propagação de uma falha é mais lento que o tempo de resposta de um observador.

6.3 Elementos do grafo de propagação de falhas

Apresentaremos a seguir os elementos que serão utilizados para a construção do grafo representativo do modelo de propagação de falhas. Serão mantidas as siglas originais do inglês para a denominação dos elementos do conjunto.

O grafo é representado por $G = (V, E)$, onde V é o conjunto de componentes, E é um conjunto de arestas, sendo que uma aresta $(u, v) \in E$ representa o fato de que uma falha em u pode propagar-se até v .

Para $v \in V$, o conjunto de todos os vértices que possuem um caminho até v é chamado de *to-set* de v e é representado por $TS(v)$.

É assumido que existe um caminho de v para v .

Para $v \in V$, chama-se de *restricted-to-set* de v , representado por $RTS(v)$, o maior sub-conjunto de $TS(v)$ tal que nenhum caminho de $u \in RTS(v)$ até v contém alarmes, com exceção possível do próprio v .

Para $v \in V$, o conjunto de todos os vértices para os quais existe um caminho a partir de v é chamado de *from-v* de v e é representado por $FS(v)$.

A partir das definições acima, é possível refinar o entendimento de um alarme que está acionado como sendo uma situação onde uma falha ocorreu no próprio vértice que possui o alarme ou é a propagação de uma falha que ocorreu em algum vértice do conjunto $TS(v)$.

Seja A o conjunto dos vértices que possui um alarme associado e seja A_R o conjunto dos vértices que possuem um alarme acionado em um determinado momento.

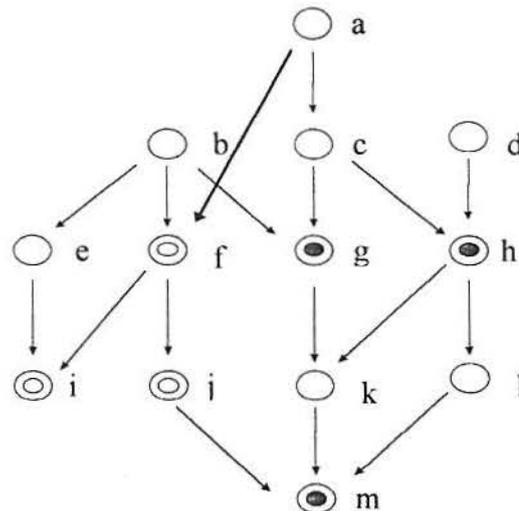
Seja $|A| = k$ e $|A_R| = k_R$.

Para $v \in A_R$, chamamos de *all-restricted-to-set de v*, representado por $ARTS(v)$, o maior sub-conjunto de $TS(v)$ tal que para cada $u \in ARTS(v)$, todos os alarmes que existirem no caminho de u até v estão acionados.

Observe que $ARTS(v) \subseteq RTS(v)$.

Para $v \in V$, é definido o conjunto *one-restricted-to-set* $ORTS(v)$, como sendo o maior subconjunto de $TS(v)$ tal que existe um caminho de $u \in ORTS(v)$ para v que não possua alarmes silenciosos.

Seja considerado o exemplo abaixo:



$$V = \{ a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m \} \quad A = \{ f, g, h, i, j, m \} \quad A_R = \{ g, h, m \}$$

$$TS(m) = \{ a, b, c, d, f, g, h, j, k, l, m \} \quad ARTS(m) = \{ c, d, g, h, k, l, m \}$$

$$ORTS(m) = \{ a, b, c, d, g, h, k, l, m \} \quad RTS(m) = \{ k, l, m \}$$

$$FS(b) = \{ b, e, f, g, i, j, k, m \}$$

Figura 6.2 - Exemplo de um sistema grafo

6.4 Diagnóstico dos sistemas de falha única

A partir das definições anteriores o problema de diagnóstico de sistemas com a hipótese de uma única falha pode ser descrito da seguinte maneira :

Dado um conjunto de alarmes acionados, A_R , em um dado instante, determinar o conjunto de fontes potenciais de falhas P_s .

$P_s = \phi$ se não for possível identificar nenhum vértice como responsável pelo acionamento de todos os alarmes de A_R .

6.5 Sistemas de tempo zero

Em um sistema de tempo zero, a falha em um vértice u propaga-se instantaneamente para todos os vértices de $FS(u)$.

Em um sistema de falha única e tempo zero é possível projetar um algoritmo que verifica cada vértice, identificando se está conectado a um alarme (acionado ou não).

Para cada vértice u é aplicado um algoritmo de *busca em profundidade* para verificar se cada um dos vértices de A_R é alcançável por u e simultaneamente devemos verificar se cada um dos vértices que possuem alarme silenciosos (não acionados) também são alcançáveis por u .

A idéia básica é que se um vértice u é responsável pela falha então ele deve estar conectado a todos os vértices que tem um alarme acionado (A_R) e ao mesmo tempo não pode estar conectado a nenhum vértice que possua um alarme não acionado, ou seja, silencioso ($A - A_R$), pois se tiver conectado a um alarme silencioso então não é fonte de falha.

O algoritmo denominado de *Backward* para identificação de falha única pode ser resumido da seguinte maneira:

1. Preparar o sistema em um passo inicial;
2. Eliminar os alarmes redundantes de A_R ;
3. Calcular P_s utilizando a fórmula fornecida no teorema 1 descrito a seguir.

Em sistemas de tempo zero, uma falha em um ciclo não pode ser distinguida de outra falha no mesmo ciclo. Então a solução se restringe aos componentes fortemente

acoplados que possam representar uma fonte de falha. Representamos cada componente por um vértice simples, gerando um gráfico condensado.

Consideremos o gráfico G descrito na figura 6.2 já condensado.

Qualquer fonte potencial de falha a deve estar em $\bigcap_{v \in A_R} ARTS(v)$, o que significa dizer que se a é uma fonte de falha então ele deve possuir um caminho a todos os vértices que possuem um alarme acionado ($\bigcap_{v \in A_R}$) e todos os alarmes que estiverem neste caminho devem estar acionados ($ARTS(v)$).

Por outro lado, a fonte de falha a não pode estar contida no conjunto $\bigcup_{v \in A-A_R} TS(v)$, ou seja, não pode estar conectada a nenhum vértice que possua um alarme silencioso.

Assim pode ser definido o conjunto P_S que contém os vértices potencialmente responsáveis pela falha através da seguinte expressão:

$$P_S = \bigcap_{v \in A_R} ARTS(v) - \bigcup_{v \in A-A_R} TS(v)$$

Pode ser obtido uma outra expressão para P_S utilizando as seguintes propriedades:

Seja C_R o conjunto de todos $u \in A_R$ tal que u é alcançável por algum $v \in A_R$, $v \neq u$, isto é, o conjunto de todos os alarmes acionados que são alcançáveis por algum outro alarme acionado, além de si mesmo.

Seja $B_R = A_R - C_R$, isto é, o conjunto de alarmes que não são alcançáveis por outro alarme do conjunto A_R .

Consideremos o grafo $G_R = (V_R, E_R)$ obtido do grafo G através da remoção de todos os vértices de $\bigcup_{v \in A-A_R} TS(v)$ e suas correspondentes arestas.

Assim obtém-se $V_R = V - \bigcup_{v \in A-A_R} TS(v)$. O conjunto excluído ($\bigcup_{v \in A-A_R} TS(v)$) corresponde a todos os vértices que alcançam alarmes silenciosos.

Observa-se que G_R é um grafo onde não se encontram vértices que estejam ligados a alarmes silenciosos e por conseguinte não poderiam ser fontes potenciais de falhas.

Lema 1: Seja G um grafo condensado de tempo zero e A_R o conjunto de alarmes acionados devido a uma falha única. Assim se $v \in A_R$ então $FS(v) \cap A \subseteq A_R$, ou seja, o conjunto dos alarmes acionados alcançados por outro alarme acionado. Então temos:

$$I) \bigcap_{v \in B_R} ARTS(v) = \bigcap_{v \in B_R} RTS(v);$$

Prova: Todo caminho de $u \in ARTS(v)$ para v não contém alarmes silenciosos, ou seja, se existem alarmes eles estão acionados. Se qualquer caminho contém um alarme acionado a , então v não pode estar em B_R , pois isto significaria que a seria alcançável a partir de v . Se v não está em B_R temos uma contradição.

Como $RTS(v) \subseteq ARTS(v)$, a afirmação acima é verdadeira.

$$II) \bigcap_{v \in A_R} (ARTS(v) \cap V_R) = \bigcap_{v \in B_R} (ARTS(v) \cap V_R)$$

Neste conjunto estão representados os vértices que chegam a todos os alarmes acionados e que não possuem outros alarmes no caminho, sejam acionados ou silenciosos.

Prova: Uma vez que $B_R \subseteq A_R$ $\bigcap_{v \in B_R} (ARTS(v) \cap V_R) \subseteq \bigcap_{v \in A_R} (ARTS(v) \cap V_R)$.

Um vértice $u \in \bigcap_{v \in B_R} (ARTS(v) \cap V_R)$ está ligado a todo $v \in B_R$ e todo o caminho até v não possui alarmes silenciosos (e sendo B_R o destino, também não possui alarmes acionados).

Por outro lado, todo $x \in C_R$ é alcançável por algum vértice de B_R através de um caminho que possui alarmes acionados, caso existam alarmes neste caminho.

Então se u é conectado a todo $v \in B_R$, também estará conectado a todo $x \in C_R$ (logo a todo A_R) através de um caminho que contém alarmes acionados, caso existam alarmes neste caminho.

$$III) |RTS(v)| \leq n - k + 1, \text{ para todo } v \in B_R.$$

Prova: Uma vez que $RTS(v)$ para $v \in B_R$ não contém nenhuma espécie de alarme (silencioso ou acionado), então a relação acima é direta, ou seja, o número de vértices que possuem um caminho até um alarme deve ser menor ou igual que o total de vértices subtraído o número de alarmes mais um (próprio vértice que possui alarme).

Agora existem as condições para enunciar o seguinte teorema que estabelece uma fórmula mais desenvolvida para P_s .

$$\text{Teorema 1: } P_s = \bigcap_{v \in B_R} (RTS(v) \cap V_R)$$

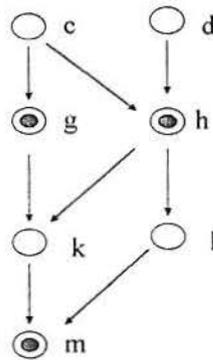
Prova:

$$\begin{aligned} P_s &= \bigcap_{v \in A_R} ARTS(v) - \bigcup_{v \in A-A_R} TS(v) \\ &= (\bigcap_{v \in A_R} ARTS(v)) - (V - \bigcup_{v \in A-A_R} TS(v)) \\ &= (\bigcap_{v \in A_R} ARTS(v)) \cap V_R = \bigcap_{v \in B_R} (ARTS(v) \cap V_R) \text{ (segundo a parte II do} \end{aligned}$$

lema 1)

$$= \bigcap_{v \in B_R} (RTS(v) \cap V_R) \text{ (segundo a parte I o lema 1)}$$

No exemplo da figura 6.2, teríamos o seguinte resultado :



$$V_R = \{ c, d, g, h, k, l, m \}$$

$$C_R = \{ m \} \quad B_R = \{ g, h \}$$

$$RTS(g) \cap V_R = \{ g, c \}$$

$$RTS(h) \cap V_R = \{ c, d, h \}$$

$$P_s = \{ c \}$$

Figura 6.3 - $G_R = (V_R, E_R)$

6.6 Algoritmo BACKWARD para Tempo Zero

O algoritmo Backward permite calcular P_s .

Os passos do algoritmo são os seguintes:

1) *Condensação*: O grafo G é condensado ficando apenas os vértices fortemente conectados do grafo original;

2) *Cálculo de G_R* : Seja $S = A - A_R$. Para cada $v \in V$ execute o algoritmo de *busca em profundidade* a partir de v em sentido contrário das arestas. Exclua cada vértice visitado a partir de G e S (se contido em S), antes de executar a próxima *busca em profundidade*

Se um vértice em A_R for visitado, então $P_s = \phi$ e parar o algoritmo, pois demonstraria uma inconsistência pois significaria que uma falha alcançou um alarme acionado e não propagou-se a frente. Caso contrário continue o processo até S tornar-se ϕ .

3) *Cálculo facilitado de $RTS()$* : Obtenha o grafo G_1 , excluindo de uma cópia de G_R , todas as arestas que partem de A_R . Armazene as listas adjacentes de G_1 nos vértices correspondentes de G .

4) *Ordenar G_1* : Execute uma pesquisa de *busca em profundidade* em G_1 a partir de cada vértice com grau de saída zero, tal que naveguemos no sentido reverso das arestas conforme a seguir:

Seja $\{ a_1, a_2, a_3, \dots, a_q \}$ o conjunto de vértices de G_1 com grau de saída zero. Considere que fizemos uma pesquisa de *busca em profundidade* de a_1 até a_p . Durante a pesquisa de *busca em profundidade* a partir de a_{p+1} , nós terminamos a pesquisa iniciada no vértice visitado anteriormente pela pesquisa de *busca em profundidade* anterior. Depois de realizar todas as *buscas em profundidade*, removemos todas as arestas que não fazem parte de qualquer árvore de *busca em profundidade*.

O resultado é chamado de G_2 .

5. *Cálculo de B_R* : Seja $S_1 = A_R$ e $S_2 = \phi$. Execute a *busca em profundidade* em G_R da seguinte forma:

Durante a *busca em profundidade* a partir de $u \in S_1$ exclua todos os vértices visitados com alarmes de S_1 e adicione em S_2 , exceto u ; também exclua estes vértices, exceto u , de G_R .

Repita o processo até $S_1 = \phi$, então $B_R = A_R - S_2$. Neste estágio $S_2 = C_R$. Para verificar isto, observe que um alarme acionado $u \in A_R$ será adicionado a S_2 somente se ele é alcançável a partir de outro alarme acionado ou vice-versa.

6. *Cálculo de P_S* : Calcule $P_S = \bigcap_{v \in B_R} (RTS(v) \cap V_R)$

Execute uma *busca em profundidade* no sentido reverso das arestas em G_2 a partir de cada $v \in B_R$. Quando visitamos o vértice w , durante este processo, incrementamos seu contador em um (1).

Então P_S consiste de todos os vértices que possui o contador igual a $|B_R|$. A *busca em profundidade* a partir de u induz a uma árvore em G_2 com $RTS(u)$ como sendo a árvore de vértices.

7. Expanda cada vértice condensado de P_S obtido no passo 6 para obter todos os vértices dos componentes fortemente conectados.

6.7 Sistemas com tempo de propagação diferente de zero

Estes sistemas podem ser divididos em duas categorias:

1. O tempo de propagação é desconhecido ou varia de uma forma desconhecida.
2. O tempo de propagação é constante e perfeitamente conhecido.

6.7.1 Tempo de Propagação Desconhecido

Suponhamos que um conjunto de alarmes está acionado e não temos informações a respeito de quando os mesmos foram disparados. Além disso, suponhamos que desconheçamos o tempo de propagação das falhas e/ou o tempo de propagação varia de forma imprevisível.

Consideremos $u \in \bigcap_{v \in A_R} ORTS(v)$

Podemos afirmar que u é uma fonte potencial de falha, uma vez que ele está acionando todos os alarmes de A_R .

Por outro lado, $w \in \bigcap_{v \in A_R} TS(v) - \bigcap_{v \in A_R} ORTS(v)$ não pode ser uma fonte potencial de problemas.

Para verificar a validade de que w não pode ser uma fonte do problema, assumimos que w seja, por hipótese, uma fonte de falha. Neste caso, existe um $v_1 \in A_R$

tal que $w \notin ORTS(v_1)$, mas existe um caminho de w até v_1 . Porém isto somente poderá ocorrer quando houver alarmes silenciosos em todos os caminhos entre w e v_1 , e neste caso w não poderá ser uma fonte de falha, pois não seria possível uma falha alcançar um alarme (v_1) sem acionar os alarmes no caminho e que estão no momento silenciosos.

Assim temos :

$$P_s = \bigcap_{v \in A_R} ORTS(v)$$

O algoritmo *Backward* permite calcular P_s em dois passos.

1. Fazemos o caminho reverso (utilizando pesquisa de *busca em profundidade* no sentido contrário das arestas) a partir de cada $v \in A_R$ até encontrarmos um vértice com grau de entrada zero ou um alarme silencioso ou um vértice cuja toda vizinhança já foi visitada (considerando o sentido reverso das arestas).

Incrementamos em um (1) o contador do vértice w visitado durante esta etapa.

2. Selecionamos todos os vértices cujo contador tem valor igual a $|A_R|$.

6.7.2 Tempo de Propagação Conhecido

Inicialmente o sistema apresenta um conjunto de alarmes acionados A_R . A partir deste momento identificamos o lapso de tempo que ocorre até que os alarmes subsequentes comecem a ser acionados.

O algoritmo de identificação do P_s é constituído de duas partes:

1. Calcular o conjunto P_s baseado em A_R ;

Este cálculo é feito utilizando a relação $P_s = \bigcap_{v \in A_R} ORTS(v)$.

2. Aguardar em um loop até que um novo conjunto de alarmes seja acionado e então refinar P_s .

Os alarmes silenciosos não podem ser retirados no momento, pois podem ser acionados em um instante futuro, portanto não poderemos excluir $\bigcup_{v \in A - A_R} TS(v)$ de P_s como fizemos no algoritmo de tempo de propagação zero.

Entretanto podemos refinar P_s da seguinte maneira:

Para cada vértice $v \in P_s$ calcular $\Gamma_{max}(v) = \max_{w \in A_R} \{T_{vw}\}$ e $\Gamma_{min}(v) = \min_{w \in A - A_R} \{T_{vw}\}$, onde T_{vw} representa o menor tempo de propagação entre v e w através de todos os caminhos possíveis.

Se $\Gamma_{min}(v) \leq \Gamma_{max}(v)$ então remova v de P_s , porque se v fosse uma fonte de falha, já se teria passado o tempo $\Gamma_{max}(v)$ até a falha ter alcançado o último alarme e neste caso, sendo $\Gamma_{min}(v) \leq \Gamma_{max}(v)$, o alarme silencioso já deveria estar acionado.

7. Diagnóstico através da Análise de Regime e Grafos

Será apresentado aqui, a integração das duas técnicas vistas anteriormente, ou seja, a análise de regimes e a representação de sistemas através de grafos. Esta união dos dois métodos, constitui o elemento central da proposta, onde o poder de estabelecer relações causais entre as variáveis da análise de regimes, passa a ter uma representação mais formal através dos grafos, permitindo então que possamos trabalhar com algoritmos que viabilizem a implementação de métodos computacionais de identificação da origem de uma falha.

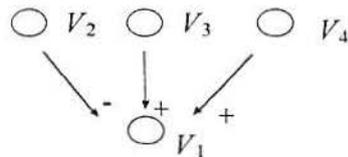
Para viabilizar tal proposta, o grafo tradicional passa a ter novos elementos oriundos da análise de regimes. Será adotado um modelo de grafo onde os vértices do grafo representam as variáveis de um sistema estudado e as arestas representam a propagação de falhas (ou influências) entre as variáveis.

No nosso contexto, um grafo será representativo dos *regimes* calculados quando cada vértice do grafo representar uma variável do *ensemble* do processo e cada aresta representa o relacionamento que uma variável de *referência* (*base*) mantém com a variável de *performance* através do regime.

Outra informação que será agregada à representação tradicional são os sinais {+,-} que representam a *derivada qualitativa* da variável de *performance* em relação a variável de *base*.

Por exemplo, um regime do tipo $\pi_{v_1} = \frac{v_1 v_2}{v_3 v_4}$ teria a seguinte representação em

grafo:



V_1 = variável de *performance* V_2, V_3, V_4 = variáveis de *base*

Os sinais + e - representam a *derivada qualitativa* de V_1 em relação as variáveis de *base*, ou seja:

$$\frac{\partial V_1}{\partial V_2} < 0, \quad \frac{\partial V_1}{\partial V_3} > 0, \quad \frac{\partial V_1}{\partial V_4} > 0$$

Figura 7.1 - Representação de um regime através de grafo

Os *regimes de acoplamento* são representados através de uma linha tracejada e não possuem um sentido específico, pois a causalidade dos mesmos pode ser aplicada em ambos os sentidos.

Por exemplo, os *regimes* $\pi_{v_1} = \frac{v_1 v_2}{v_3 v_4}$ e $\pi_{v_7} = v_7 v_5 v_6$ que tenham o acoplamento

entre as variáveis V_1 e V_5 , através de um *regime de acoplamento* $\pi_{v_1 v_7} = \frac{v_1}{v_7}$, tem a representação da figura 7.2.

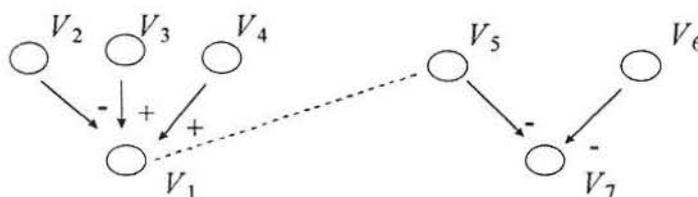


Figura 7.2 - Representação de um regime de acoplamento através de grafo

7.1 Aplicando a representação de grafos ao sistema de ar condicionado

Agora, utilizando os conceitos apresentados para o problema do ar condicionado central, obtem-se as representações mostradas nas próximas figuras.

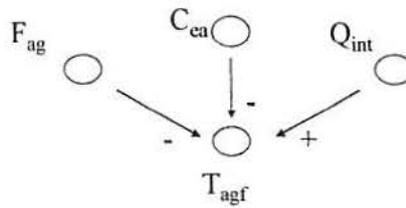


Figura 7.3 - Ensemble 1: Representação da troca térmica da água nos fan coils

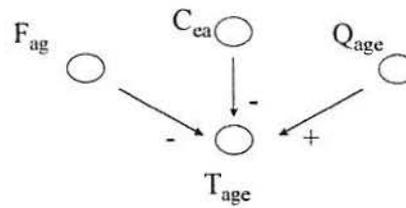


Figura 7.4 - Ensemble 2: Representação da troca térmica da água no evaporador

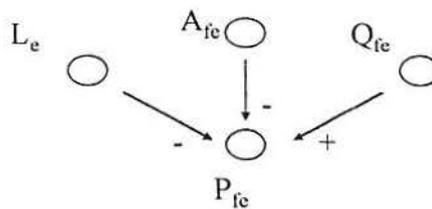


Figura 7.5 - Ensemble 3: Representação da troca térmica do gás Freon 11 no evaporador

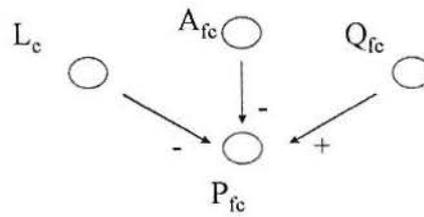


Figura 7.6 - Ensemble 4: Representação da troca térmica do gás Freon 11 no condensador

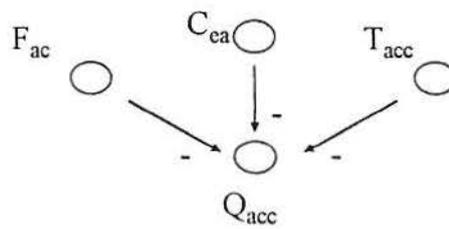


Figura 7.7 - Ensemble 5: Representação da troca térmica da água no condensador

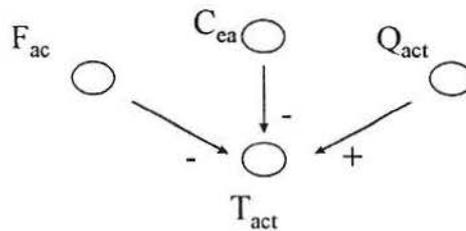


Figura 7.8 - Ensemble 6: Representação da troca térmica da água na torre de arrefecimento

Utilizando os *regimes de contato* calculados em 5.2.7, é possível estabelecer uma representação integral do sistema.

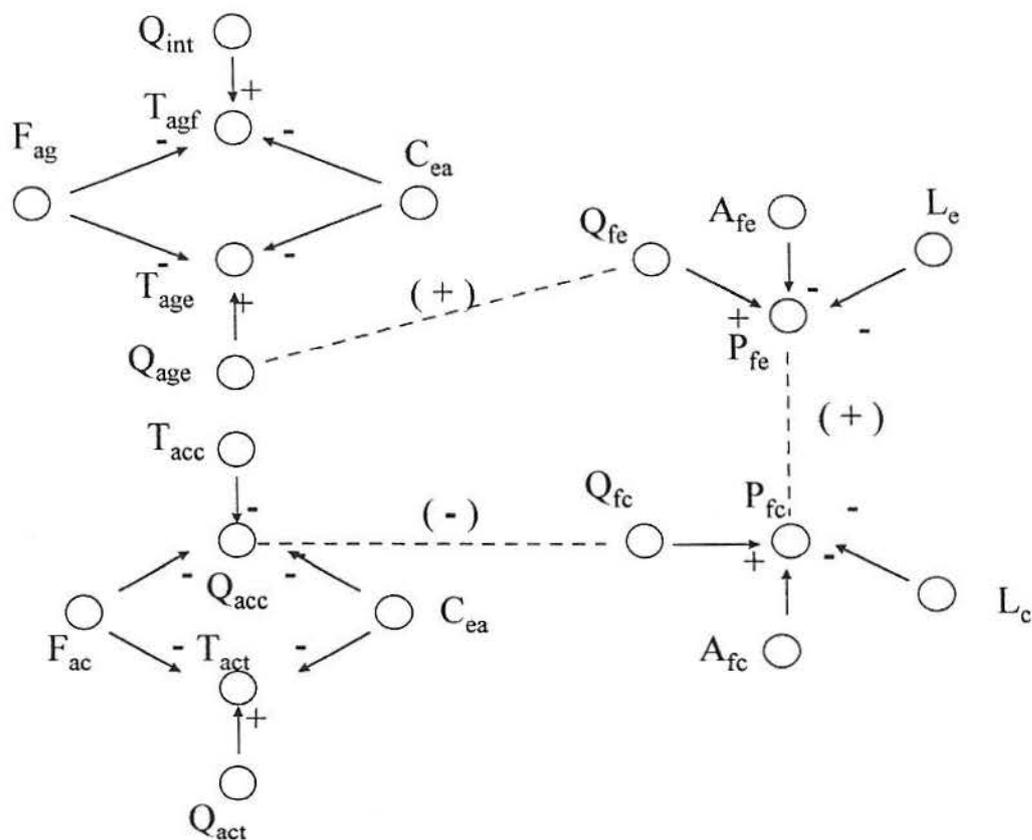


Figura 7.9 - Representação completa do sistema SAC através de grafo

Uma vez estabelecida esta representação, podemos aplicar os algoritmos vistos anteriormente para a detecção de falhas.

Supomos que no grafo acima sejam colocados os seguintes alarmes:

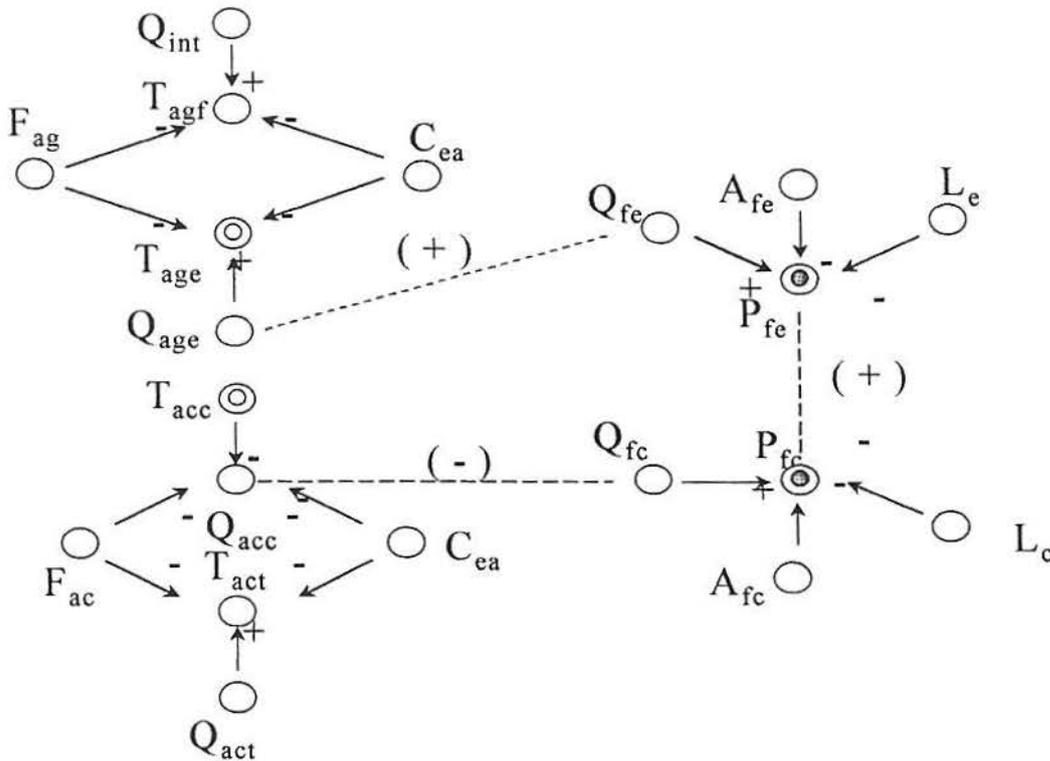


Figura 7.10 - Representação do sistema SAC dotado de alarmes

A escolha dos alarmes acima, procura simular uma situação prática, onde procura-se monitorar a pressão do gás no evaporador e condensador e a temperatura da água gelada e de condensação.

Uma vez construído o grafo, pode-se aplicar o *Teorema 1* para identificar a fonte de falha. Esta aplicação pode ser feita através de qualquer um dos algoritmos apresentados no capítulo 6.

$$\text{Teorema 1: } P_s = \bigcap_{v \in B_R} (RTS(v) \cap V_R)$$

O primeiro passo é determinar o conjunto V_R , ou seja, o conjunto de todos os vértices que tem acesso ao conjunto de alarmes acionados A_R , desprezando aqueles que tem caminho até os alarmes não acionados, conforme figura a seguir.

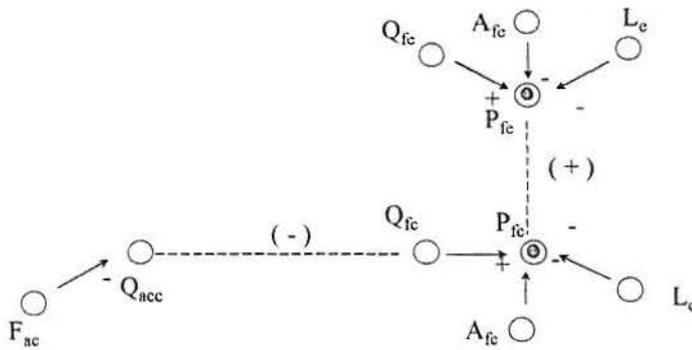


Figura 7.11 - Conjunto V_R do SAC

Neste ponto, é preciso introduzir uma outra noção da análise de regime na representação do grafo. Considerando que os *regimes de acoplamento* representam a influência em dois sentidos, é necessário gerar uma hipótese para cada combinação de propagação dos *regimes de acoplamento*.

Hipótese 1: A influência é propagada de Q_{acc} para Q_{fc} e de P_{fc} para P_{fc} .

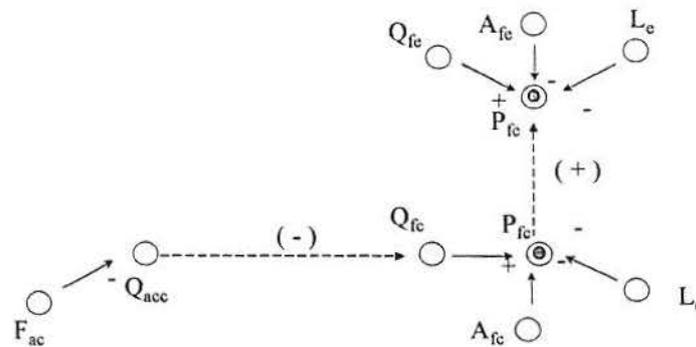


Figura 7.12 - Conjunto V_R na hipótese 1

Agora, identificando o conjunto B_R , tem-se:

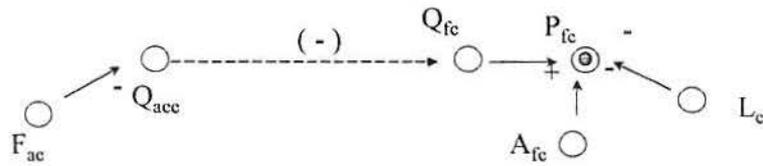


Figura 7.13 - Conjunto B_R na hipótese 1

Hipótese 2: A influência é propagada de Q_{acc} para Q_{fc} e de P_{fc} para P_{fc} .

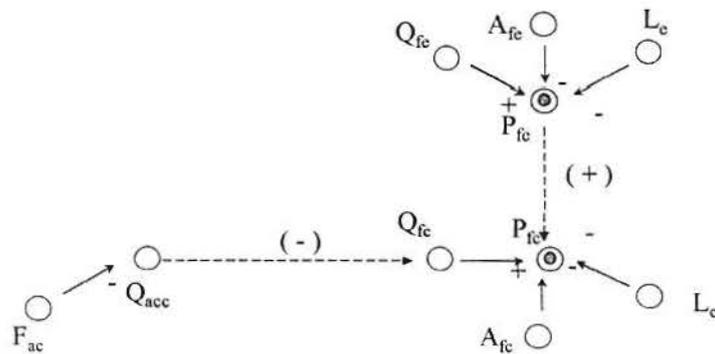


Figura 7.14 - Conjunto V_R na hipótese 2

Identificando o conjunto B_R , tem-se:

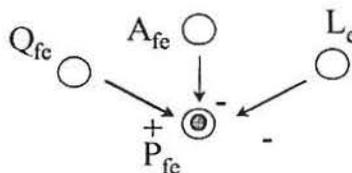


Figura 7.15 - Conjunto B_R na hipótese 2

Hipótese 3: A influência é propagada de Q_{fc} para Q_{acc} e de P_{fc} para P_{fc} .

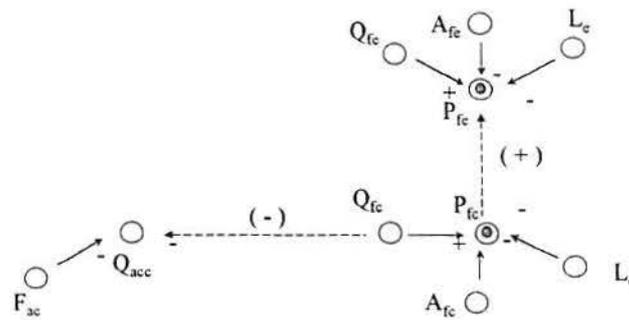


Figura 7.16 - Conjunto V_R na hipótese 3

Identificando o conjunto B_R , tem-se:

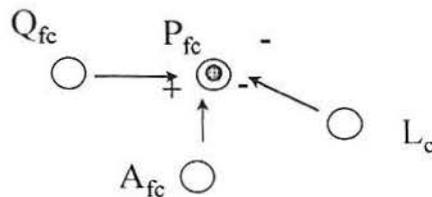


Figura 7.17 - Conjunto B_R na hipótese 3

Hipótese 4: A influência é propagada de Q_{fc} para Q_{acc} e de P_{fc} para P_{fc} .

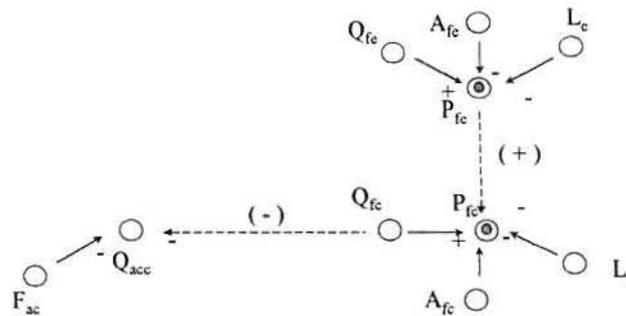


Figura 7.18 - Conjunto V_R na hipótese 4

Identificando o conjunto B_R , tem-se:

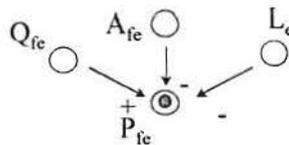


Figura 7.19 - Conjunto B_R na hipótese 4

Constituída as hipóteses possíveis, passamos a ter os seguintes candidatos:

Hipótese 1: $\{ F_{ac}, Q_{acc}, Q_{fc}, A_{fc}, L_c \}$

Hipótese 2: $\{ Q_{fc}, A_{fc}, L_c \}$

Hipótese 3: $\{ Q_{fc}, A_{fc}, L_c \}$

Hipótese 4: $\{ Q_{fc}, A_{fc}, L_c \}$

Conforme discutido no capítulo 3, quando existem mais de uma hipótese com candidatos válidos, tem-se como uma das alternativas a obtenção de novos pontos de medidas, que no caso significaria colocar novos alarmes a fim de aumentar a quantidade de informação disponível e proceder a um segundo diagnóstico.

No entanto, neste exemplo, por ser um caso prático, opta-se pelas seguintes considerações advindas da experiência do engenheiro que mantém os sistema, a saber:

1. As áreas de troca de calor não se modificam, pois isto é um dado de projeto;
2. As trocas térmicas representadas são uma variável física resultante do processo térmico, não representando diretamente um componente físico;
3. O fluxo de água do condensador, de fato, pode variar, não sendo raro a obstrução dos dutos percorridos pela água de condensação.

Assim sendo, o diagnóstico é que uma provável perturbação no fluxo de água do condensador (por exemplo por obstrução ou fuga de água), ocasionou a elevação da pressão do gás nas câmaras de evaporação e condensação, disparando o alarme que monitora o nível de pressão.

8. Conclusão

Neste trabalho procuramos demonstrar o uso da *Análise de Regimes* como ferramenta de diagnóstico quando aliada ao uso de grafos e algoritmos para identificação de falhas em um sistema multi-variável.

Para validar tal proposta foi modelado um sistema real de ar condicionado, onde o nível de detalhamento adotado foi o mínimo necessário para o exercício do método proposto.

A técnica de *Análise de Regimes* nos parece adequada para a finalidade proposta, pois partindo de um modelo conhecido, possibilita um tratamento computacional para a descoberta dos relacionamentos qualitativos entre os componentes do sistema. No entanto, é importante frisar que a identificação das variáveis que modelam o sistema, bem como a interpretação do significado dos regimes calculados exigem que sejam manuseadas por um especialista no assunto tratado. Este aspecto não deve ser visto como uma restrição, pois o *Raciocínio Qualitativo* busca, de alguma forma, simular o senso comum de pessoas que detenham o conhecimento do objeto estudado. Ainda nesta linha, é preciso que se diga que a identificação correta das variáveis que modelam o processo não é feita, muitas vezes, de forma imediata. Em certas ocasiões o cálculo dos regimes parece inconsistente com a experiência acumulada sobre o assunto. Neste caso, devemos considerar a existência de outras variáveis não identificadas inicialmente ou pensarmos em hipóteses não conjecturadas para o cenário definido. Seja qual for o caso, aqui se demonstra, também, a validade do processo enquanto ferramenta motivadora de raciocínio, na medida que auxilia na geração de questionamentos sobre a correta representação do processo físico, gerando possibilidades que mesmo um especialista poderia deixar de elaborar.

Esta situação pode ser verificada na conclusão do diagnóstico do ar condicionado, quando a área de troca de calor e o calor latente são descartados como *candidatos* da causa da falha, por se considerar elementos estáticos. No entanto, esta conclusão pode ser mudada se lembrarmos, por exemplo, que embora remota, existe a possibilidade de alteração da área de troca de calor por um problema de acúmulo de substâncias que a

tornem isolante, ou o calor latente da água sofrer alterações devido a mudança das propriedades físico-químicas pela ação de agentes poluentes.

Uma vez cumprida a etapa da *Análise de Regimes*, a transposição para o modelo baseado em grafos é imediata e o problema de identificação de falhas com disparo de alarmes é tratado através de algoritmos que fornecem resultados bastante precisos.

Os problemas investigados foram aqueles em que a fonte de falha é única, sendo que o exemplo aplicado utiliza particularmente a situação de falha única com tempo de propagação igual a zero. Situações onde é admitido que a fonte de falha não é única são de grande complexidade, conforme pode ser visto em [RAO 93], não sendo tratados aqui, uma vez que o objetivo do trabalho é demonstrar a viabilidade da integração das duas técnicas, abrindo espaço para futuras investigações para seu aperfeiçoamento.

Um ponto que julgamos promissor para pesquisa é a investigação do uso das técnicas mencionadas em sistemas de informações comerciais tradicionais. Nos parece que se passarmos a investigar as representações das variáveis envolvidas em um projeto comercial tradicional, podemos estabelecer o relacionamento indireto entre as informações armazenadas em banco de dados e os programas que manipulam estas informações, além do relacionamento entre programas, o que normalmente somente poderia ser identificado através de parâmetros passados explicitamente entre os mesmos.

Apêndice I

A seguir apresentamos a demonstração do princípio do Significado Absoluto da Magnitude Relativa conforme encontrado em [ISA 75].

Sejam A , B e C as variáveis de referência a partir das quais a variável derivada S será medida. Embora tenhamos assumido três variáveis de referência, o argumento serve para qualquer conjunto de variáveis de referências.

Assim temos que $S=f(A,B,C)$, onde f é uma função qualquer com a ressalva de que deve ser contínua e diferenciável.

Suponha que façamos duas medições da variável derivada S , obtendo os valores S_1 e S_2 a partir das variáveis e A_1, B_1, C_1, A_2, B_2 e C_2 respectivamente.

O princípio SAMR postula que:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{f(A_1, B_1, C_1)}{f(A_2, B_2, C_2)}$$

deve permanecer constante em qualquer mudança de escala que se faça nas unidades que A , B e C sejam medidas.

Vamos assumir que as unidades de referência assumam $\frac{1}{x}, \frac{1}{y}$ e $\frac{1}{z}$ de seus valores originais, fazendo desta maneira que as medidas dos dois exemplos sejam xA_1, yB_1, zC_1 e xA_2, yB_2, zC_2 respectivamente.

Assim temos:

$$\frac{f(A_1, B_1, C_1)}{f(A_2, B_2, C_2)} = \frac{f(xA_1, yB_1, zC_1)}{f(xA_2, yB_2, zC_2)}$$

Nosso objetivo será determinar a natureza da função desconhecida f .

Então procedemos da seguinte maneira:

$$f(xA_1, yB_1, zC_1) = f(xA_2, yB_2, zC_2) \frac{f(A_1, B_1, C_1)}{f(A_2, B_2, C_2)}$$

Derivando parcialmente em relação a x e fazendo f' representar a derivada parcial de f em relação a x_{A_1}, x_{A_2} , então desde que:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x_{A_1}} \frac{\partial x_{A_1}}{\partial x} = A_1 f'$$

temos:

$$A_1 f'(x_{A_1}, y_{B_1}, z_{C_1}) = A_2 f'(x_{A_2}, y_{B_2}, z_{C_2}) \left[\frac{f(A_1, B_1, C_1)}{f(A_2, B_2, C_2)} \right]$$

Vamos atribuir $x = y = z = 1$ e obter:

$$\frac{A_1 f'(A_1, B_1, C_1)}{f(A_1, B_1, C_1)} = \frac{A_2 f'(A_2, B_2, C_2)}{f(A_2, B_2, C_2)}$$

o que é verdadeiro para todos os valores de $A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2$.

Agora, se mantivermos constantes A_2, B_2 e C_2 , enquanto variamos A_1, B_1 e C_1 , poderemos remover os subscritos e escrever na forma:

$$\frac{A \partial f}{f \partial A} = \text{constante} = a \text{ (digamos)}$$

Escrevemos $\frac{\partial f}{\partial A}$ para f' , o que é justificável desde que $f' = \frac{\partial f}{\partial (xA)}$ e x foi atribuído valor 1.

A integração nos fornece $f = K_1 A^a$, onde K_1 é função de B e C apenas.

O mesmo processo pode ser repetido diferenciando parcialmente em relação a y e z em sucessivas integrações, obtendo:

$$S = k A^a B^b C^c$$

onde k, a, b, c são constantes, ou seja, S é um produto de potências das variáveis A, B, C e possivelmente uma constante k .

Ainda nos resta provar que é suficiente para uma variável derivada ser expressa como uma potência de produtos para o princípio ASRM ser mantido.

Consideremos a razão de duas medidas específicas de uma variável derivada:

$$S_1 / S_2 = A_1^a B_1^b C_1^c / A_2^a B_2^b C_2^c$$

Vamos assumir que as unidades de referência assumam $\frac{1}{x}$, $\frac{1}{y}$ e $\frac{1}{z}$ de seus valores

originais, o que fará com que a razão anterior seja:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{(xA_1^a)(yB_1^b)(zC_1^c)}{(xA_2^a)(yB_2^b)(zC_2^c)} = \frac{A_1^a B_1^b C_1^c}{A_2^a B_2^b C_2^c} \frac{x^a y^b z^c}{x^a y^b z^c} = \frac{A_1^a B_1^b C_1^c}{A_2^a B_2^b C_2^c}$$

O resultado final do lado direito mostra que a constância foi mantida.

Apêndice II

Apresentamos a seguir a prova formal do teorema de Buckingham, conforme é encontrada em [BRI 22].

O teorema será provado da seguinte forma:

Se existe uma equação dimensionalmente homogênea relacionando n quantidades definida em termos de r referências dimensionais, então a equação pode ser reduzida a um relacionamento entre $(n-r)$ produtos de potências independentes, considerando que os membros do conjunto de referência são escolhidos de tal maneira que sejam independentes um dos outros.

Dada as variáveis a_1, a_2, \dots, a_n que satisfaçam a equação dimensionalmente homogênea

$$f(a_1, a_2, \dots, a_n) = 0 \quad (1)$$

Por motivo de simplicidade adotaremos $r=3$ e as dimensões referenciais como sendo MLT, porém o leitor concordará que a prova pode ser generalizada para qualquer valor de r .

Expressando a_1, a_2, \dots, a_n como um produto de potência das dimensões de referência, obtemos:

$$a_1 = M^{r_1} L^{s_1} T^{t_1}$$

$$a_2 = M^{r_2} L^{s_2} T^{t_2}$$

.

.

.

$$a_n = M^{r_n} L^{s_n} T^{t_n}$$

Agora diminuindo o tamanho das unidades nas quais as dimensões de referência MLT são medidas por um fator x , y e z respectivamente. Isto implicará na seguinte alteração da magnitude das variáveis:

$$a'_1 = (x^{r_1} y^{s_1} z^{t_1}) a_1$$

$$a'_2 = (x^{r_2} y^{s_2} z^{t_2}) a_2$$

·

·

·

$$a'_n = (x^{r_n} y^{s_n} z^{t_n}) a_n$$

Como a equação (1) é dimensionalmente homogênea, ela se manterá nesta condição para qualquer mudança nas unidades de referência, ou seja:

$$f(a'_1, a'_2, \dots, a'_n) =$$

$$f(x^{r_1} y^{s_1} z^{t_1} a_1, x^{r_2} y^{s_2} z^{t_2} a_2, \dots, x^{r_n} y^{s_n} z^{t_n} a_n) = 0$$

Diferenciando a última equação parcialmente em relação a x obtemos:

$$r_1 x^{r_1-1} y^{s_1} z^{t_1} a_1 \frac{\partial f}{\partial a'_1} + r_2 x^{r_2-1} y^{s_2} z^{t_2} a_2 \frac{\partial f}{\partial a'_2} + \dots + r_n x^{r_n-1} y^{s_n} z^{t_n} a_n \frac{\partial f}{\partial a'_n} = 0 \quad (2)$$

Agora, nós podemos atribuir o valor que quisermos as variáveis x , y e z e por conveniência atribuiremos $x = y = z = 1$. Neste caso, $a'_i = a_i$ para todos os i 's e a equação (2) pode ser escrita como

$$r_1 a_1 \frac{\partial f}{\partial a_1} + r_2 a_2 \frac{\partial f}{\partial a_2} + \dots + r_n a_n \frac{\partial f}{\partial a_n} = 0 \quad (3)$$

Selecionamos um novo conjunto de variáveis definidas como

$$A_i = a_i^{1/r_i} \text{ ou } a_i = A_i^{r_i}$$

Esta definição acarreta que os A 's serão de dimensão 1 relativo a M . Também temos que

$$da_i = \frac{r_i a_i}{A_i} dA_i$$

e, conseqüentemente,

$$r_i a_i \frac{\partial f}{\partial a_i} = A_i \frac{\partial f}{\partial A_i}$$

Substituindo na equação (3) temos

$$A_1 \frac{\partial f}{\partial A_1} + A_2 \frac{\partial f}{\partial A_2} + \dots + A_n \frac{\partial f}{\partial A_n} = 0 \quad (4)$$

O número de variáveis na equação (4) pode ser reduzido de n para $(n-1)$, dividindo toda a equação por A_n . Também definimos um novo conjunto de variáveis B_1, B_2, \dots, B_{n-1} através da razão

$$B_i = \frac{A_i}{A_n}$$

então temos

$$f(A_1, A_2, \dots, A_n) = f(A_n B_1, A_n B_2, \dots, A_n B_{n-1}, A_n)$$

Observemos que a função do lado direito da última equação é independente de A_n , uma vez que sua derivada em relação a A_n é nula, ou seja:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial A_n} &= \\ B_1 \frac{\partial f}{\partial A_n B_1} + B_2 \frac{\partial f}{\partial A_n B_2} + \dots + B_{n-1} \frac{\partial f}{\partial A_n B_{n-1}} + \frac{\partial f}{\partial A_n} \\ &= [A_1 \frac{\partial f}{\partial A_1} + A_2 \frac{\partial f}{\partial A_2} + \dots + A_n \frac{\partial f}{\partial A_n}] \frac{1}{A_n} \end{aligned}$$

que é igual a zero, pois o numerador é igual ao lado esquerdo de 4.

Segue que $f(A_n B_1, A_n B_2, \dots, A_n B_{n-1})$ é uma função somente de $(n-1)$ B 's e pode ser escrita

$$f(A_1, A_2, \dots, A_n) = f(A_n B_1, A_n B_2, \dots, A_n B_{n-1}) = g(B_1, B_2, \dots, B_{n-1})$$

Observemos que desde que todos os A 's são de dimensão 1 em M , os B 's sendo definido como quociente de A 's, serão portanto, adimensionais em M .

Agora, repetimos o processo novamente desde o início, colocando $g(B_1, B_2, \dots, B_{n-1}) = 0$, o que segue da equação (1), uma vez que os valores de g são idênticos aos da função f . Porém $g = 0$ é uma equação do mesmo tipo que I , com a diferença que uma variável desapareceu e uma variável de referência não possui mais lugar na definição das variáveis.

A repetição deste processo e a diferenciação de g em relação a y irá reduzir de uma o número de variáveis no argumento da função e as novas variáveis serão adimensionais de M e L .

A repetição final envolvendo uma diferenciação em relação a z irá reduzir o número de variáveis para $(n - r) = (n - 3)$ e tornará adimensional para cada uma das dimensões MLT .

Além disto, desde que todas as mudanças de variáveis envolveram somente elevação a uma potência ou a razão entre duas variáveis, as $(n - 3)$ variáveis finais serão produtos adimensionais, ou seja, serão produtos adimensionais formados das variáveis originais a_1, a_2, \dots, a_n . Isto prova o teorema π de Buckingham .

Bibliografia

- [BHA 90] BHASKAR, R. and NIGAM A. Qualitative Physics using Dimensional Analysis. **Artificial Intelligence**, 45, p.73-111, 1990.
- [BRI 22] BRIDGMAN P. W. **Dimensional Analysis**. Cambridge: Yale University Press, 1922. 111p.
- [BUC 14] BUCKINGHAM E. On physically similar systems: illustrations of use of dimensional equations. **Physical Review**, IV, p.345-376, 1914.
- [DAV 82] DAVIS R. , Shrobe H., Hamscher W., Wieckert K., Shirley M. and Polit S. Diagnosis based on structure and function. In **Proceedings of AAAI**, 82 , p.137-142, 1982.
- [DEK 84] DE KLEER J. and Brown J.S. A Qualitative Physics based on Confluences. **Artificial Intelligence**, 24, p.7-83, 1984.
- [DEK 84a] DE KLEER J. and Williams B.C. Diagnosing multiple faults. **Artificial Intelligence**, 32, p. 97-130, 1987.
- [FOR 84] FORBUS K. D. Qualitative Process Theory. **Artificial Intelligence**, 24, p. 85-168, 1984.
- [GEN 84] GENESERETH M. R. The use of design descriptions in automated diagnosis. **Artificial Intelligence**, 24, p.411-436, 1984
- [GUE 95] GUERRIN F.,Dualistic Algebra for Qualitative Analysis. In **Proceedings of the 9th Workshop on Qualitative Reasoning**, 1995, Amsterdam, p. 64-73.
- [GUE 95a] GUERRIN F.,Heller U.,Roque W. L. e Struss P., Sigma: Um sistema Integrado de Gerenciamento do Meio Ambiente. **ECOS - Revista de Saneamento Ambiental**, v.III, n.6, p.25-28., 1996.
- [HAL 35] HALL P.,On representative of subsets, *J. London Math. Soc.* 10, p.26-30, 1935.
- [ISA 75] ISAACSON E. de St. and Isaacson M. de St., **Dimensional**

- Methods in Engineering and Physics.** New York, John Weley & Sons, 1975. 219p.
- [IWA 88] IWASAKI I., Causal ordering in a mixed structure, in **2nd Qualitative Physics Workshop**, 1988, Paris.
- [KUI 89] KUIPERS B. J., Qualitative Simulation, **Artificial Intelligence**, 29, p.289-388, 1989.
- [NIG 92] NIGAM Anil and Bhaskar R., Qualitative Reasoning about a Large System Using Dimensional Analysis, In **Recent Advances in Qualitative Physics**, Cambridge: The MIT Press, 1992, p. 387-398.
- [RAN 92] RANDALL Davis and Hamscher Walter, Model-Based Diagnosis: Troubleshooting, In **Readings in Model-Based Diagnosis**, San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers, 1992, p.3-24.
- [RAO 93] RAO Nageswara S. V., Computational Complexity Issues in Operative Diagnosis of Graph-based System, **IEE Transactions on Computers**, V. 42. N. 4, p. 447- 457, 1993.
- [ROQ 91] ROQUE W. L., Automated Qualitative Reasoning with Regime Analysis, **Trabalhos de Matemática**, 255, 1991.
- [ROQ 95] ROQUE Waldir L. e OLJNYK J.C., Computação Simbólica com Álgebra DuAL. **II WORKSHOP ON COMPUTER ARITHMETIC, INTERVAL AND SYMBOLIC COMPUTATION**, 1995, Recife, p.75-77.
- [TRA 95] TRAVÉ-MASSUYÈS Louise and Milne Robert. Application oriented qualitative reasoning, **The Knowledge Engineering Review**, Vol 10:2, (1995), 181-204
- [TRA 95a] TRAVÉ-MASSUYÈS Louise, Qualitative reasoning over time: history and current prospects. **The Knowledge Engineering Review**, V 7, n.1, p.1-18, 1992.
- [WHI 68] WHITNEY H. The mathematics of physic quantities. Part I: Mathematical Models for Measurement. **American Mathematical Monthly**, 75, p.115-138.

- [WHI 68a] WHITNEY H. The mathematics of physic quantities. Part II:Quantity Structures and Dimensional Analysis. **American Mathematical Monthly**, 76, p.227-256 ,1968.
- [DRO 53] DROBOT S.,On the foundations of dimensional analysis.**Studia Mathematica**, 14, p.84-99,1953.
- [WER 94] WERTHNER Hannes, **Qualitative Reasoning Modeling and Generation of Behavior**. New York:Springer-VerlagWien New York, 1994, 179 p.