

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**SISTEMA ESPECIALISTA PROTÓTIPO PARA
APOIO A ENSAIOS DE CONDICIONADORES DE AR DOMÉSTICOS**

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

CINTIA ABDELNUR LOPES, Eng.

FLORIANÓPOLIS

2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

**SISTEMA ESPECIALISTA PROTÓTIPO PARA
APOIO A ENSAIOS DE CONDICIONADORES DE AR DOMÉSTICOS**

CINTIA ABDELNUR LOPES, Eng.

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

sendo aprovada em sua forma final

Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng. - Orientador

Eduardo Alberto Fancello, D. Sc. - Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Victor Juliano De Negri, Dr. Eng. (Presidente)

Nelson Back, Ph. D.

Jader Riso Barbosa Junior, Ph. D.

Dedico este trabalho a todas às pessoas que contribuíram para a execução deste trabalho, de forma direta ou indiretamente, principalmente a meu marido, Luís.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Dorival Lopes Pavin e Miriam Abdelnur Lopes, por abrirem os caminhos para eu chegar até este título.

Ao meu marido, Luís, pelo eterno incentivo e apoio incondicional.

Ao professor Jonny Carlos da Silva, por transferir seus conhecimentos com empenho e sabedoria, tornando o trabalho possível.

Ao especialista Rogério Soares Brisola, que através de sua imensa sabedoria tornou também possível a realização deste trabalho.

À *Whirlpool S.A. Unidade de Eletrodomésticos*, por me possibilitar a oportunidade de ampliar meus conhecimentos.

E a todos os meus familiares e amigos que direta ou indiretamente tiveram sua participação e compreensão da minha ausência neste período.

SUMÁRIO

Sumário	V
Lista de figuras	VII
Lista de tabelas	IX
Lista de tabelas	IX
Lista de quadros	X
Simbologia	XI
Resumo	XIII
Abstract	XIV
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 ASPECTOS GERAIS	1
1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES	2
1.3 METODOLOGIA	5
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	7
CAPÍTULO 2	8
FUNDAMENTOS DE PSICOMETRIA E REFRIGERAÇÃO	8
2.1 FUNDAMENTOS DE PSICOMETRIA	8
2.2 FUNDAMENTOS DE REFRIGERAÇÃO	13
2.3 O PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM CONDICIONADOR DE AR	20
2.4 TIPOS DE CONDICIONADORES DE AR	23
2.5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	24
2.6 DETERMINAÇÃO EMPÍRICA DE PARÂMETROS	26
CAPÍTULO 3	33
ALGUNS FUNDAMENTOS DE SISTEMAS ESPECIALISTAS E AQUISIÇÃO DE CONHECIMENTO	33
3.1 DEFINIÇÃO DE SISTEMAS ESPECIALISTAS	33
3.2 ESTRUTURA DE UM SISTEMA ESPECIALISTA	36
3.3 MÉTODOS DE REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO	43
• Regras de produção	43
• Modelagem orientada a objetos	44
• Redes Semânticas	46
3.4 DESENVOLVIMENTO INCREMENTAL	47
3.5 IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMAS ESPECIALISTAS	49
3.6 ANÁLISE DE DIFERENTES SISTEMAS ESPECIALISTAS APLICADOS NO MESMO DOMÍNIO DE CONHECIMENTO	51
3.7 PROCESSO DE AQUISIÇÃO DE CONHECIMENTO	55
CAPÍTULO 4	62
MODELAGEM DO SISTEMA ESPECIALISTA PROTÓTIPO	62
4.1 METODOLOGIA	62
4.2 REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO	64
4.3 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	71
4.4 CARACTERÍSTICAS DO SE PROPOSTO	73

CAPÍTULO 5	81
VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO	81
5.1 INTRODUÇÃO	81
5.2 ASPECTOS IMPORTANTES SOBRE VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DE SISTEMAS ESPECIALISTAS	82
5.3 TESTES ALFA & BETA	83
5.4 VERIFICAÇÃO DO SISTEMA ESPECIALISTA PROTÓTIPO	84
5.5 DEFINIÇÃO DE MÉTRICAS PARA VALIDAÇÃO	86
5.6 VALIDAÇÃO DO SISTEMA ESPECIALISTA PROTÓTIPO	86
CAPÍTULO 6	88
CONCLUSÕES	88
6.1 INTRODUÇÃO	88
6.2 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	89
6.3 COMENTÁRIOS SOBRE O DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO	90
6.4 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	92
6.5 COMENTÁRIOS FINAIS	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
APÊNDICES	100
APÊNDICE A	101
REGRAS	101
APÊNDICE B	105
VERIFICAÇÃO	105
APÊNDICE C	108
VALIDAÇÃO	108
APÊNDICE D	112
HISTÓRICO DOS CONDICIONADORES DE AR	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Metodologia C2C com seus respectivos pedágios e marcos.....	3
Figura 2.1 – Representação esquemática da Carta Psicrométrica	10
Figura 2.2 – Carta Psicrométrica para o nível do mar	12
Figura 2.3 – Representação esquemática do ciclo de refrigeração.....	14
Figura 2.4 – Esquema do diagrama p-h para o ciclo ideal e real (em azul)	14
Figura 2.5 – Diagrama p-h (adaptado de STOECKER & JONES, 1985).....	16
Figura 2.6 – Esquema de funcionamento de um condicionador de ar para resfriar um ambiente	21
Figura 2.7 – Esquema de funcionamento de um condicionador de ar para aquecer um ambiente	22
Figura 2.8 – Selo PROCEL de economia de energia para eletrodomésticos	25
Figura 2.9 – Etiqueta de Consumo de Energia para splits.....	26
Figura 2.10 – Representação esquemática da vista lateral de um calorímetro com condicionador de ar instalado.....	28
Figura 2.11 – Interface atual do software para aquisição de dados do calorímetro.....	30
Figura 2.12 – Curva de ensaio para determinar o ponto ótimo de quantidade de gás refrigerante e dimensão de capilar	31
Figura 3.1 – Representação da estrutura de um Sistema Especialista,	37
Figura 3.2 – Busca em Profundidade	40
Figura 3.3 – Busca em Amplitude	40
Figura 3.4 – Exemplo de rede semântica adaptado ao domínio de aplicação.....	47
Figura 3.5 – Representação de um modelo incremental e iterativo	48
Figura 3.6 – Representação do modelo incremental e iterativo aplicado ao SE proposto.....	49
Tabela 3.2 – Exemplo da definição das saídas do SE desenvolvido	56
Tabela 3.3 – Definição das entradas para RAC 10.000 Btu/h.....	59
Tabela 3.4 – Definição das entradas para RAC 12.000 Btu/h.....	59
Tabela 3.5 – Definição das entradas para Split 10.0000 Btu/h	60
Tabela 3.6 – Definição das entradas para Split 12.000 Btu/h.....	60
Figura 4.1 – Encadeamento entre as regras de 1 a 4.....	67
Figura 4.2 – Encadeamento entre as regras de 2 a 8.....	68

Figura 4.3 – Encadeamento entre as regras 5, 9, 10 e 11	69
Figura 4.4 – Encadeamento entre todas as regras	70
Figura 4.5 – Exemplo de apresentação de dados de saída do SE para um determinado grupo de valores	75
Figura 4.6 – Exemplo de apresentação de dados de saída do SE	77
Figura 4.7 – Exemplo de apresentação de dados de saída do SE	78
Figura 4.8 – Exemplo de apresentação de dados de saída do SE	79
Figura A.1 – Encadeamento entre as regras	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Vantagens e desvantagens de Sistemas Especialistas	36
Tabela 3.2 – Exemplo da definição das saídas do SE desenvolvido	56
Tabela 3.3 – Definição das entradas para RAC 10.000 Btu/h	59
Tabela 3.4 – Definição das entradas para RAC 12.000 Btu/h	59
Tabela 3.5 – Definição das entradas para Split 10.0000 Btu/h	60
Tabela 3.6 – Definição das entradas para Split 12.000 Btu/h.....	60
Tabela B.1 – Valores de projeto utilizados na Verificação	105
Tabela B.2 – Nomenclatura dos valores medidos utilizada na Verificação	105
Tabela B.3 – Numeração das saídas e as 81 possibilidades de variação de resultados medidos utilizada na Verificação	106
Tabela C.1 – Valores de projeto utilizado para realizar a Validação dos Resultados do SE	108
Tabela C.2 – Nomenclatura utilizada para a Validação dos Resultados do SE	109
Tabela C.3 – Ferramenta de apoio para realizar a Validação dos Resultados do SE	110

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Definição das entradas do SE proposto para RAC.....	58
Quadro 3.2 – Definição das regras do SE proposto.....	61
Quadro 4.1 – Definição das Classes e seus atributos.....	65
Quadro 4.2 – Definição da instância para os parâmetros de projeto.....	66
Quadro 4.3 – Síntese da evolução das versões.....	72

SIMBOLOGIA

Alfabeto Latino:

p	Pressão total da mistura, Pa
p_a	Pressão parcial do ar seco, Pa
p_w	Pressão parcial do vapor d'água, Pa
T_{BS}	Temperatura de bulbo seco, °C
T_{BU}	Temperatura de bulbo úmido, °C
T_o	Temperatura de ponto de orvalho, °C
W	Umidade absoluta, kg de vapor de água / kg de ar seco
UR	Umidade relativa, %
h	Entalpia, kJ/kg
u	Energia interna, J/kg
x	Título, adimensional
$h_{l,e}$	Entalpia de líquido para evaporação, kJ/kg
$h_{v,e}$	Entalpia de vapor para evaporação, kJ/kg
$h_{l,c}$	Entalpia de líquido para condensação, kJ/kg
T	Temperatura, °C, °F
p_t	Pressão atmosférica, Pa
p_v	Pressão parcial do vapor d'água, Pa
R	Constante do gás, J/kg.K
q_{ref}	Efeito de refrigeração, W
q_{cond}	Calor cedido pelo condensador, W
\dot{Q}_{ref}	Capacidade de refrigeração, W
\dot{W}_{comp}	Potência do compressor ou trabalho de compressão, W
\dot{Q}_{cond}	Taxa de transferência de calor no condensador, W
\dot{Q}_{comp}	Taxa de transferência de calor no compressor, W
\dot{Q}_{tub}	Taxa de transferência de calor nas canalizações, W
\dot{m}	Fluxo de massa do fluido, kg/s
V	Vazão volumétrica na entrada do compressor, m ³ /s
RAC	<i>Room Air Conditioning</i>
S-RAC	<i>Split Room Air Conditioning</i>

IA	Inteligência Artificial
SE	Sistema Especialista

Alfabeto Grego:

ε	Coefficiente de performance, adimensional
η	Coefficiente de eficiência, adimensional
ν	Volume específico, m^3/kg de ar seco
ν_C	Volume específico no ponto C, m^3/kg de ar seco
ρ	Densidade do ar seco, kg/m^3

Índices:

a	Ar seco
w	Vapor d'água
l,e	Líquido para evaporação
v,e	Vapor para evaporação
l,c	Líquido para condensação
g	Vapor
f	Líquido
fg	De líquido para vapor
ref	Refrigeração
comp	Compressor
cond	Condensador
evap	Evaporador
tub	Canalizações

RESUMO

O projeto de um sistema de refrigeração consiste em determinar cada elemento deste sistema. Mesmo utilizando diferentes tipos de software para cálculo e projeto deste sistema, há necessidade em se determinar empiricamente alguns parâmetros, por exemplo, a dimensão ideal do comprimento e do diâmetro do tubo capilar e a quantidade ideal de gás refrigerante. É uma tarefa que depende tanto do conhecimento teórico como largamente do conhecimento heurístico adquirido ao longo de anos de experiência.

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um Sistema Especialista que tem o objetivo de auxiliar nesta tarefa de determinação empírica de parâmetros do sistema de refrigeração, especificamente a quantidade de fluido refrigerante e a dimensão ideal do tubo capilar no desenvolvimento de condicionadores de ar, tornando esta etapa mais eficaz e dinâmica através da equalização e disseminação do conhecimento.

Primeiramente, são apresentados alguns conceitos fundamentais de Psicrometria e Refrigeração necessários à melhor compreensão do trabalho, assim como a apresentação dos procedimentos atuais de ensaios realizados em uma indústria de condicionadores de ar. Em seguida é feita uma exposição dos principais conceitos relativos a Sistemas Especialistas e como estes podem ser aplicados para auxiliar a fase de desenvolvimento de produtos de condicionadores de ar.

Após a fundamentação teórica apresenta-se o desenvolvimento do Sistema Especialista, descrevendo como este foi elaborado, detalhes da implementação computacional e suas principais características, assim como o processo de Verificação e Validação. Nesta etapa demonstra-se também o algoritmo que foi utilizado por meio da manipulação dos seguintes parâmetros: temperatura de evaporação, temperatura de condensação, delta de superaquecimento e capacidade de refrigeração.

Apresentam-se, finalmente, as conclusões sobre o trabalho, onde são feitas considerações sobre os resultados alcançados, as potencialidades a serem exploradas em trabalhos futuros e comentários finais.

Palavras-chave: Equipamentos de Refrigeração, Ensaios, Sistemas Especialistas

ABSTRACT

The refrigeration system design consists of each element determination. Even using several computer software available for this system design, a few parameters have to be empirically determined, such as the ideal capillary tube dimension and the gas charge. This task depends on the theoretical knowledge, as well the heuristic learned with years of experience.

This work describes an Expert System development which has the goal to support the empirical refrigeration system development, as the gas charge and the ideal capillary tubing dimension determination while developing Air Conditioning, providing a more efficient process by the knowledge equalization and dissemination.

Initially, a few Psychometric and Refrigeration's system concepts used during this development are shown, as well as the current testing done at the Air Conditioning industry. Next, it is shown the main Expert System concepts and how they can be used and applied into this product development process.

After this entire theoretical basis, the Expert System prototype development is presented, as well as its main characteristics, the computational implementation and the Verification and Validation process. It's also shown the algorithm used thought the manipulation of the superheating temperature variation, evaporating and condensation temperatures and the cooling capacity.

Finally, in the conclusion section a few considerations about this work are presented, the results achieved and the potential growth for future versions.

Key-words: Refrigeration Equipment, Testing, Expert System

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos Gerais

O escopo desse trabalho contempla o desenvolvimento de um Sistema Especialista protótipo para auxiliar na fase de desenvolvimento de condicionadores de ar domésticos na *Whirlpool S.A. Unidade de Eletrodomésticos* – referida a partir de então como empresa-alvo, empresa multinacional de grande porte fabricante de eletrodomésticos, também conhecidos como linha-branca.

Um Sistema Especialista é uma classe de programa de computador desenvolvido por pesquisadores de Inteligência Artificial durante os anos 70 e aplicado comercialmente durante os anos 80. São programas constituídos por uma série de regras que analisam informações (normalmente fornecidas pelo usuário do sistema) sobre um determinado domínio de problema. Tem a finalidade de resolver problemas e interage com o usuário do sistema, inferindo através da sua Base de Conhecimentos para apresentar as soluções. É uma ferramenta útil para a resolução de problemas onde não se possui um método analítico de resolução estabelecido e onde o conhecimento necessário para a sua resolução seja de natureza heurística¹, ou seja, conhecimento obtido através da experiência na resolução do problema (GIARRATANO & RILEY, 2005).

Atualmente na empresa-alvo, a etapa de ensaios para desenvolvimento de produtos é longa e repetitiva, e depende largamente da experiência dos técnicos que operam os calorímetros, adquirida durante os anos de atividades. O propósito desse Sistema Especialista é tornar essa etapa mais dinâmica e exata, contribuindo assim

¹ Heurística significa um método analítico utilizado para o descobrimento de verdade científica; ciência auxiliar da História, que estuda a pesquisa das fontes (Aurélio Buarque de Hollanda, 1982)

para uma redução no tempo de ensaios de determinação de parâmetros do sistema de refrigeração e, conseqüentemente, acelerando os lançamentos de produtos no mercado.

Este trabalho foi dividido em capítulos de forma a facilitar a leitura e a compreensão. Primeiramente são apresentados alguns conceitos fundamentais de Psicrometria e Refrigeração, necessários ao desenvolvimento e entendimento do trabalho, e a apresentação dos procedimentos atuais de ensaios realizados na empresa-alvo. Em seguida é feita uma exposição dos principais conceitos relativos a Sistemas Especialistas e como estes podem ser aplicados para auxiliar a fase de desenvolvimento de produtos de condicionadores de ar.

Após a leitura deste trabalho, poderá ser observado que uma grande contribuição para a empresa-alvo será a redução no tempo de desenvolvimento de produtos, podendo mais rapidamente lançar os produtos no mercado, mas, principalmente, criar a sistematização e preservação do conhecimento garantindo a disponibilidade deste conhecimento especializado para todas as pessoas envolvidas no processo de desenvolvimento de produtos.

1.2 Objetivos e Contribuições

O processo de desenvolvimento de produtos na empresa-alvo segue a metodologia C2C² (*Customer to Customer*) e significa que tudo começa no consumidor e termina nele, sendo ele o alvo que justifica todas as ações e projetos de produtos. Esta metodologia pode ser subdividida didaticamente em três fases principais: Concepção, Conversão e Execução.

Estas três fases são separadas por diversos pedágios e marcos, conhecidos como *Tollgates* e *Milestones*, conforme demonstrado na Fig. 1.1. Esses pedágios e marcos são necessários para o acompanhamento do projeto e análise das decisões tomadas até então. Nos pedágios (*tollgates*), após análise do projeto, são tomadas decisões gerenciais sobre a continuidade ou não dos projetos e se recursos continuarão sendo alocados nos mesmos.

² Adaptado de material da intranet da empresa-alvo

Nos marcos (*milestones*) são analisados se os objetivos ou atividades críticas foram alcançados, também são conduzidos para checar o andamento do projeto e endereçar pontos que ficaram pendentes no pedágio anterior. Em ambas as etapas a decisão de seguir ou não com o projeto tem como critérios aspectos técnicos, econômicos e financeiros.

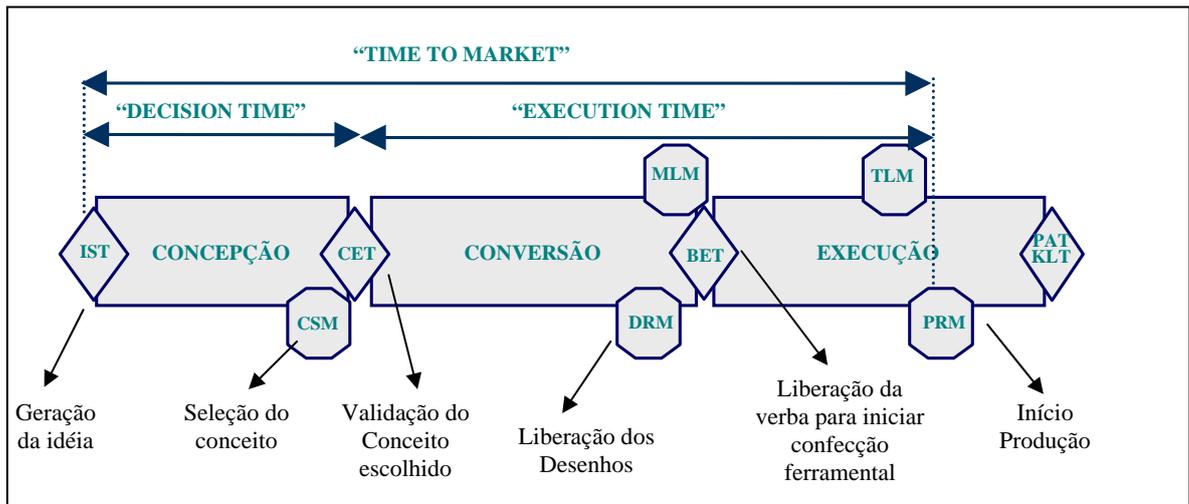


Figura 1.1 – Metodologia C2C com seus respectivos pedágios e marcos³

Os principais marcos são representados pelas letras que iniciam sua nomenclatura, sendo eles: IST (*Idea Screen Tollgate*) é o fórum que aprova o início de um projeto para a fase de Concepção e negocia os recursos necessários para a sua condução; CSM (*Concept Selection Milestone*) é o fórum onde convergem as alternativas de conceito de produto para uma solução e se verifica se o conceito pré-definido atende aos requisitos do produto e viabilizam o atendimento à produção; CET (*Concept Evaluation Tollgate*) é quando se aprova a viabilidade técnica/econômica do projeto; DRM (*Design Release Milestone*) quando ocorre a liberação do projeto para a manufatura; MLM (*Market Launch Milestone*) quando é apresentado o Plano de Lançamento no mercado com base na análise de recursos existentes; BET (*Business Evaluation Tollgate*) é neste fórum que ocorre a aprovação da fase de Conversão e a continuidade do projeto (fase de Execução) analisando a viabilidade técnica/econômica do mesmo com base na análise de

³ Obtido de: Intranet e material de treinamento interno da empresa-alvo

riscos, além de liberar a verba para os investimentos necessários; TLM (*Transition Launch Milestone*) é a liberação para comercialização do produto; PRM (*Production Release Milestone*) é a liberação para o início de produção após a conclusão do processo de aprovação dos produtos; PAT (*Post Audit Tollgate*) e KLT (*Key Learnings Tollgate*) são utilizados para comparar os resultados obtidos com os requisitos do projeto, aplicando eventuais ações corretivas, bem como avaliar o processo de desenvolvimento de novos produtos e o desempenho do Grupo de Projeto.

Durante as fases de Concepção e Conversão, além de decisões embasadas em cálculos e simuladores, existe necessidade de ensaios para determinar e avaliar alguns parâmetros do sistema de refrigeração. Essa fase é longa e compete aos engenheiros e técnicos de laboratório muita interação para se alcançar os objetivos do Projeto. **É nesta fase que o Sistema Especialista em questão visa contribuir para acelerar este processo.**

Identificou-se a potencialidade de criação desse Sistema Especialista uma vez que, mesmo após o projeto do sistema de refrigeração feito pelo Engenheiro de Refrigeração, existe a necessidade de uma determinação empírica da dimensão do tubo capilar – elemento de expansão do sistema – e da quantidade ideal de gás refrigerante – conhecido como carga de refrigerante. Essas duas variáveis são alteradas praticamente simultaneamente e a cada modificação todo o sistema de refrigeração precisa ser medido e balanceado novamente. Esta tarefa é realizada pelo técnico de refrigeração utilizando um calorímetro – uma câmara com ambiente controlado que simula o uso real do aparelho de condicionamento de ar - e seu conhecimento teórico e experiências prévias sobre o assunto determinam a velocidade com que se obtém a conclusão do desenvolvimento de um produto.

Uma forma de disponibilizar o conhecimento e a experiência às pessoas consideradas novatas em um domínio de conhecimento é através do desenvolvimento de um Sistema Especialista. Desta forma, é possível que pessoas sem a experiência necessária para realização da tarefa consigam obter um resultado próximo ou semelhante ao obtido por um especialista (LIEBOWITZ, 1988). Essa foi a motivação para se realizar o presente trabalho.

Com base nisto, pode-se definir os objetivos gerais e específicos desta pesquisa, sendo eles:

Objetivos Gerais

- ❖ Sistematizar e disponibilizar o conhecimento dos profissionais da engenharia de desenvolvimento de produtos de condicionadores de ar da empresa-alvo por meio do desenvolvimento de um protótipo de Sistema Especialista

Objetivos Específicos

- ❖ Mapear o processo de determinação empírica de determinação de carga de refrigerante e dimensão de tubo capilar no desenvolvimento de condicionadores de ar;
- ❖ Elaborar um Sistema Especialista que minimize as dificuldades encontradas pelos técnicos durante a fase de ensaios de condicionadores de ar;
- ❖ Reduzir o tempo de ensaios durante o desenvolvimento de produtos na empresa-alvo;
- ❖ Disponibilizar e reter o conhecimento e a heurística do processo empírico de determinação de carga de refrigerante e dimensão (comprimento e diâmetro ideais) de tubo capilar no desenvolvimento de condicionadores de ar.

1.3 Metodologia

O problema apresentado neste trabalho será abordado através do desenvolvimento de um Sistema Especialista utilizando a metodologia de Modelagem Orientada a Objetos (GIARRATANO & RILEY, 2005; RUSSEL & NORVIG, 2004; GONZALEZ & DANKEL, 1993).

De uma forma resumida podem-se definir as etapas do desenvolvimento em (SILVA, 1998):

1. *Identificação*: Definição do tipo e escopo do problema, dos recursos necessários, dos objetivos do sistema e escolha dos especialistas.

2. *Conceitualização*: O Engenheiro do Conhecimento (EC) – quem desenvolve o SE - e os especialistas decidem quais conceitos, relações, estratégias, sub-tarefas e restrições são necessárias para resolver os problemas no escopo específico.

3. *Formulação*: Expressa os conceitos chaves e relações de acordo com a estrutura da ferramenta de implementação a ser utilizada.

4. *Implementação*: Codificação do sistema.

5. *Verificação e Validação*: Teste da performance e utilidade do sistema.

A complexidade envolvida no desenvolvimento de um SE torna necessária que sua implementação seja feita por etapas. O método mais utilizado para este fim é o **modelo incremental**, onde o sistema é desenvolvido a partir de incrementos na sua funcionalidade, através de ciclos definidos de desenvolvimento (GONZALEZ & DANKEL, 1993; GIARRATANO & RILEY, 2005).

A cada ciclo de desenvolvimento, realizam-se as seguintes tarefas:

- Aquisição de conhecimento (conceitualização e formulação)
- Implementação
- Verificação e Validação

O objetivo de cada ciclo é incorporar ao sistema uma ou mais novas funcionalidades, tornando-o cada vez mais completo. Os detalhes da aplicação desse modelo ao longo do desenvolvimento do presente trabalho serão abordados no item 3.4 do capítulo 3.

A utilização desse modelo emprega também o conceito de prototipagem (GONZALEZ & DANKEL, 1993) onde a cada ciclo de desenvolvimento tem-se um protótipo utilizável. Por não se tratar de um sistema comercial, ao final do trabalho será apresentado um sistema protótipo, que por sua vez poderá ser incrementado até chegar ao nível de sistema industrial.

1.4 Estrutura do trabalho

No capítulo 2 são apresentados conceitos referentes à Psicrometria e à Refrigeração, com ênfase ao processo de determinação empírica dos parâmetros envolvidos nos condicionadores de ar, onde se utilizam técnicas experimentais para determinar a dimensão ideal do tubo capilar e a quantidade ideal de gás refrigerante para cada sistema de refrigeração desenvolvido.

No capítulo 3 é abordada a teoria de Sistemas Especialistas e como são desenvolvidos, onde se realizou também uma busca por SE similares ao dissertado.

O capítulo 4 apresenta o processo de desenvolvimento do Sistema Especialista protótipo, a metodologia utilizada para representar o conhecimento, alguns detalhes da implementação computacional e as características exclusivas e inerentes ao SE apresentado.

No capítulo 5 apresenta-se a Verificação e Validação do protótipo de Sistema Especialista, demonstrando por meio de testes a sua funcionalidade e sua performance.

Por último, são apresentadas no capítulo 6 conclusões a respeito do trabalho desenvolvido e as recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS DE PSICROMETRIA E REFRIGERAÇÃO

Sistemas Especialistas possuem diversas aplicações. O foco do Sistema Especialista proposto é atuar na etapa experimental de desenvolvimento do sistema de refrigeração de condicionadores de ar, tornando-a mais eficaz e veloz dentro da empresa-alvo. Embora haja a participação de um especialista em refrigeração, optou-se por realizar uma revisão dos principais conceitos de Psicrometria e Refrigeração de forma a embasar melhor o trabalho e também esclarecer alguns termos utilizados ao longo da elaboração deste material.

2.1 Fundamentos de Psicrometria

Psicrometria é o estudo das misturas de ar e vapor de água. O ar que se respira não é totalmente seco, mas sim uma mistura de ar e vapor de água. Em alguns processos a água é removida do ar, enquanto em outros é adicionada. O condicionador de ar busca alterar as propriedades do ar de forma a tornar o ambiente agradável e confortável para o consumidor (STOECKER & JONES, 1985).

O ar seco é uma mistura de diversos componentes gasosos, na essência nitrogênio (78,09%), oxigênio (20,95%), argônio (0,93%) e CO₂ (0,03%). O ar úmido é uma mistura pseudo-binária de ar seco e vapor d'água. O ar atmosférico, ainda, é uma mistura de ar úmido mais contaminantes, como fumaça, pólen, poluentes gasosos e particulados (STOECKER & JONES, 1985).

Podemos dizer que a quantidade de vapor d'água no ar úmido pode variar de zero (ar seco) até um valor máximo que depende da temperatura e pressão. Este valor máximo é a saturação, um estado de equilíbrio neutro entre o ar úmido e as fases condensadas d'água (líquida ou sólida). Como o ar úmido é considerado uma mistura binária, e porque em condições típicas ele se comporta como um gás perfeito, a sua pressão total p pode ser descrita por:

$$p = p_a + p_w \quad (2.1)$$

onde: p = pressão total da mistura [Pa]

p_a = pressão parcial do ar seco [Pa]

p_w = pressão parcial do vapor d'água [Pa]

Na saturação, a pressão parcial do vapor d'água depende da temperatura da mistura e pode ser calculada a partir da curva de saturação da água. A saturação ocorre quando a pressão parcial do vapor d'água da mistura atinge a pressão de saturação do vapor d'água na temperatura em que está a mistura. Esta pressão varia exponencialmente com a temperatura, e colocando isto na forma gráfica, tem-se o início do traçado da Carta Psicrométrica, que é o gráfico que relaciona as propriedades do ar em função de sua temperatura e umidade para cada pressão atmosférica, representado esquematicamente na Fig. 2.1 e na sua forma final na Fig. 2.2. Para cada nível de pressão atmosférica há diferentes Cartas Psicrométricas que podem ser encontradas na literatura.

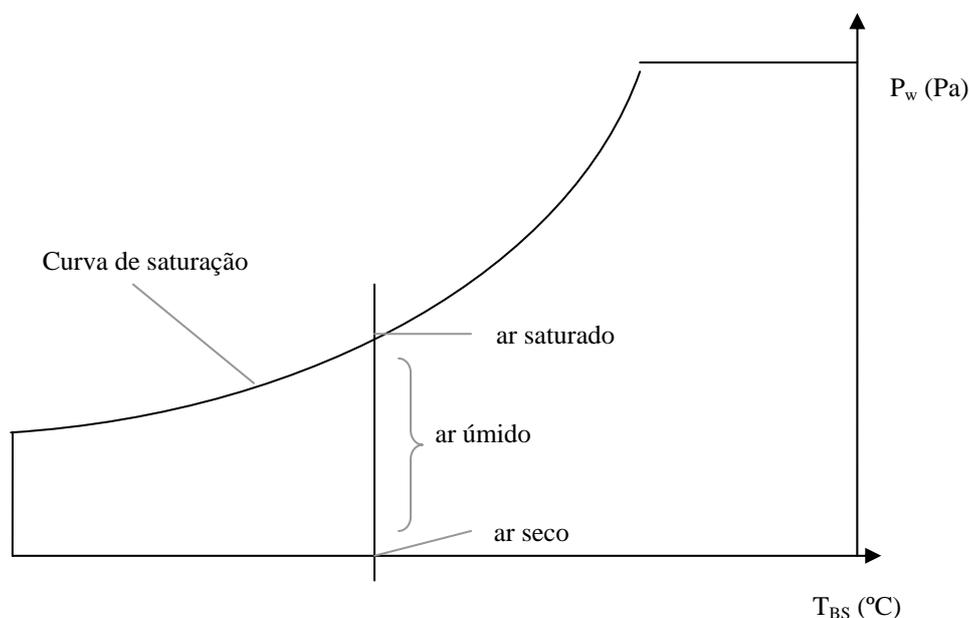


Figura 2.1 – Representação esquemática da Carta Psicrométrica (STOECKER & JONES, 1985)

As propriedades do ar são parâmetros que definem o estado do ar, sendo eles:

- *Temperatura de bulbo seco (T_{BS})*: temperatura do ar medida com um termômetro comum, apresentada no eixo horizontal da carta psicrométrica.
- *Temperatura de bulbo úmido (T_{BU})*: temperatura do ar medida com um termômetro comum, cujo bulbo de vidro é coberto com uma gaze úmida, provocando um resfriamento evaporativo. Quando o ar entra em contato com a água à temperatura ambiente ocorre a evaporação de água. A energia retirada para evaporar a água vem do próprio ar e conseqüentemente ocorre a diminuição da sua temperatura. Na Carta Psicrométrica, T_{BU} está representada em linhas diagonais que unem a linha de saturação aos eixos horizontais e verticais.
- *Temperatura de ponto de orvalho (T_o)*: é a menor temperatura a que o ar pode ser resfriado, sem que ocorra alguma condensação de vapor de água ou umidade. A temperatura de orvalho T_o é encontrada na Carta Psicrométrica ao traçar uma linha reta horizontal a partir do ponto onde se encontra o ar até

a linha de saturação, e lendo-se a temperatura no eixo horizontal.

- *Umidade absoluta (w)*: a umidade absoluta é a massa de água contida em 1 kg de ar seco. É a razão entre a massa de vapor d'água e a massa de ar seco na mistura. Na Carta Psicrométrica, é obtida ao traçar uma linha horizontal para a direita, desde o ponto do ar até o eixo vertical.
- *Umidade relativa (UR)*: razão entre a quantidade de umidade do ar e a quantidade máxima que ele pode conter na mesma temperatura. Ou seja, considerando $UR < 100\%$ tem-se que o ar ainda pode absorver uma quantidade de vapor, enquanto que para $UR = 100\%$ qualquer quantidade de vapor d'água a mais não é absorvida, e ocorre condensação. O cálculo da UR é dado pelo quociente entre a pressão parcial do vapor d'água e a pressão de saturação da água pura na mesma temperatura. A pressão de saturação da água é encontrada em tabelas de vapor, nas literaturas de termodinâmica básica.
- *Entalpia (h)*: a entalpia é uma das propriedades mais importantes do ar, pois é a variável envolvida nos balanços de energia. Na Carta Psicrométrica, as linhas de entalpia são inclinadas e os valores são encontrados no eixo acima da linha de saturação. Pode também ser obtida através da Equação 2.2, que é a entalpia específica da mistura na base do ar seco⁴:

$$h = h_a + wh_s \quad (2.2)$$

onde: h = entalpia [J/kg_{ar seco}]

h_a = entalpia do ar seco [J/kg_{ar seco}]

w = umidade absoluta [kg_{vapor d'água}/ kg_{ar seco}]

h_s = entalpia do vapor d'água [J/kg_{ar seco}]

- *Volume específico (v)*: é o quociente entre o volume ocupado pela mistura sobre a massa de ar seco, expresso em [m³/kg_{ar seco}]. Este é calculado

⁴ Em psicrometria, as propriedades intensivas são calculadas por unidade de massa de ar seco. A razão para isto deve-se ao fato da massa de vapor d'água e consequentemente a massa da mistura poder variar durante a realização de um processo, por exemplo, um processo de umidificação ou desumidificação (STOECKER & JONES, 1985).

através da Equação dos Gases Perfeitos (2.3) ou obtido através da Carta Psicrométrica.

$$v = R \left(\frac{T + 273,15}{p_t - p_v} \right) \quad (2.3)$$

onde: v = volume específico [$\text{m}^3/\text{kg}_{\text{de ar seco}}$]

R = constante do gás; do ar seco = $287\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$

T = temperatura da mistura [$^{\circ}\text{C}$]

p_t = pressão atmosférica [Pa]

p_v = pressão parcial do vapor d'água [Pa]

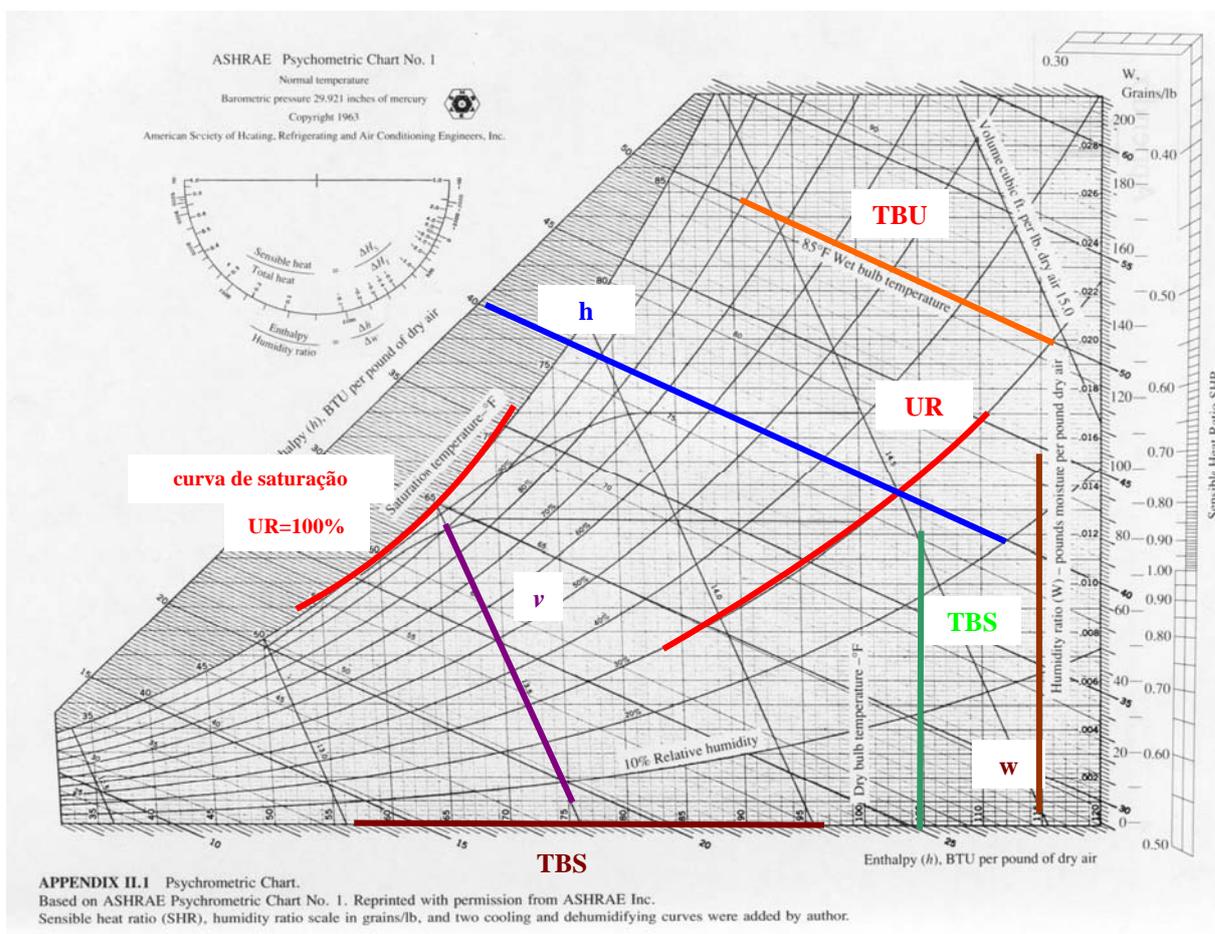


Figura 2.2 – Carta Psicrométrica para o nível do mar
(adaptado de ASHRAE, 1997)

As linhas de volume específico constante são encontradas na Carta Psicrométrica como linhas diagonais com maior inclinação vertical do que as linhas de entalpia e temperatura de bulbo úmido, como podem ser vistas na Fig. 2.2.

A massa específica é o inverso do volume específico, medida em $[\text{kg}/\text{m}^3]$ e pode ser calculada através da Equação 2.4.

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{p[\text{Pa}]}{R[\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}] \cdot T[\text{K}]} \quad (2.4)$$

Para caracterizar o estado termodinâmico de uma mistura binária, é preciso determinar no mínimo três propriedades intensivas. Uma vez que há uma carta Psicrométrica definida para cada pressão atmosférica, necessita-se de mais duas propriedades termodinâmicas para se definir o estado do ar.

2.2 Fundamentos de Refrigeração

O ciclo de refrigeração por compressão mecânica de vapor é o mais utilizado na prática como forma de se obter um ambiente refrigerado. Nesse ciclo, o vapor é comprimido, condensado, tendo posteriormente sua pressão diminuída de modo que o fluido possa evaporar a baixa temperatura (STOECKER & JONES, 1985). A Fig. 2.3 representa um ciclo padrão de refrigeração, onde constam as nomenclaturas de **A** a **E** para designar os pontos que têm seus estados termodinâmicos, posteriormente representados na Fig. 2.4.

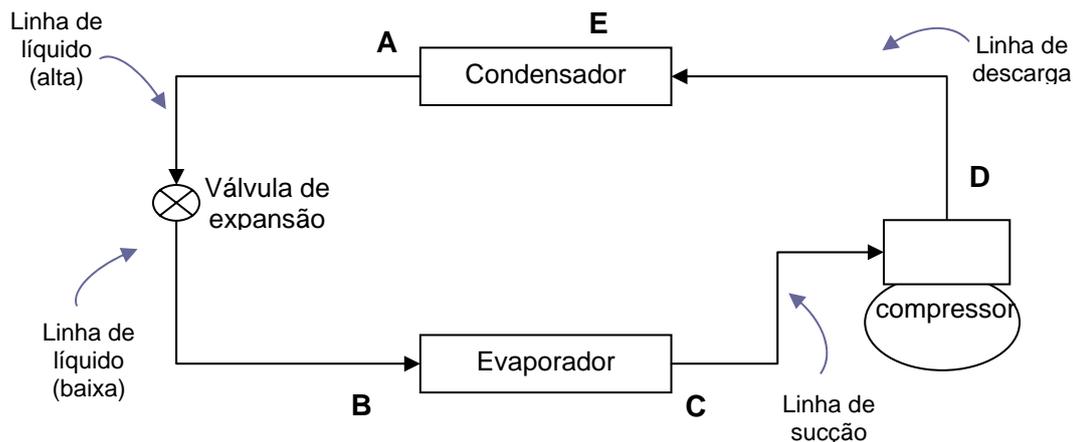


Figura 2.3 – Representação esquemática do ciclo de refrigeração

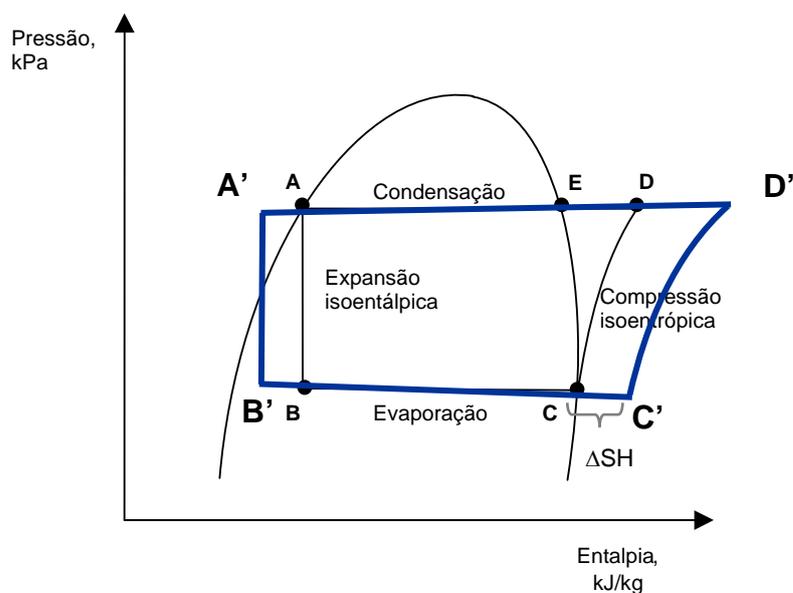


Figura 2.4 – Esquema do diagrama p-h para o ciclo ideal e real (em azul)
(STOECKER & JONES, 1985)

A Fig. 2.4 é uma representação esquemática do diagrama pressão-entalpia (p-h) para um ciclo ideal de refrigeração representado na Fig. 2.3. Sobrepondo-se ao ciclo ideal há o ciclo real de refrigeração – em linhas azuis – onde são aplicadas variações de grau de superaquecimento e de sub-resfriamento e também a diferença entre ambos os ciclos é caracterizada pela ineficiência dos processos envolvidos. A temperatura de superaquecimento é a diferença entre a temperatura medida na tubulação de sucção e a temperatura de saturação correspondente à pressão de

sucção. É crucial para evitar “golpe de líquido” no compressor e este é o primeiro parâmetro a ser analisado pelo Sistema Especialista durante a sua execução. Por meio da análise dos valores do delta de temperatura de superaquecimento medidos e os valores estabelecidos no projeto, é possível determinar se a quantidade de gás refrigerante está adequada ou não ao sistema de refrigeração proposto.

No ciclo padrão da Fig. 2.4, o ponto **C** encontra-se na condição de vapor saturado seco ($x=1$). Esta condição pode provocar a penetração de pequenas partículas de líquido no compressor e causar sérias avarias ao equipamento. Uma solução para se evitar essa situação é promover um superaquecimento do vapor na secção do compressor, representado pelo ponto **C'**. O superaquecimento pode ser conseguido através das seguintes maneiras:

- Superdimensionamento do evaporador;
- Utilizar um trocador de calor na saída do evaporador;
- Utilização de uma válvula de expansão termostática.

Da mesma forma, no ciclo padrão da Fig. 2.4, o ponto **A** representa o estado de um líquido saturado ($x=0$). Nessa condição, devido à perda de carga ou ganho de calor na linha do líquido, o fluido refrigerante pode sofrer vaporização parcial, o que pode prejudicar o rendimento do ciclo (a formação de bolhas de vapor pode reduzir o fluxo de refrigerante através do dispositivo de expansão). Uma solução para esse problema é provocar um sub-resfriamento do líquido na saída do condensador, representado na Fig. 2.4 pelo ponto **A'**.

Os meios para se obter o sub-resfriamento no sistema de refrigeração são:

- Troca de calor entre a linha/depósito de líquido com o meio ambiente;
- Superdimensionamento do condensador;
- Trocador de calor colocado na saída do condensador.

Uma importante maneira de se definir o estado do refrigerante, que também é tratado como um mistura binária (vapor + líquido) é através do *título*, onde segue abaixo a sua definição:

- *Título*⁵ (x): a região abaixo da curva na Fig. 2.4 é considerada a região de mistura saturada. Uma mistura (líquido + vapor) que esteja nesta região possui uma parte em estado líquido e o restante em estado de vapor. Para

⁵ Do inglês, *Quality*.

uma mistura homogênea na região de saturação de mistura, define-se como *título* a razão entre a massa de vapor dessa mistura e a massa total da mistura (m_v / m). O volume específico de uma mistura homogênea contendo $(1-x)$ kg de líquido saturado e x kg de vapor saturado por quilograma de mistura é obtido por (SURYANARAYANA e ARICI, 2002):

$$v = (1-x)v_f + xv_g = v_f + xv_{fg} = v_g - (1-x)v_{fg} \quad (2.5)$$

onde os subscritos significam:

- g = vapor (do inglês, *gas*)
- f = líquido (do inglês, *fluid*)
- fg = de líquido para vapor

Em aplicações frigoríficas, o diagrama p-h, representado na Fig. 2.5, é mais utilizado do que os de temperatura-entropia, pressão-volume ou entalpia-entropia. Isto se dá pelo fato de que nessas aplicações a entalpia é uma das propriedades mais importantes e a pressão pode ser determinada facilmente (STOECKER & JONES, 1985).

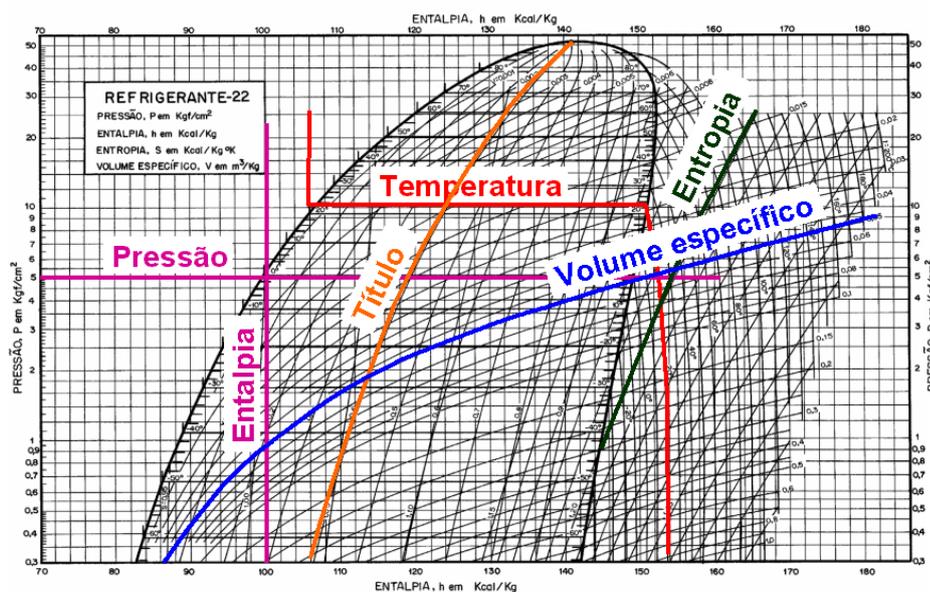


Figura 2.5 – Diagrama p-h (adaptado de STOECKER & JONES, 1985)

Recebendo um trabalho externo, o compressor aumenta a pressão do gás, que se condensa pela troca de calor com o ambiente. Ao chegar à válvula de expansão, ou tubo capilar, o refrigerante está na fase líquida e a perda de carga devido ao estrangulamento reduz a pressão e o líquido é evaporado, retirando calor do meio que se deseja refrigerar e reiniciando o ciclo ao retornar para o compressor (STOECKER & JONES, 1985).

A temperatura de saturação é a temperatura na qual um fluido mudará da fase líquida para a fase de vapor ou, reciprocamente, da fase de vapor para a fase líquida (DOSSAT, 2004).

Ao retirar calor do meio que se deseja abaixar a temperatura, o refrigerante evapora aumentando seu *título* gradualmente. Após passar pelo evaporador o refrigerante retorna para o compressor e o ciclo se reinicia (STOECKER & JONES, 1985).

Durante o ciclo, ocorre transferência de calor em vários pontos: evaporador, compressor, condensador, tubulações. Assim, aplicando a 1ª Lei da Termodinâmica, para todo o ciclo obtém-se:

$$\dot{Q}_{ref} + \dot{W}_{comp} = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{comp} + \dot{Q}_{tub} \quad (2.6)$$

onde: \dot{Q}_{ref} = capacidade de refrigeração [W]

\dot{W}_{comp} = potência do compressor [W]

\dot{Q}_{cond} = taxa de transferência de calor no condensador [W]

\dot{Q}_{comp} = taxa de transferência de calor no compressor [W]

\dot{Q}_{tub} = taxa de transferência de calor nas tubulações [W]

O coeficiente de performance (COP) é a relação entre a capacidade de refrigeração e a potência entregue ao compressor:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{ref}}{\dot{W}_{comp}} \quad (2.7)$$

O coeficiente de eficiência é a relação entre o efeito de refrigeração e o trabalho de compressão, e pode também ser escrito da seguinte forma:

$$\eta = \frac{(h_C - h_B)}{(h_D - h_C)} \quad (2.8)$$

O coeficiente de eficiência também é conhecido como *COP – Coeficiente de Performance*.

O efeito de refrigeração é a quantidade de calor por unidade de fluxo de massa do refrigerante removida pelo refrigerador ou condicionador de ar, o que corresponde à variação de entalpia no processo de evaporação.

$$\text{Assim: } q_{ref} = h_C - h_B \quad (2.9)$$

$$\text{O trabalho de compressão é dado por: } W_{comp} = h_D - h_C \quad (2.10)$$

$$\text{O calor cedido pelo condensador é dado por: } q_{cond} = h_A - h_D \quad (2.11)$$

A entalpia no ponto **D** é maior do que a entalpia no ponto **A**, como mostrado na Fig. 2.4. Desta forma a equação (2.11) tem o valor negativo, significando sentido contrário ao do efeito de refrigeração. Durante o processo de expansão, desconsidera-se a troca de calor, que é muito pequena quando comparada com outros termos. Para se conhecer o estado do fluido no ponto **B** (mistura de líquido e vapor) da Fig. 2.4, calcula-se o *título*, utilizando as entalpias obtidas em tabelas para cada tipo de refrigerante:

$$x_B = \frac{(h_C - h_{l,e})}{(h_{v,e} - h_{l,c})} \quad (2.12)$$

onde: $h_{l,e}$ = entalpia de líquido para evaporação

$h_{v,e}$ = entalpia de vapor para evaporação

$h_{l,c}$ = entalpia de líquido para condensação

h_C = entalpia no ponto **C** da Fig. 2.4

A capacidade de refrigeração \dot{Q}_{ref} de um refrigerador ou condicionador de ar é normalmente dada pela quantidade de calor removida por unidade de tempo [W ou Btu/h]. Assim, pode-se escrever:

$$\dot{Q}_{ref} = q_{ref} \cdot \dot{m} \quad (2.13)$$

onde:

\dot{m} = fluxo de massa do fluido [kg/s]

Pode-se também determinar a capacidade de refrigeração em função do deslocamento volumétrico do compressor:

$$\dot{Q}_{ref} = V \frac{(h_C - h_B)}{v_C} \quad (2.14)$$

onde:

V = vazão volumétrica na entrada do compressor [m³/s]

v_C = volume específico no ponto **C** da Fig.2.4 [m³/kg]

De modo geral utiliza-se na indústria e comércio de condicionadores de ar a unidade de medida de capacidade de refrigeração em *Unidades Térmicas Britânicas por hora* (Btu/h). A Unidade Térmica Britânica é definida como sendo a quantidade de calor necessário para mudar a temperatura de 1lb de água em 1°F, ou seja, adicionando-se 1Btu a uma libra de água, esta muda sua temperatura em 1°F (DOSSAT, 2004).

2.3 O princípio de funcionamento de um condicionador de ar

Em linhas gerais, pode-se dividir o condicionador de ar em seis componentes básicos e essenciais ao seu funcionamento, sendo eles:

- Compressor
- Condensador
- Evaporador
- Motor ventilador e pá
- Válvula de expansão
- Trocadores de Calor

O condicionador de ar tem como seu principal objetivo deixar ambientes com temperatura e umidade agradáveis criando uma sensação de conforto térmico (aquecendo ou refrigerando) ou até mesmo em determinados ambientes em que o seu uso é indispensável como, por exemplo: Centros de Processamento de Dados, Laboratórios, hospitais, etc.

O princípio de funcionamento dos condicionadores de ar, nada mais é do que a troca de calor do ambiente, através da passagem do ar pela serpentina do evaporador que por contato sofre queda ou aumento de temperatura, dependendo do ciclo utilizado, baixando a umidade relativa do ar.

Quando alcançada a temperatura desejada se faz uma leitura através de um sensor localizado no evaporador que por sua vez desliga o compressor, fazendo com que o equipamento mantenha a temperatura estável. Qualquer variação na temperatura estipulada aciona-se novamente o compressor que é responsável pela circulação do gás refrigerante dentro do sistema.

Segundo STOECKER & JONES (1985), buscam-se como fatores de referência para se obter o conforto térmico utilizando unidades de refrigeração e condicionamento de ar os seguintes valores:

- Temperatura de bulbo seco entre 22 e 27°C;
- Umidade relativa entre 40 e 60%;
- Movimentação do ar ($V_{ar} \sim 15$ m/min).

Operação em modo de Refrigeração⁶

No caso de operação em modo de refrigeração o gás sai do compressor em alta pressão e alta temperatura. No caminho que percorre no condensador (trocador de calor externo) o gás perde calor. No evaporador (trocador de calor interno), o gás chega a baixas temperaturas, pronto para refrigerar o ambiente interno e carregando o calor para o ambiente externo, conforme mostra o diagrama da Fig. 2.6.

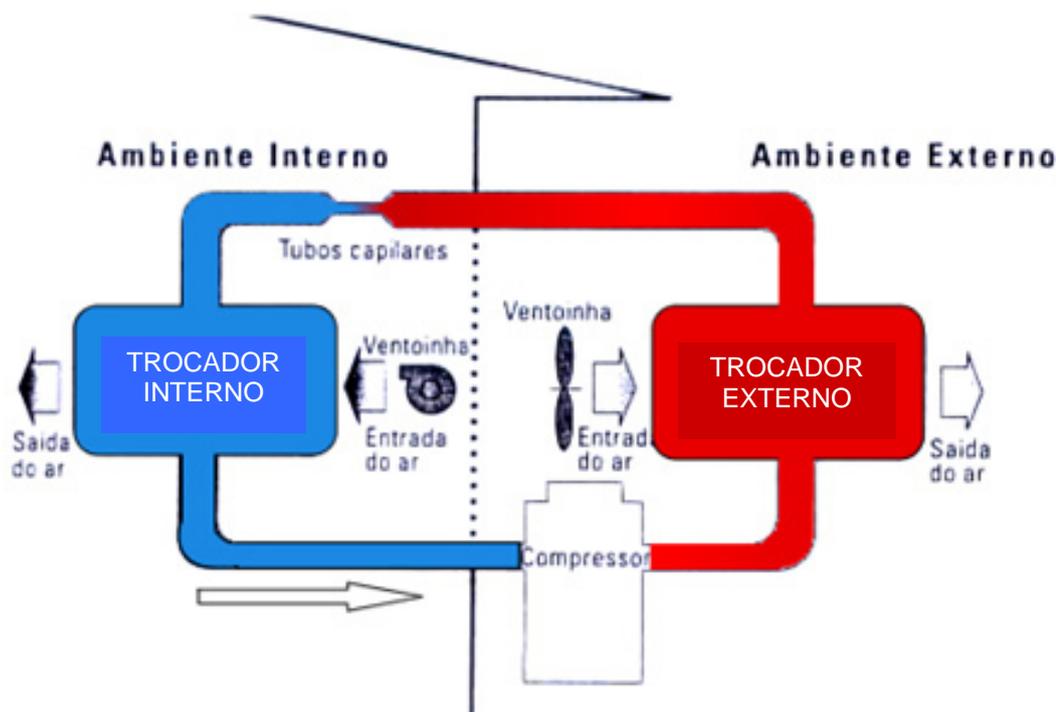


Figura 2.6 – Esquema de funcionamento de um condicionador de ar para resfriar um ambiente

Operação em modo de Aquecimento

Para operação em modo de aquecimento o princípio é o mesmo. A diferença é a utilização de uma válvula reversora no circuito de refrigeração que altera o sentido que o gás percorre, mediante o comando de acionamento desta função. Ao invés de preencher primeiro o trocador externo como no ciclo frio, o gás é direcionado primeiramente para o trocador interno. Com isso, os trocadores de calor alternam seu papel e suas funções, conforme pode ser visto na Fig. 2.7. Nesta

⁶ Adaptado de <<https://ssl876.websiteseguro.com/adias/loja/dicas1.asp>>

situação, o elemento que aquece é o trocador interno e o que resfria é o trocador externo.

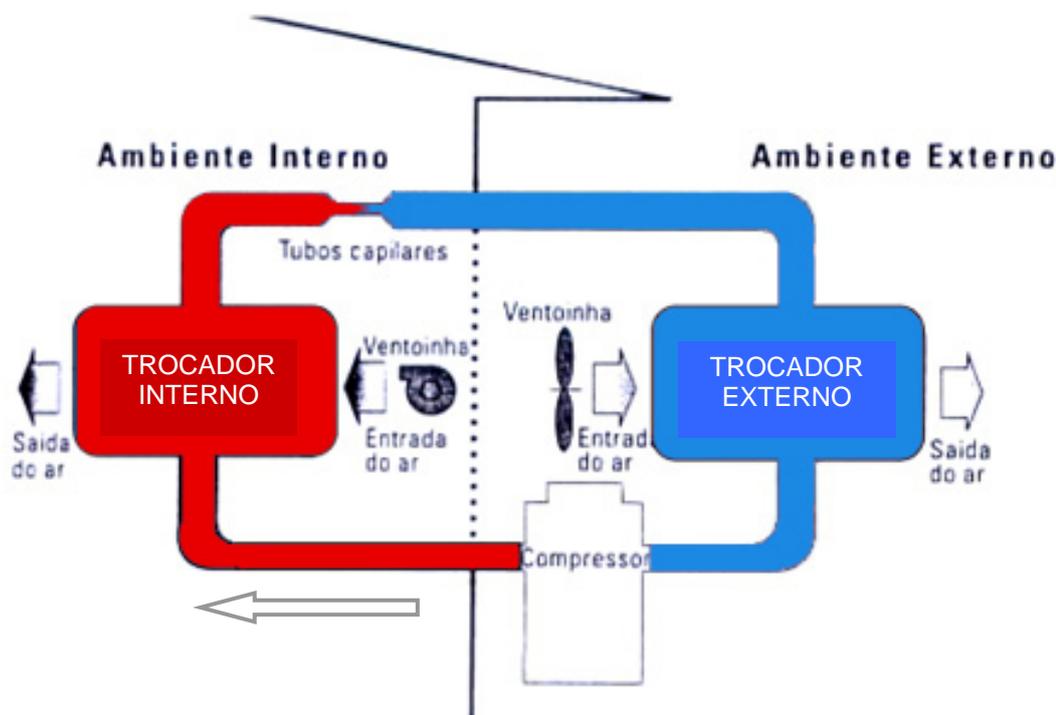


Figura 2.7 – Esquema de funcionamento de um condicionador de ar para aquecer um ambiente

Nos primórdios da refrigeração mecânica, o equipamento utilizado era volumoso, dispendioso e pouco eficiente. Este equipamento era também de natureza tal, que requeria que um mecânico ou um engenheiro de operação estivesse a postos durante todo o tempo. Isto limitava o uso da refrigeração mecânica a pequenas aplicações tais como fábricas de gelo, fábricas de empacotamento de carne, e grandes depósitos de armazenamento (DOSSAT, 2004).

Em um período de apenas algumas décadas, a refrigeração tornou-se a indústria gigantesca e de rápida expansão que é atualmente. Esse progresso explosivo aconteceu como resultado de diversos fatores. Primeiro, com o desenvolvimento de métodos de fabricação de precisão tornou-se possível produzir em curto prazo equipamentos mais eficientes. Isto, junto com o desenvolvimento de refrigerantes “seguros” e a invenção do motor elétrico de potência fracionária, tornou possível a pequena unidade de refrigeração que é tão usada atualmente em

aplicações, tais como refrigeradores e congeladores domésticos, pequenos aparelhos de ar condicionado e instalações comerciais. Atualmente, há poucas casas ou estabelecimentos comerciais que não possuam um ou mais conjuntos de refrigeração mecânica de qualquer gênero (DOSSAT, 2004).

Poucas pessoas, excluindo as diretamente ligadas à indústria, conhecem a parte importante que a refrigeração representou no desenvolvimento da sociedade altamente técnica nem fazem uma idéia de até que ponto a sociedade depende da refrigeração mecânica para sua perfeita existência. Não seria possível, por exemplo, preservar gêneros alimentícios em quantidades suficientes para sustentar a população urbana crescente, sem a refrigeração mecânica. Do mesmo modo, muitas das grandes construções nas quais está instalada a maioria das indústrias e comércio na nação, poderiam tornar-se insustentáveis nos meses de verão, por causa do calor, se não tivessem condicionamento de ar com equipamentos de refrigeração mecânica (DOSSAT, 2004).

Como o próprio nome indica, condicionamento de ar diz respeito à condição do ar em algum espaço ou área designada. Isto geralmente envolve controle não somente da temperatura do espaço, mas também de umidade do espaço e do movimento do ar ao longo de sua filtragem e purificação (DOSSAT, 2004).

2.4 Tipos de Condicionadores de Ar

Janela

São os produtos compactos de menor valor agregado e possuem o evaporador e condensador no mesmo gabinete. Equipamento com algumas restrições para instalação em determinados edifícios ou residências, como, por exemplo, alteração de fachada.

Split

Equipamento que possui evaporador e condensador separados, porém interligados através de tubulações de cobre que permitem uma distância de até 7 metros entre as unidades, gerando uma maior flexibilidade de instalação, proporcionando menor nível de ruído.

Self Chiller

Equipamento de grandes capacidades com necessidade de projetos e aplicações específicos para ambientes comerciais.

Outros Tipos (Variações de Split)

Existem no mercado outros tipos de modelos de split, que tem suas funcionalidades similares ao descrito acima. Os modelos comerciais conhecidos são: Multi-split, split piso teto, split *built-in* (embutido), split teto quadrado, split cassete, etc. São modelos splits com diferentes configurações.

2.5 Eficiência Energética

A Eficiência Energética é uma forma de medir o desempenho do condicionador de ar, relacionando a sua capacidade de refrigeração com o consumo de energia (Btu / Watts hora). Quando um aparelho consegue refrigerar a quantidade de calor da sua capacidade nominal a um baixo consumo, podemos dizer que ele é mais eficiente. Ou seja, quanto maior o valor da eficiência energética, menor o consumo do aparelho, para uma dada capacidade.

Para calcular a eficiência divide-se a capacidade de refrigeração (Btu/h) pela potência elétrica (Watts), assim obtém-se o valor de EER (*Energy Efficiency Ratio* – taxa de eficiência energética).

$$EER = \frac{Btu}{Wh} \quad (2.15)$$

Onde EER = 3,41 COP

Com o objetivo de orientar os consumidores sobre a eficiência energética dos produtos no ato da compra foi instituído por Decreto Presidencial em 8 de dezembro de 1993 o **SELO PROCEL DE ECONOMIA DE ENERGIA**⁷, ou simplesmente Selo PROCEL. É um produto desenvolvido e concedido pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL, coordenado pelo Ministério de Minas e

⁷ <http://www.eletronbras.com>

Energia – MME, com sua Secretaria-Executiva mantida pelas Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – Eletrobrás.



Figura 2.8 – Selo PROCEL de economia de energia para eletrodomésticos

Através de uma graduação criada para identificar os produtos com melhor eficiência energética, vide Fig. 2.9, o selo auxilia na decisão dos consumidores quando comparam os produtos no ponto de venda. O que recebe a maior classificação, o conceito A, é o produto que melhor desempenho possui. Também estimula a fabricação e a comercialização de produtos mais eficientes, contribuindo para o desenvolvimento tecnológico e a preservação do meio ambiente.

No processo de concessão do Selo PROCEL, a Eletrobrás conta com a parceria do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - Inmetro, executor do Programa Brasileiro de Etiquetagem - PBE, cujo principal produto é a **Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE**, mostrada na Fig. 2.9, sendo também a Eletrobrás, parceira do Inmetro no desenvolvimento do PBE. Normalmente, os produtos contemplados com o Selo PROCEL são caracterizados pela faixa “A” da ENCE.

Para ser contemplado com o Selo PROCEL, o produto deve ser submetido a ensaios específicos em laboratório idôneo, indicado pelo PROCEL. Os parâmetros a

serem avaliados para cada equipamento constam nos Critérios Específicos para Concessão do Selo PROCEL, existente no Regulamento. A adesão das empresas ao Selo PROCEL é voluntária, entretanto à Etiqueta Nacional de Conservação de Energia é mandatória desde 2006.

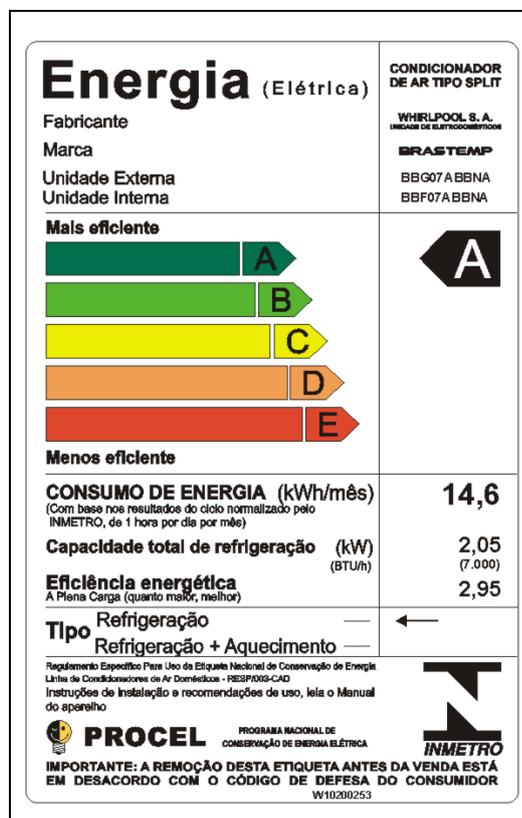


Figura 2.9 – Etiqueta de Consumo de Energia para splits

Na prática, atualmente, o valor de capacidade declarada possui uma tolerância de até 8% do valor medido pelos órgãos reguladores, contudo a empresa-alvo aceite uma variação de no máximo 5% para aprovar um projeto para a produção, que ocorre no *tollgate* do PRM, conforme detalhado no item 1.2.

2.6 Determinação Empírica de Parâmetros

O projetista de uma unidade frigorífica nova dotada de tubo capilar deve escolher o diâmetro e o comprimento do tubo de modo que haja um ponto de

equilíbrio correspondente à temperatura de evaporação desejada. O comprimento definitivo do tubo capilar é, não raro, obtido por tentativas. Assim, um tubo mais comprido que o de projeto é instalado no sistema, resultando uma temperatura de evaporação mais baixa que a desejada. A seguir o tubo é cortado sucessivamente até a obtenção da condição de equilíbrio desejada (STOECKER & JONES, 1985).

Com base nas equações apresentadas é possível projetar um sistema de refrigeração se disponível um diagrama *pressão x entalpia* com as curvas de volume específico e temperatura para o fluido refrigerante a ser utilizado. Atualmente se utilizam diversos *softwares* para auxiliar no projeto e no desenvolvimento de produtos de refrigeração, alguns deles orientam como deverá ser o circuito do refrigerante dentro dos trocadores de calor - evaporador e condensador - para uma determinada performance e aplicação de produto. Através destas ferramentas computacionais, pode-se determinar a área ideal dos trocadores de calor, assim como suas características como densidade de aletas (FPI – *fins per inch*), número de filas e tubos e o circuito do refrigerante no interior desses trocadores.

Além da dimensão do tubo capilar ideal utiliza-se a técnica empírica para também se obter a massa ou carga ideal de fluido refrigerante. Com base neste cenário, identificou-se uma chance de contribuição com a redução no tempo de ensaios pela aplicação do SE proposto durante a fase de desenvolvimento de produtos.

O tubo capilar é um tubo de 1 a 6 metros de comprimento e diâmetro interno variando de 0,5 a 2 mm. O refrigerante líquido que entra no tubo capilar perde pressão à medida que escoar por ele, em virtude do atrito e da aceleração do fluido, resultando na evaporação de parte do refrigerante. Diversas combinações de diâmetro interno e comprimento de tubo podem ser realizadas para se obter o efeito desejado (STOECKER & JONES, 1985).

É muito freqüente na indústria a necessidade de ações de redução de custo que muitas vezes implicam na substituição de um determinado componente do ciclo de refrigeração, como por exemplo, a substituição de um compressor por outro de menor custo. Neste caso, todo o sistema de refrigeração deve ser readequado pela inserção deste novo componente que altera as pressões de sucção e condensação e conseqüentemente modifica o resultado da capacidade de refrigeração e do consumo de energia.

A determinação empírica dos parâmetros acima descritos – características do tubo capilar e quantidade de gás refrigerante - é feita através de ensaios utilizando um protótipo de condicionador de ar. Utiliza-se um calorímetro psicrométrico, ambiente com temperatura e umidade controladas, onde é possível ajustar parâmetros do sistema de refrigeração e medir a capacidade do protótipo que está sendo testado, simulando diferentes situações de sua real utilização no ambiente doméstico.

O calorímetro dispõe de três salas, a Região Interna (*Indoor-room*), que simula a parte interna da residência do usuário; a Região Externa (*Outdoor-room*), que simula o ambiente externo à casa; e a Região de Contorno (*Perimeter-room*), onde consta o sistema de climatização para controle da temperatura na região externa da *Indoor-room*, conforme apresentado na Fig. 2.10. Entre as regiões interna e externa é instalado o condicionador de ar, protótipo ou produto a ser testado, seja um RAC (*Room Air Conditioning*) ou *Split*.

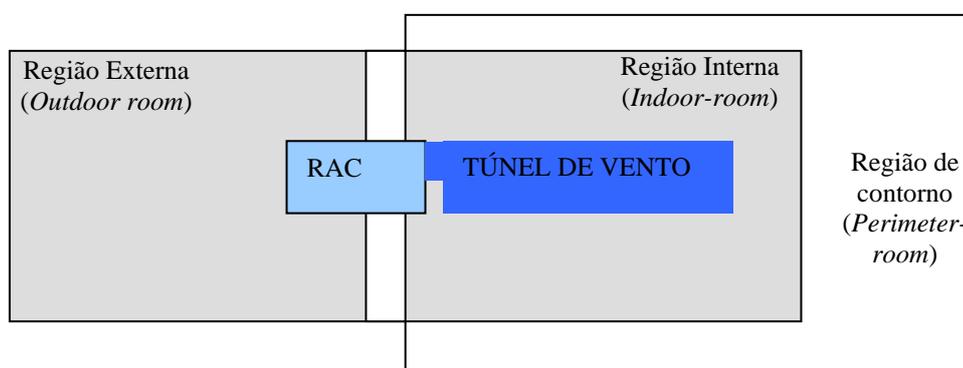


Figura 2.10 – Representação esquemática da vista lateral de um calorímetro com condicionador de ar instalado

O calorímetro é construído de acordo com os requisitos das normas da ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*. Os ensaios realizados no protótipo de condicionador de ar na fase de desenvolvimento seguem normas e regimentos internos da empresa-alvo.

Normalmente o produto ou protótipo de condicionador de ar é montado e antes de inserir a quantidade de refrigerante é preciso que todo e qualquer resíduo

de umidade que haja dentro do sistema de refrigeração seja retirado. Para isto é necessário manter o produto conectado a uma bomba de vácuo por cerca de uma hora e meia. Adiciona-se então uma pequena quantidade de refrigerante para que, durante o ensaio, esta quantidade possa ser incrementada gradualmente. Atualmente é possível acrescentar refrigerante ao produto sem a remoção do mesmo através de uma tubulação que o conecta à parede externa do calorímetro.

Antes de se iniciar as medições, o produto deve ter suas pressões e temperaturas estabilizadas, o que pode levar em média até 2 horas. Após a estabilização, inicia-se a medição e a aquisição de dados é feita por meio de *data loggers* controlados por um *software* desenvolvido em LabVIEW – acrônimo para *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*. Trata-se de uma linguagem de programação gráfica originária da *National Instruments*. A primeira versão surgiu em 1986 para o Macintosh e atualmente existem também ambientes de desenvolvimento integrados para os Sistemas Operativos Windows, Linux e Solaris - um Sistema Operacional UNIX desenvolvido pela Sun Microsystems (MOHIUDDIN *et al*, 2006).

Os principais campos de aplicação do LabVIEW são a realização de medições e a automação. A programação é feita de acordo com o modelo de fluxo de dados, o que oferece a esta linguagem vantagens para a aquisição de dados e para a sua manipulação (MOHIUDDIN *et al*, 2006).

Os programas em LabVIEW são chamados de instrumentos virtuais ou, simplesmente, IVs. São compostos pelo painel frontal, que contém a interface e pelo diagrama de blocos, que contém o código gráfico do programa. O programa não é processado por um interpretador, mas sim compilado. Deste modo a sua performance é comparável à exibida pelas linguagens de programação de alto nível⁸. A linguagem gráfica do LabVIEW é chamada "G" (MOHIUDDIN *et al*, 2006).

O software para aquisição de dados dos calorímetros foi desenvolvido por uma empresa especializada e atualmente possui uma interface como a da Fig. 2.11, onde pode ser observado que há o monitoramento dos parâmetros da Região Interna (Indoor) e da Região Externa (Outdoor). Este gera um arquivo de dados

⁸ Linguagem de programação de alto nível é o termo utilizado em Ciência da Computação para designar linguagens que possuem um nível de abstração elevado, longe do código da máquina e mais próximo à linguagem humana.

(extensão *dat*) com os valores medidos e uma rotina converte esta informação para um arquivo em *Excel*. Com as planilhas em mãos, o técnico analisa os resultados e muitas vezes juntamente com o Engenheiro de Refrigeração é tomada a decisão, que pode ser em aumentar ou reduzir a quantidade de refrigerante ou substituir o tubo capilar para obter uma maior ou menor vazão de refrigerante.

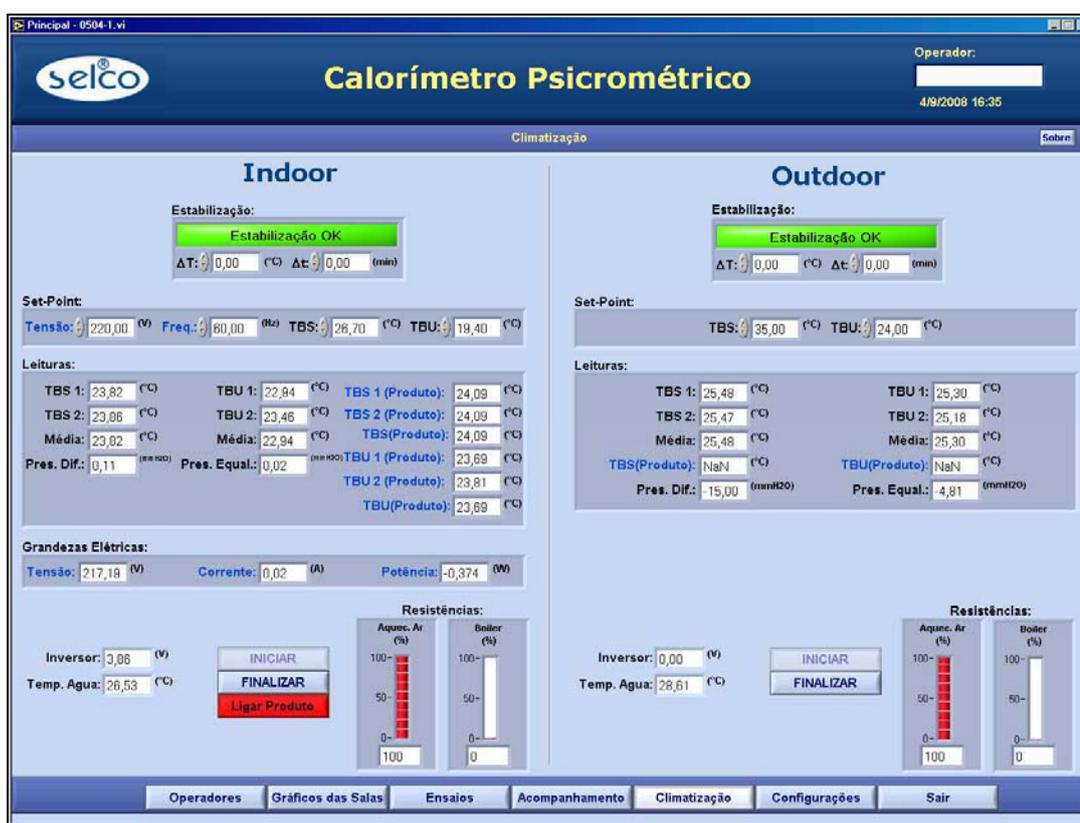


Figura 2.11 – Interface atual do software para aquisição de dados do calorímetro

Dependendo dos resultados obtidos, se os valores alvo não conseguem ser atingidos por meio das alterações em tubo capilar e quantidade de refrigerante, faz-se necessário realizar outras modificações no sistema, sendo elas, alteração da rotação do ventilador para aumentar ou reduzir a vazão de ar, alteração no circuito do refrigerante dentro dos trocadores de calor, alteração no número de aletas (FPI) e até mesmo alteração no número de filas e tubos, aumentando ou reduzindo a área dos mesmos. Nestas situações, novos protótipos devem ser requisitados, o que impacta negativamente nos prazos de desenvolvimento de produtos.

Caso as alterações necessárias se restrinjam às modificações de tubo capilar e massa de refrigerante, obtém-se uma curva semelhante à demonstrada na Fig. 2.12, que mostra que, por exemplo, para atingir uma capacidade de 7.600 Btu/h, foi necessário substituir o tubo capilar e uma nova quantidade de gás refrigerante adicionada.

Para realizar as alterações de tubo capilar e, eventualmente, a substituição do trocador de calor deve-se retirar o produto do calorímetro, recolher o gás, soldar um novo tubo capilar ou novo trocador de calor, realizar o vácuo no circuito e novamente adicionar uma determinada quantidade de refrigerante. Mais uma vez, deve-se aguardar a estabilização das pressões e temperaturas antes de iniciar a aquisição dos dados.

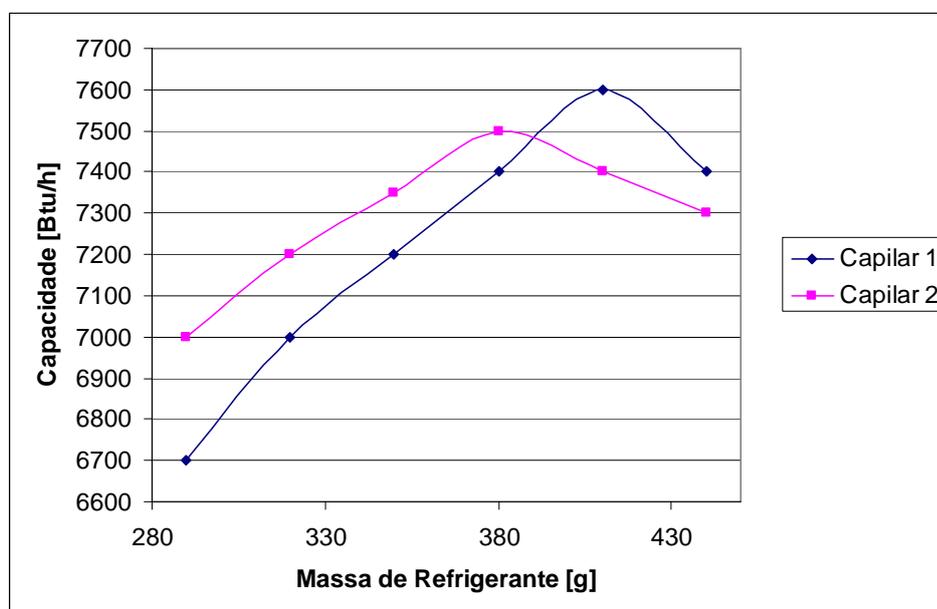


Figura 2.12 – Curva de ensaio para determinar o ponto ótimo de quantidade de gás refrigerante e dimensão de capilar

Pelo descrito acima se pode concluir que estes ensaios são longos, levando cerca de semanas, e necessita certo conhecimento do técnico responsável pelos testes para minimizar os erros e conseguir atingir os valores alvo em um menor espaço de tempo. Com base nisso, vislumbrou-se uma oportunidade de contribuir com a empresa-alvo, gerando um mecanismo que auxilie na execução destes ensaios, reduzindo o tempo de desenvolvimento de produtos mesmo para técnicos

pouco experientes e mantendo o conhecimento formatado em uma Base de Conhecimento.

O Sistema Especialista protótipo recebe o arquivo de saída do LabVIEW e manipula estes dados, comparando-os com os valores de projeto, estabelecidos pelo Engenheiro de Refrigeração, através de rotinas. Este SE visa acelerar este processo de ensaio, gerando informações claras e concisas e sugerindo quais devem ser as próximas ações para encontrar os valores alvo para os parâmetros de carga de refrigerante e dimensão do tubo capilar.

De forma a possibilitar um melhor entendimento dos termos e dos conceitos físicos envolvidos no processo de refrigeração, optou-se por incluir este capítulo. Um melhor entendimento sobre Sistemas Especialistas e suas principais características e aplicações serão descritos no capítulo seguinte.

CAPÍTULO 3

ALGUNS FUNDAMENTOS DE SISTEMAS ESPECIALISTAS E AQUISIÇÃO DE CONHECIMENTO

3.1 Definição de Sistemas Especialistas

Existem muitas áreas dentro da Inteligência Artificial (IA), dentre elas: Sistemas Especialistas, Representação da Incerteza, Inteligência Artificial Distribuída, Conexionismo e Computação Evolutiva. O ramo de Sistemas Especialistas é uma solução muito bem sucedida para o clássico problema de programar inteligência aplicada a domínios restritos (BITTENCOURT, 2006).

O Professor Edward Feigenbaum da Universidade de Stanford, citado por GIARRANTANO & RILEY (2005), definiu um Sistema Especialista como “um programa computacional inteligente que utiliza conhecimento e procedimentos de inferência para resolver problemas com grau de dificuldade suficiente para requerer significativa especialidade humana em sua solução”. Isto é, um Sistema Especialista é um sistema computacional que possui a capacidade de emular a tomada de decisão de um especialista humano.

Para LIEBOWITZ (1988), “SEs são programas de computador que emulam o comportamento de especialistas humanos dentro de um específico domínio de conhecimento”. Ao implementar SE, tenta-se imitar o processo humano de raciocínio (KANDEL, 1992).

Existem duas linhas principais de pesquisa para a construção de sistemas inteligentes: a linha *conexionista* e a linha *simbólica*. A linha *conexionista* visa à modelagem da inteligência humana através da simulação dos componentes do

cérebro, isto é, de seus neurônios e das suas interligações. Esta proposta foi formalizada inicialmente em 1943, quando o neuropsicólogo McCulloch e o lógico Pitts propuseram um primeiro modelo matemático para um neurônio. Um primeiro modelo de *rede neuronal*, isto é, um conjunto de neurônios interligados foi proposto por Rosenblatt em 1957, chamado *Perceptron*. Durante um longo período essa linha de pesquisa não foi muito ativa, mas o advento dos microprocessadores - pequenos e baratos - tornou praticável a implementação de máquinas de conexão compostas de milhares de microprocessadores. O modelo conexionista deu origem à área de redes neuronais artificiais (BITTENCOURT, 2006).

A linha simbólica segue a tradição lógica e teve em McCarthy e Newell seus principais defensores. Os princípios dessa linha de pesquisa são apresentados em um artigo de Newell "*Physical symbol systems*" publicado em 1980. O sucesso dos Sistemas Especialistas a partir da década de 70 estabeleceu a manipulação simbólica de um grande número de fatos especializados sobre um domínio restrito como paradigma corrente para a construção de sistemas inteligentes do tipo simbólico. Inicialmente, a pesquisa em manipulação de símbolos se concentrou no desenvolvimento de formalismos gerais capazes de resolver qualquer tipo de problemas. Estes esforços iniciais ajudaram a estabelecer os fundamentos teóricos dos sistemas de símbolos e forneceram à área da IA uma série de técnicas de programação voltadas à manipulação simbólica, por exemplo, as técnicas de busca heurística. Os sistemas gerais desenvolvidos nesta época obtiveram resultados interessantes, mas apenas em domínios simplificados, onde o objetivo era principalmente a demonstração da técnica utilizada, e não a solução de um problema real. O problema com sistemas gerais é que a sua extensão a domínios de problemas reais se mostrou inviável (BITTENCOURT, 2006).

Sistemas Especialistas funcionam muito bem para campos de atuação restritos. Essa eficiência é comprovada pelas diversas aplicações destes sistemas na solução de problemas específicos nas áreas de economia, medicina, ciência e engenharia, assim como pelas publicações existentes a respeito do assunto. O conhecimento do sistema especialista dentro do domínio do problema é equivalente ao do especialista humano, mas o sistema geralmente não irá possuir conhecimento fora deste domínio (GIARRANTANO & RILEY, 2005).

Embora a utilização da heurística do especialista humano apresente um motivo importante para o desenvolvimento de SE, existem outras características que

tornam a utilização desta técnica uma boa opção na solução de problemas (IGNIZIO, 1991; LIEBOWITZ, 1988):

- Podem ser utilizados para apoiar e verificar a opinião de um especialista humano;
- Auxiliam em situações onde o especialista não está disponível;
- Formalizam o conhecimento do especialista, e promovem a disseminação deste conhecimento;
- Podem integrar o conhecimento proveniente de várias fontes, conferindo mais segurança para a tomada de decisão;
- Fornecem explicações de como a solução apresentada foi encontrada, o que se torna difícil em alguns casos para o especialista humano.

Os SEs geralmente tentam gerar a “melhor” solução, por meio de heurísticas que exploram as alternativas, enquanto os algoritmos de programas convencionais predeterminam um único caminho de solução (FURNIVAL, 1995).

Apesar destas vantagens, existem algumas limitações no uso desta técnica:

- A etapa de aquisição de conhecimento é uma tarefa difícil, que em alguns casos impossibilita o desenvolvimento do sistema;
- Os SEs não modelam facilmente criatividade, o que é amplamente usado por especialistas humanos quando deparados com situações inusitadas;
- Os SEs não aprendem com a experiência (ainda não existe um mecanismo amplamente utilizado para este fim, embora existam pesquisas nesta direção).

Sistemas Especialistas possuem um número de vantagens distintas, assim como desvantagens, quando comparados a outros métodos de solução como humanos ou algoritmos convencionais. Na tabela a seguir apresentam-se algumas vantagens e desvantagens listadas por GONZALEZ & DANKEL (1993).

Tabela 3.1 – Vantagens e desvantagens de Sistemas Especialistas
(GONZALEZ & DANKEL, 1993)

Vantagens	Desvantagens
Tornar acessível o conhecimento escasso	As respostas podem ser incorretas
Fácil modificação	Conhecimento limitado
Consistência das respostas	Dificuldade de representação de senso comum
Acessibilidade perpétua	
Preservação da especialidade	
Explicação da solução	
Solução de problemas envolvendo dados incompletos	

Sistemas Especialistas se aplicam virtualmente a diversos campos de domínio. Alguns foram desenvolvidos como ferramenta de pesquisa enquanto outros executam importantes funções na indústria e nos negócios (GIARRANTANO & RILEY, 2005).

Em resumo, Sistemas Especialistas fornecem uma aproximação muito boa para a solução de uma larga classe de problemas, mas cada aplicação deve ser escolhida cuidadosamente para que o uso desta tecnologia seja viável.

A seguir são apresentados os princípios de funcionamento de SE, onde são explorados conceitos importantes para o entendimento de como um Sistema Especialista chega às suas conclusões.

3.2 Estrutura de um Sistema Especialista

No final dos anos 50 e início dos anos 60, uma série de programas foram escritos com o objetivo de solucionar problemas. O mais famoso destes foi o “*General Problem Solver*” (Solucionador de Problemas Comuns) criado por Newell e Simon. Um dos resultados mais significativos demonstrado por eles foi que muito da

compreensão humana ou cognição pode ser expressa através de **regras de produção** do tipo “SE *premissa* ENTÃO *conseqüência*”. Essas regras representam o conhecimento adquirido através do tempo (experiência), e são armazenadas na memória de longo prazo. Além dessa memória, os seres humanos utilizam ainda uma memória de curto prazo, que armazena o conhecimento relacionado ao problema que está sendo resolvido no momento (GIARRATANO & RILEY, 2005).

O processo de disparo das regras é feito através do processador cognitivo, que faz a correspondência entre as regras armazenadas na memória e os fatos apresentados pelo problema. Sistemas Especialistas utilizam esse modelo de resolução de problemas utilizado pelos humanos como base para seu funcionamento (GIARRATANO & RILEY, 2005).

A estrutura básica de um SE pode também ser representada como na Fig. 3.1. A **base de conhecimento** representa a memória de longo prazo, a **memória de trabalho** representa a memória de curto prazo, e o **motor de inferência** representa o processador cognitivo.

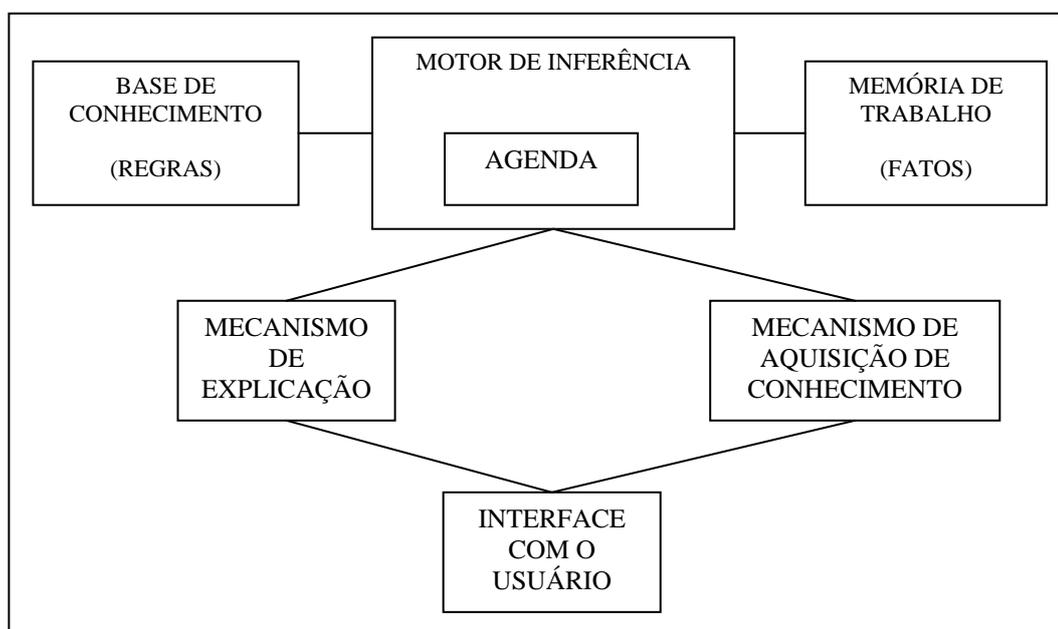


Figura 3.1 – Representação da estrutura de um Sistema Especialista, (GIARRATANO & RILEY, 2005)

A **base de conhecimento** é o componente mais importante do sistema. Ela contém o conhecimento relevante para a resolução do problema específico, proveniente de diversas fontes e codificado no sistema de maneira inteligível. Normalmente esse conhecimento é codificado na forma de regras.

O segundo componente mais importante do Sistema Especialista é a **máquina de inferência**. A máquina de inferência funciona como intérprete do conhecimento armazenado na base de conhecimento, como um processador cognitivo. Sua estrutura depende da natureza do problema e da representação utilizada na construção da base de conhecimento. Há mais de uma maneira de se representar o conhecimento, entretanto nesse estudo as definições e exemplos se restringem a representação através de regras de produção e orientação a objetos.

A máquina de inferência trabalha com o intermediário entre os fatos fornecidos na memória operacional e as regras e atributos contidos na base do conhecimento. À medida que esses fatos satisfazem as condições especificadas nas regras ou em qualquer outra maneira que o conhecimento tenha sido representado, a máquina de inferência apresenta as soluções e recomendações correspondentes, adicionando-os à memória operacional, o que provocará a necessidade da busca por novas regras e atributos e conseqüentemente, apresentação de novas soluções. Isto é um grande diferencial comparado aos sistemas convencionais onde a ordem de execução do programa já está pré-definida. Nos sistemas especialistas, a máquina de inferência busca e aplica a regra mais apropriada em cada situação, dando um sentido lógico às informações durante a sessão (GROSSMANN Jr., 2002). Dentro da máquina de inferência, os fatos são constantemente confrontados com a base de conhecimento em busca de informações adicionais ou soluções para o problema.

O **mecanismo de explicação** apresenta ao usuário o raciocínio utilizado pelo sistema para chegar à conclusão apresentada. O **mecanismo de aquisição de conhecimento** é uma ferramenta opcional, com o qual o usuário dispõe de uma forma automática de inserção de novos conhecimentos na base sem a necessidade de intervenção do engenheiro de conhecimento.

A **agenda** é uma lista de todas as regras que tiveram suas condicionais satisfeitas embora ainda não tenham sido executadas. Cada módulo possui sua

própria agenda. A agenda age similar a uma pilha⁹: a regra mais ao topo da agenda é a primeira a ser executada. Quando uma regra é recém ativada, sua posição na agenda é baseada nos seguintes fatores na ordem em que são apresentados (GIARRATANO, 2002):

- Regras recém ativadas são posicionadas acima de todas as demais com menor saliência¹⁰ e abaixo de todas as regras com maior saliência;
- Entre as regras com igual saliência, a atual estratégia de resolução de conflitos é usada para determinar a sua posição perante as demais;
- Se a regra é ativada (juntamente com várias outras regras) pela mesma declaração (*assertion*) ou retração (*retraction*) de um fato e os dois passos anteriores não especificam a sua ordem, então a regra é arbitrariamente ordenada em relação às demais regras com as quais foi ativada.

O *Shell CLIPS*¹¹, programa utilizado no desenvolvimento do protótipo deste estudo, apresenta sete opções de estratégias para resolução de conflitos, sendo elas: Amplitude, Profundidade, LEX (*Lexigraphical* - é uma cadeia de várias estratégias), MEA (*Means Ends Analysis* - basicamente uma versão estendida e melhorada da LEX), Complexidade, Simplicidade e Aleatoriedade (GIARRATANO, 2002).

Dentre estas estratégias apresentadas serão descritas apenas as mais comuns: busca em profundidade, busca em amplitude ou a combinação de ambas. Segundo BORGES (2002), na busca em profundidade segue-se um caminho até atingir o nível de profundidade que propicie a chegada à solução do problema, enquanto que busca em amplitude verificam-se simultaneamente todas as possibilidades de encadeamentos possíveis em um mesmo nível, até atingir a solução.

⁹ Conceito de **pilha**, *stack* em inglês, para computação significa que o item mais ao topo, ou último que entrou, é o primeiro que deverá ser tratado. Também conhecido como LIFO (*Last In First Out*).

¹⁰ Quando existem múltiplas ativações na agenda, o CLIPS seleciona automaticamente qual ativação é apropriada para disparar. Cada regra tem um valor associado - chamado de *saliência* - que é usado para escolher a ativação que será executada.

¹¹ Detalhes sobre CLIPS encontram-se no item 4.3 deste material.

O emprego de uma ou de outra estratégia é fundamentado no conhecimento do especialista humano, pois reflete quais as ações ou o caminho que este iria percorrer numa mesma situação. As figuras 3.2 e 3.3 a seguir, adaptadas de PASSOS (2005), representam claramente o procedimento seguido pelas buscas em Profundidade e por Amplitude. A estratégia padrão do CLIPS é a de **Profundidade** e esta é a que foi selecionada para ser utilizada no presente trabalho.

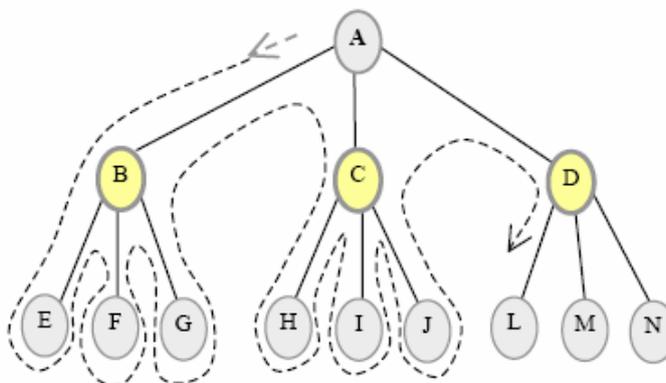


Figura 3.2 – Busca em Profundidade
Adaptado de PASSOS (2005)

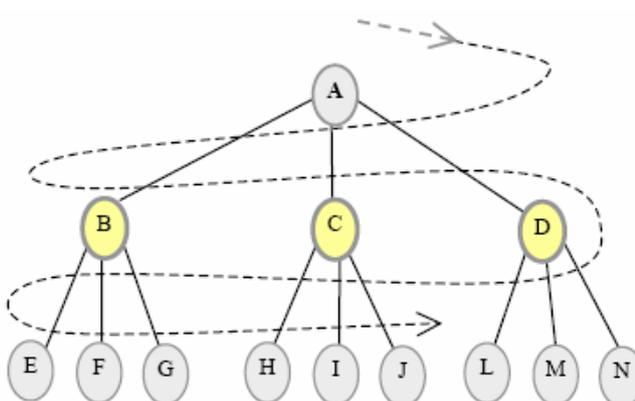


Figura 3.3 – Busca em Amplitude
Adaptado de PASSOS (2005)

A **interface com o usuário** é o mecanismo responsável pela comunicação entre o usuário e o sistema. Segundo GONZALEZ & DANKELE (1993), a interface com o usuário serve para fornecer ao mesmo um meio amigável de comunicação com o programa inteligente. Faz-se isto através do uso de menus, linguagem natural e visualização gráfica. Essa interface pode ser utilizada para os seguintes fins:

- Possibilitar ao sistema fazer perguntas ao usuário sobre o problema que está sendo considerado;
- Fornecer explicações sobre o motivo pelo qual o sistema está fazendo determinadas perguntas;
- Possibilitar ao usuário questionar o sistema a respeito das conclusões fornecidas;
- Visualizar os resultados obtidos;
- Permitir ao usuário gravar ou imprimir resultados.

Em um sistema baseado em conhecimento, o controle de disparo das regras, isto é a inferência, é feito pelo motor de inferência. Existem basicamente dois métodos de inferência, o **encadeamento para frente** (*forward-chaining*) e o **encadeamento para trás** (*backward-chaining*).

Um encadeamento é um grupo de múltiplas inferências que conectam um problema à sua solução (GIARRATANO & RILEY, 2005). No encadeamento para frente, a inferência é feita a partir dos fatos, gerando as respectivas conclusões de acordo com as regras. O sistema espera a entrada de fatos, e então procura todas as regras cujas premissas são satisfeitas pelos fatos, colocando-as na agenda. Isto se denomina **ativação de uma regra**. Já no encadeamento para trás, parte-se de uma hipótese (uma conclusão a ser provada) e buscam-se os fatos que geram essa conclusão. Enquanto no encadeamento para frente o sistema espera a entrada de novos fatos para colocar uma regra na agenda, no encadeamento para trás o sistema “procura” os fatos que podem provar uma regra.

O tipo de encadeamento normalmente é definido de acordo com a natureza do problema a ser resolvido. Problemas de *planejamento*, *projeto* e *classificação* tipicamente utilizam encadeamento para frente, enquanto os problemas de *diagnóstico*, onde existem apenas algumas saídas possíveis, mas um grande número de estados iniciais, utilizam encadeamento para trás (BITTENCOURT, 2006).

Para o desenvolvimento do sistema apresentado neste trabalho, foi utilizado o **encadeamento para frente**, por ser esse método o mais apropriado para o tipo de problema abordado – desenvolvimento e projeto de produtos.

A máquina de inferência opera através de **ciclos de execução**. Esta execução é realizada até que alguma operação cause o fim da execução. Um exemplo de um ciclo de execução é apresentado a seguir em pseudocódigo (GIARRATANO & RILEY, 2005).

Início de um Ciclo

Resolver conflitos: se existem regras ativadas (regras em que os fatos da premissa estão presentes), então escolhe a regra de maior prioridade para executar.

Executar: executa a conclusão da regra escolhida (esta execução pode ter efeito dentro do ciclo atual). Remove essa ativação da agenda.

Ativar (Match): atualiza a agenda, checando se os fatos presentes na memória de trabalho estão presentes nas premissas de alguma(s) regra(s), ativando-as em caso verdadeiro. Se para alguma ativação já presente na agenda a premissa não é mais satisfeita, retira-se esta ativação da agenda.

Checar se termina: se alguma ação de fim de programa é realizada, termina a execução.

Fim de um Ciclo

Enquanto uma boa estratégia de inferência é de grande importância para o resultado obtido pelo sistema, esse resultado depende também em grande parte da qualidade da base de conhecimento. Para que isso seja alcançado, um bom trabalho de engenharia de conhecimento deve ser realizado. A seguir, a tarefa de engenharia de conhecimento será apresentada, através de definições, objetivos e técnicas utilizadas para sua realização.

3.3 Métodos de Representação do Conhecimento

A parte mais importante no projeto de um SE é a escolha do método de representação de conhecimento. A linguagem associada ao método escolhido deve ser suficientemente expressiva, para permitir a representação do conhecimento a respeito do domínio escolhido de maneira completa e eficiente. Em tese, uma representação geral como a lógica seria suficientemente expressiva para representar qualquer tipo de conhecimento. No entanto, problemas de eficiência, facilidade de uso e a necessidade de expressar conhecimento incerto e incompleto levaram ao desenvolvimento de diversos tipos de formalismos de representação do conhecimento. A seguir, apresentam-se alguns dos formalismos de representação do conhecimento utilizados no desenvolvimento deste trabalho (BITTENCOURT, 2006).

- **Regras de produção**

A técnica de representação do conhecimento por regras de produção é a mais utilizada no desenvolvimento de Sistemas Especialistas e é utilizada desde os primeiros sistemas baseados em conhecimento desenvolvidos. Entre os motivos para esta popularidade, pode-se destacar (IGNIZIO, 1991):

- Regras representam um modo intuitivo de representação de conhecimento, portanto, o tempo necessário para se aprender a desenvolver bases de regras é mínimo.
- Regras são mais transparentes do que outras técnicas de representação de conhecimento, como por exemplo, quadros (*frames*)
- Bases de regras podem ser facilmente modificadas.
- A validação do conteúdo de uma base de regras é um processo relativamente simples comparado com outras técnicas.

As regras de produção são afirmações do tipo: **Se <premissa> então <conseqüência>**, onde a premissa é a parte da regra onde é feito um teste para verificar sua veracidade. Se confirmada sua veracidade, o conseqüente da regra é então executado, gerando uma conclusão da regra.

A premissa da regra é formada por fatos que estão presentes na Base de Conhecimento, enquanto a consequência pode simplesmente executar uma ação, apresentar uma mensagem, como inserir um novo fato na lista de fatos. Por exemplo, seja uma regra como descrita a seguir:

Para o seguinte fato existente:

Valores de Projeto		Possíveis Valores Medidos	
Delta de Temperatura de superaquecimento	10 °C	Delta de Temperatura de superaquecimento medido	> ou < ou =

As regras de produção serão:

SE “o delta de temperatura de superaquecimento medido for IGUAL a de projeto”

ENTÃO “verificar a vazão do capilar através da leitura da temperatura de evaporação e condensação”

SE “o delta de temperatura de superaquecimento medido for MAIOR que a de projeto”

ENTÃO “aumentar a carga de refrigerante atual em 20g e executar um novo ensaio”

SE “o delta de temperatura de superaquecimento medido for MENOR que de projeto”

ENTÃO “reduzir a carga de refrigerante atual em 20g e executar um novo ensaio”

Por exemplo, se o delta da temperatura de superaquecimento medido for menor que a de projeto, somente a terceira regra será executada, embora as três estejam presentes na Base de Conhecimento.

O formato destas regras de produção é obtido na fase de Aquisição de Conhecimento, como será detalhado mais a frente neste Capítulo.

- **Modelagem orientada a objetos**

Ao resolver um problema interage-se com várias entidades (reais ou abstratas) e existem atributos e valores a elas associadas. Essa representação,

altamente intuitiva, é reproduzida no computador através da utilização de modelagem orientada a objetos.

Segundo IGNIZIO (1991), a utilização de objetos representa uma forma robusta de representação de conhecimento. Além de armazenar valores para cada atributo, os *slots* (campos) podem conter valores padrão, atributos/valores para conectar a outros objetos, conjuntos de regras ou procedimentos que podem ser executados.

Os objetos são definidos por suas classes. Na classe estão descritos os atributos que os objetos dessa classe possuem e o seu comportamento, através dos métodos (funções que implementam as ações que o objeto pode realizar). Dessa maneira, um objeto é definido como uma instância da classe que o representa. Uma classe possui a seguinte estrutura básica.

Classe: tipo de entidade representada

Atributos 1... n: características da entidade, de um determinado tipo (texto, número, etc.)

Métodos 1... m: procedimentos que podem ser executados por essa entidade – descrevem o seu comportamento em relação aos outros objetos.

Exemplificando no domínio do SE proposto, temos uma classe estruturada da seguinte maneira:

Classe: Sistema de Refrigeração Projetado (SRPROJ)

Atributos

Tipo de produto: Condicionador de Ar doméstico (RAC)

Ciclo: frio

Capacidade de projeto: 10.000 Btu/h

Grau de superaquecimento de projeto: 10°C

Temperatura de evaporação de projeto: 9°C

Temperatura de condensação de projeto: 45°C

Vazão de ar: 230 m³/h

Diâmetro inicial do tubo capilar: 1 mm

Comprimento inicial do capilar: 1000 mm

Massa inicial de R22 de projeto: 500 (g)

Método 1: dimensionar a massa de refrigerante ideal para cada sistema de refrigeração

Método 2: determinar diâmetro e comprimento do capilar ideais para cada sistema de refrigeração

A idéia principal em utilizar programação orientada a objetos é desenvolver um programa considerando que os dados utilizados nele são considerados como objetos e, desta forma, implementar operações com esses objetos (GIARRATANO & RILEY, 2005), uma vez que um objeto é definido como uma instância da classe que o representa.

- **Redes Semânticas**

Rede semântica é uma forma de representação do conhecimento definida como um grafo direcionado no qual os vértices (nodos) representam conceitos, e as arestas representam as relações semânticas entre os conceitos. Os nodos podem também ser utilizados para representar predicados, classes, palavras de uma linguagem, entre outras possíveis interpretações, dependendo do sistema de redes semânticas em questão (BITTENCOURT, 2006).

Esse modelo de representação do conhecimento por nodos e arcos foi proposto por M. Ross Quilian em um artigo publicado em 1968. No referido artigo, Quilian propõe um modelo computacional da memória humana chamada *memória semântica*. Esse modelo, onde conceitos são representados por nodos, e relações entre conceitos, por setas ou arcos, explica diversos resultados experimentais sobre o comportamento da memória humana, como, por exemplo, o fato do reconhecimento de objetos que pertencem a classes mais numerosas tomarem mais tempo do que o reconhecimento dos pertencentes a classes menos numerosas (BITTENCOURT, 2006).

Um exemplo de uma rede semântica é apresentado na Figura 3.4, onde são mostradas as relações e os vértices, conforme a teoria acima exposta.

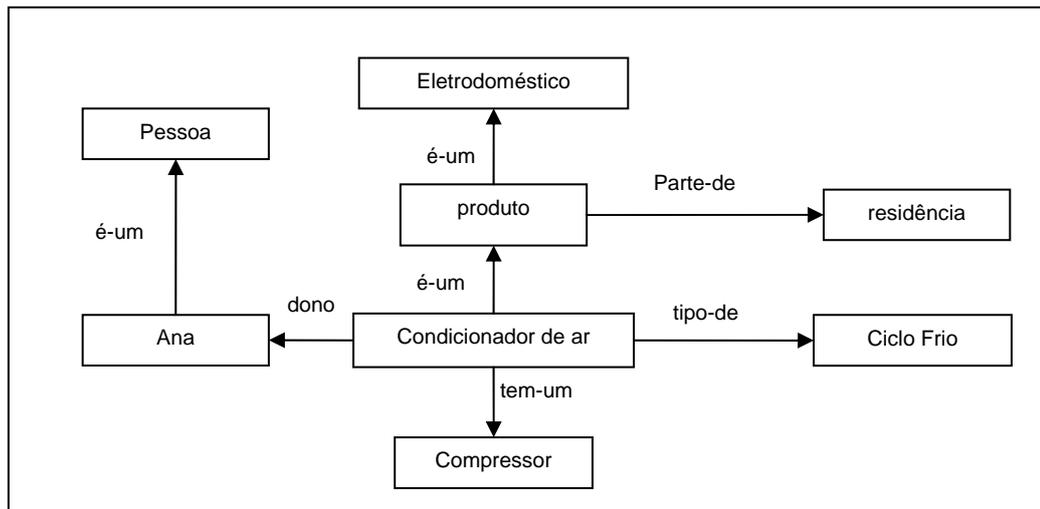


Figura 3.4 – Exemplo de rede semântica adaptado ao domínio de aplicação (BITTENCOURT, 2006)

Os arcos e as heranças determinam um eficiente meio de representação do conhecimento uma vez que diversas relações complexas podem ser demonstradas por apenas poucos nodos e arcos (GIARRATANO & RILEY, 2005).

3.4 Desenvolvimento Incremental

As dificuldades apresentadas podem levar o engenheiro de conhecimento a descobrir, no meio do processo de desenvolvimento, que a estrutura de representação de conhecimento utilizada é inadequada. Para superar esses obstáculos e fornecer à equipe de desenvolvimento uma boa noção da profundidade do conhecimento requerido, utiliza-se no desenvolvimento de sistemas especialistas uma técnica conhecida como desenvolvimento incremental.

GONZALEZ & DANKEL (1993) definem desenvolvimento incremental como o processo iterativo de aquisição, representação e confirmação de conhecimento em uma parte limitada do domínio do problema com o objetivo de construir incrementalmente a base de conhecimento do Sistema Especialista.

Um processo de desenvolvimento segundo esse modelo divide o desenvolvimento de software em iterações. Em cada iteração, são realizadas as atividades de análise, projeto, implementação e testes para uma parte do sistema. Essa característica contrasta com o modelo em cascata, no qual as fases de análise, projeto, implementação e testes são realizados uma única vez para o sistema como um todo.

No desenvolvimento incremental o SE evolui em versões, através da construção em partes e iterativa de novas funcionalidades até que o sistema completo esteja construído. O modelo incremental e iterativo pode ser visto como a aplicação do modelo em cascata várias vezes: o software é desenvolvido em incrementos, e cada incremento é desenvolvido segundo uma "mini-cascata", como demonstra a Fig. 3.5. O modelo em cascata também pode ser visto como o modelo incremental e iterativo no qual há somente uma iteração (BEZERRA, 2002).

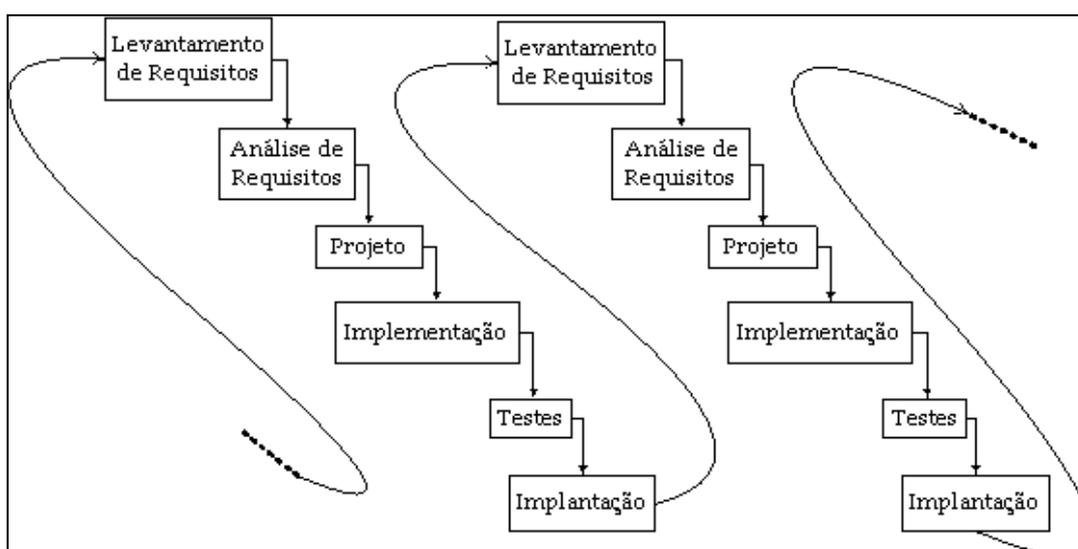


Figura 3.5 – Representação de um modelo incremental e iterativo (BEZERRA, 2002)

No domínio de conhecimento de aplicação do SE proposto essa técnica foi aplicada ao longo do desenvolvimento e ao término de cada etapa realizava-se a Verificação e Validação junto ao Especialista. Essa metodologia foi crucial para o correto entendimento das informações transmitidas pelo Especialista assim como para verificar a consistência das informações que o SE gera para o usuário, representada na Fig. 3.6.

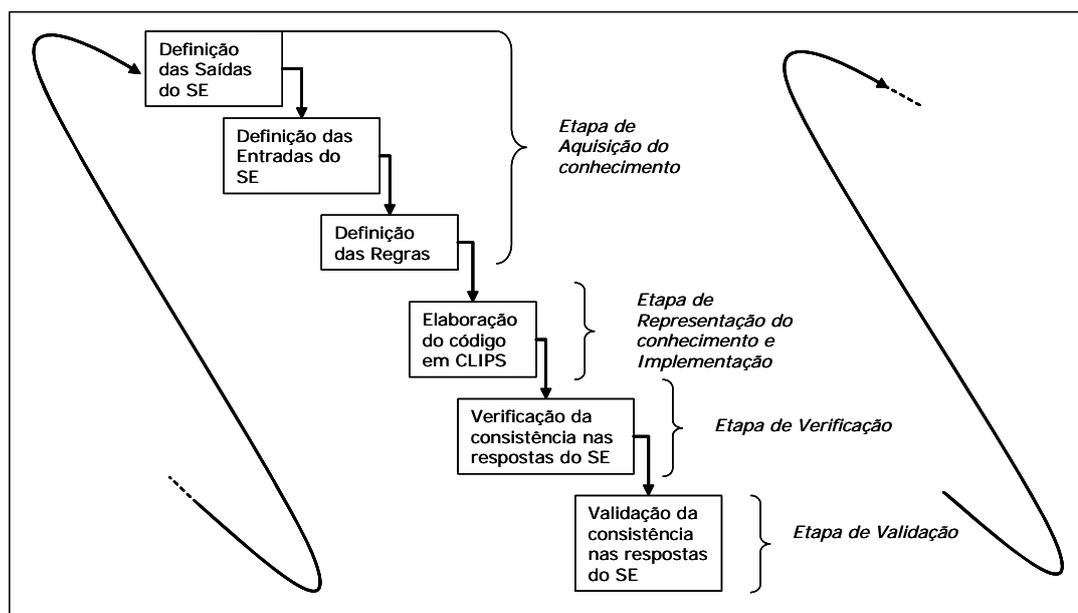


Figura 3.6 – Representação do modelo incremental e iterativo aplicado ao SE proposto

Apesar da etapa de Aquisição do Conhecimento ter sido realizada com mais ênfase no início do desenvolvimento, o modelo utilizado demonstra que em diversas situações foi necessário revisitar as informações até então existentes e readequá-las para um melhor emprego dentro do SE, demonstrando que o este modelo é válido e funcional durante o desenvolvimento de Sistemas Especialistas.

3.5 Implementação de Sistemas Especialistas

Um SE pode ser implementado de duas maneiras: utilizando-se uma linguagem de programação (C, Pascal, LISP, PROLOG) ou utilizando-se um ambiente *Shell* – ferramenta desenvolvida especialmente para implementação de SE.

Utilizando-se uma linguagem de programação, possui-se total controle sobre a implementação, devido à flexibilidade de uso desse tipo de ferramenta. A

desvantagem é que neste caso se torna necessário implementar todas as partes do sistema.

Por outro lado, ao se utilizar um ambiente *Shell* tem-se acesso à máquina de inferência e os modelos de representação de conhecimento já prontos, deixando para o Engenheiro do Conhecimento apenas o preenchimento da base de conhecimento e uma eventual interface. Isso torna a implementação mais rápida, mais barata e mais simplificada, podendo ser realizada por pessoas com pouca experiência em programação. A desvantagem é a falta de controle sobre alguns pontos, principalmente na máquina de inferência, que pode resultar da falta de flexibilidade desse tipo de ferramenta.

Os sistemas especialistas geralmente realizam tarefas importantes, que em alguns casos podem representar algum risco, como por exemplo, o diagnóstico médico ou a operação de alguma máquina que necessite de segurança. Por esse motivo, é importante que esses sistemas tenham sua qualidade assegurada, o que envolve, entre outras coisas, a confiabilidade no seu funcionamento.

Para que um Sistema Especialista tenha a sua qualidade assegurada, é importante que durante o seu desenvolvimento ocupe-se parte do tempo e dos recursos com a sua Verificação e Validação. Com isto, pode-se oferecer um sistema que atenda a algumas especificações de funcionalidade, confiabilidade, usabilidade, eficiência, manutenibilidade e portabilidade (ZIMMERMANN, 2003).

Segundo ZIMMERMANN (2003), alguns erros que podem ocorrer durante o desenvolvimento de um SE são de diferentes naturezas:

1. *Erros de semântica*: o significado de uma regra implementada (ou de qualquer outra estrutura) não reflete de forma fiel o que ela deveria representar segundo o especialista. Ocorre quando o engenheiro de conhecimento interpreta erroneamente uma explicação do especialista, quando o especialista interpreta erroneamente uma pergunta do engenheiro de conhecimento ou ambos.

2. *Erros de sintaxe*: erros de escrita na linguagem utilizada. Esses erros são geralmente apontados pelo ambiente de programação escolhido e não permitem que o sistema funcione, sendo corrigidos antes que o sistema possa funcionar.

3. *Erros do ambiente computacional*: erros de interface, de configuração do ambiente de programação, compatibilidade, sistema operacional, etc.

4. *Erros de especificação*: o sistema não atende as especificações técnicas e funcionais que foram propostas antes do seu desenvolvimento. Estes erros podem fazer com que o sistema resolva o problema parcialmente apenas, ou até mesmo tornar o sistema inútil. Durante a elaboração do SE proposto não foram detectados erros de especificação.

5. *Erros de representação do conhecimento*: Esses erros são semelhantes aos erros de semântica, porém compreendem não apenas regras isoladas, mas a base de conhecimento como um todo. Implicam em saídas incorretas e falhas na execução do sistema. Ocorrem quando uma técnica de representação de conhecimento inadequada é empregada, quando o engenheiro de conhecimento entende de forma incorreta alguns pontos do domínio, entre outros motivos. Através da Verificação e da Validação iterativa foi possível minimizar este tipo de erro.

No SE proposto houve um erro de representação do conhecimento na versão 1. Havia um erro no encadeamento entre as regras e foi detectado juntamente com o Especialista e corrigido para a versão posterior.

A Verificação compreende a correção e prevenção dos erros de semântica, sintaxe, técnicos e de especificação técnica. É realizada desde o início do desenvolvimento do sistema de forma iterativa, através de testes de execução e de eficiência (ZIMMERMANN, 2003).

3.6 Análise de Diferentes Sistemas Especialistas aplicados no mesmo domínio de conhecimento

Os sistemas especialistas existentes são classificados em categorias com base nas características de seu funcionamento conforme RIBEIRO (1987), DURKIN (1994), que no presente trabalho assume a categoria **de apoio a ensaios de desenvolvimento e projeto de produto**. Conforme já mencionado, nessa característica de SE a inferência é feita a partir dos fatos, gerando as respectivas conclusões de acordo com as regras.

DURKIN (1994) ao se referir às várias categorias para as quais são aplicados os sistemas especialistas, o diagnóstico aparece como líder em uma listagem de onze categorias. De fato, ao se fazer uma busca por Sistemas Especialistas aplicados a ensaios de condicionadores de ar durante a fase de desenvolvimento e projetos de produtos, pouco se encontrou com aplicações neste domínio específico, mas muitos sobre diagnósticos.

Foram encontrados os seguintes artigos com escopo semelhante pelo fato de serem aplicados a Sistemas de Refrigeração. A seguir são apresentados seus títulos e respectivos resumos.

Sistema para Detecção de Falha em Refrigeração (TASSOU & GRACE, 2005)

Resumo: O objetivo do projeto é demonstrar a economia de energia que é possível através do uso de Sistema Especialista para Detecção de Falha em Refrigeração utilizado para avaliar o estado de plantas de refrigeração e informar uma ação corretiva apropriada quando uma falha é detectada.

Sistema Especialista para detecção de falha e diagnóstico para o processo de refrigeração de uma planta com potência hidráulica (BERRIOS *et al*, 2008)

Resumo: Neste artigo discutem-se os componentes e projeto de cada parte de um SE para detecção de falha e diagnóstico para o processo de refrigeração de uma planta com potência hidráulica.

Desenvolvimento de modelo baseado em rede neural artificial para prognosticar a resposta estática e dinâmica de um trocador de calor de um sistema de condicionamento e ventilação mecânica de ar (HU *et al*, 2005)

Resumo: Este artigo apresenta uma abordagem sistemática para desenvolver um modelo de rede neural artificial para prognosticar a performance de operação de trocadores de calor em sistemas de condicionamento e ventilação mecânica de ar. Duas abordagens foram investigadas e apresentadas. Todos os componentes do

sistema de condicionamento e ventilação de ar foram considerados em detalhe e cada um foi modelado por uma rede neural artificial. Este estudo utilizou a técnica de rede neural para obter um modelo estático e dinâmico para um trocador de calor montado em um sistema de movimentação de ar, conhecido na indústria como *Air Handler Unit* (AHU), que é o componente chave de um sistema de condicionamento e ventilação de ar. Foi verificado que quase todos os valores do modelo de rede neural prognosticados estavam entre 95% - 105% dos valores medidos, o que demonstra um valor consistente do erro relativo médio menor que 2,5%. O artigo detalha a experiência em utilizar redes neurais artificiais, especialmente aquelas com estrutura de propagação reversa (*back propagation*¹²). Também, pesos e vieses do treinamento em modelos de redes neurais estão listados, e servem como uma boa referência para leitores lidarem com suas próprias situações.

Sistema Especialista para projetos de desenvolvimento de novos produtos (BALACHANDRA, 2000)

Resumo: Estudos de projetos de desenvolvimento de novos produtos têm tentado identificar um conjunto de fatores comuns que indicariam se o projeto será bem sucedido ou falhará. Estudos recentes mostraram que não há um conjunto universal de fatores, e que também há alguns fatores que têm efeitos contraditórios no sucesso de um projeto. Uma estrutura que classifica os projetos de desenvolvimento de novos produtos em diferentes grupos contextuais explica estas anomalias. O agrupamento auxilia na determinação de pesos apropriados para diferentes fatores de sucesso/fracasso, e o tipo de gerenciamento organizacional e abordagem adequada para o projeto. Os vários elementos subjetivos fazem com que a classificação dos projetos de desenvolvimento em seus grupos contextuais seja de grande dificuldade. Descreve um sistema baseado em regras que classifica estes projetos de desenvolvimento de produtos em seus grupos contextuais apropriados, sugere o nível de ênfase para os diferentes fatores de sucesso/fracasso e o adequado gerenciamento.

Sistema baseado em Conhecimento para Sistemas de condicionamento, ventilação e aquecimento de ar (JAFAR *et al*, 1991)

Resumo: Este artigo descreve o ciclo de vida de desenvolvimento, estrutura, verificação, validação e testes e avaliações do Sistema Especialista do Western Area

¹² Redes com propagação reversa (*Back Propagation networks*) são um tipo popular de rede que podem ser treinadas para reconhecer diferentes padrões incluindo imagens, sinais e textos.

Power Administration/Salt River Project Residential (WAPA/SRPRES). Este é um conselheiro de economia de energia residencial. O SE foi desenvolvido para fornecer conhecimento prontamente disponível que apoia esforços de auditoria de energia residenciais. O WAPA/SRPRES obtém informação sobre uma residência de um consumidor específico e seu consumo de energia através da interface do sistema. Esta informação é obtida diretamente pelo consumidor que executa o sistema ou indiretamente por um especialista que o executa.

O sistema então provém recomendações de gerenciamento de energia específicas e fáceis de seguir que são feitas sob medida de acordo com as necessidades específicas do consumidor. Versões posteriores com mais profundidade podem ser desenvolvidas para uso por auditores treinados para melhorar sua efetividade e produtividade. Outras versões equipadas com gráficos, mais explicações detalhadas e capacidade de busca podem ser utilizadas como parte de programas de treinamentos para auditores de energia.

Um Sistema Especialista para Projeto de Sistemas de Condicionamento, Ventilação e Aquecimento de Ar (CAMEJO, 1989)

Resumo: Sistemas Especialistas são programas de computador que procuram imitar a razão humana. Um SE *shell*, software comumente utilizado para desenvolver SE em curtos períodos de tempo, foi utilizado para desenvolver o protótipo do Sistema Especialista para projetos de sistemas de Condicionamento, Ventilação e Aquecimento de Ar em prédios. Por que o projeto de sistemas de condicionamento de ar envolve vários domínios de conhecimento relacionados, desenvolver um SE para este tipo de projeto requer uma integração de vários pequenos SEs conhecidos como Base de Conhecimento. Um menu do programa e vários programas auxiliares para aquisição de dados, complementação de cálculos, impressão de relatórios de projeto, e transferência de dados da Base de Conhecimento são necessários e foram desenvolvidos para se unir a base de conhecimento em um programa fácil de utilizar.

Dos artigos acima mencionados e dentre os trabalhos publicados ou gerados no Brasil e no exterior que foram largamente pesquisados durante a elaboração desse material não se encontrou algum que aborde uma aplicação semelhante à

proposta desse trabalho – apoiar as decisões durante a fase de ensaios em projetos de condicionadores de ar domésticos.

No próximo item será abordada a metodologia utilizada na etapa de Aquisição de Conhecimento.

3.7 Processo de Aquisição de Conhecimento

Durante o curso da disciplina EMC6607 (*Sistemas Especialistas aplicados à Engenharia*) foi identificada a possibilidade de modelar um SE capaz de auxiliar no processo de desenvolvimento de produtos. A grande vantagem deste SE é contribuir com as dificuldades encontradas pelos técnicos durante a fase de determinação de carga de fluido refrigerante em sistemas de refrigeração, mais especificamente em condicionadores de ar domésticos, conforme exposto na seção 2.6. Muitas vezes os técnicos não dispõem de completo conhecimento em sistemas de refrigeração e não sabem que ação corretiva tomar para ajustar tal sistema, o que gera gastos com o longo tempo e desenvolvimento. Muitas vezes também, se faz necessário concluir os ensaios de desenvolvimento com base em prazos para início de produção muito curtos, onde o tempo de desenvolvimento é ainda mais crítico para o sucesso do Projeto.

Na ocasião da realização dessa disciplina, foi feito o convite a um engenheiro de refrigeração que aceitou o desafio em participar exercendo o papel de Especialista. Pela proximidade física entre o Engenheiro do Conhecimento e esse Especialista, que trabalham na mesma área corporativa, a transferência das informações foi muito produtiva, estando quase sempre disponível para sanar eventuais dúvidas, assim como para realizar as verificações a cada processo iterativo. Após a conclusão da disciplina, optou-se por expandir o protótipo de SE e utiliza-lo como escopo para a dissertação de mestrado.

Seguindo a metodologia para Aquisição de Conhecimento, este processo foi dividido em três atividades principais:

- Definição das Saídas do SE

- Definição das Entradas do SE
- Definição das regras - a conexão entre as entradas e as saídas

Seguindo essa metodologia, a primeira atividade dessa etapa de Aquisição de Conhecimento foi a **definição das saídas do SE**, ou seja, as orientações que o SE deverá fornecer ao usuário quando este o estiver consultando, como segue na Tabela 3.2. Para cada combinação de resultados medidos em comparação com os valores de projeto, existirá uma única saída como resposta ao usuário.

Tabela 3.2 – Exemplo da definição das **saídas** do SE desenvolvido

PARÂMETROS	Possibilidades de resultados medidos	SÁIDAS
Capacidade_med	>	"Capacidade medida 10500 Btu/h = ou > que a capacidade de projeto 10.000 Btu/h! "Gerar relatório e enviar ao solicitante do teste." "Deseja voltar ao menu inicial para efetuar um novo teste? s/n"
DeltaSH_med	=	
TempEvap_med	=	
TempCond_med	=	
Capacidade_med	>	"A carga inicial de R22 era de 500g. Esta carga de R22 deve ser aumentada . "A nova carga de R22 deverá ser de 520g." "A razão desta recomendação é que foi constatado que a temperatura de SH medida 11C está > que a temperatura de SH de projeto 10C." "Executar novo teste com a nova carga de gas!"
DeltaSH_med	>	
TempEvap_med	>	
TempCond_med	>	
Capacidade_med	=	"A carga inicial de R22 era de 500g." "Esta carga de R22 deve ser reduzida . A nova carga de R22 deverá ser de 480g." "A razão desta recomendação é que foi constatado que a temperatura medida 9C está < que a temperatura de projeto " 10C." "Executar novo teste com a nova carga de gas!"
DeltaSH_med	=	
TempEvap_med	<	
TempCond_med	<	
Capacidade_med	<	"Solicitar novo dimensionamento do sistema pelo Eng. Refrigeração para aumentar a capacidade do condensador (nova densidade de aletas, área, rotação ventilador)" "Deseja voltar ao menu principal para efetuar um novo teste? s/n"
DeltaSH_med	=	
TempEvap_med	>	
TempCond_med	>	

PARÂMETROS	Possibilidades de resultados medidos	SAÍDAS
Capacidade_med	<	<p>"Reduzir fluxo no capilar reduzindo o seu diâmetro. O diâmetro atual de 1mm deve ser substituído por um de 0.8mm." "A razão desta recomendação é que foi constatado que a temperatura de evaporação medida 10°C está > que a temperatura de evaporação de projeto 9°C e a temperatura de condensação medida 45°C está < ou = a temperatura de condensação de projeto 45°C." "Executar novo teste com o novo diâmetro de capilar!"</p>
DeltaSH_med	=	
TempEvap_med	>	
TempCond_med	=	
Capacidade_med	<	<p>"Aumentar fluxo no capilar aumentando o seu diâmetro." "O diâmetro atual de 1mm deve ser substituído por um de 1.2mm". "A razão desta recomendação é que foi constatado que a temperatura de evaporação medida 8C está < que a temperatura de evaporação de projeto 9C." "Executar novo teste com o novo diâmetro e capilar!"</p>
DeltaSH_med	=	
TempEvap_med	<	
TempCond_med	<	
Capacidade_med	<	<p>"A capacidade medida 9500Btu/h está abaixo do valor de projeto 10.000Btu/h." "Contactar o Eng. de Cooling para que os parâmetros de projeto sejam revistos. " "Deseja voltar ao menu inicial para efetuar um novo testes? s/n"</p>
DeltaSH_med	=	
TempEvap_med	=	
TempCond_med	=	

As saídas são definidas com base nas combinações de resultados obtidos durante as medições do produto testado. Isso significa que se o valor da capacidade de refrigeração medida for igual ou maior que o valor de projeto e se os valores de grau de superaquecimento, evaporação e condensação medidos forem iguais aos valores de projeto, então a informação a ser transferida para o usuário é de que o produto está apto à aprovação.

Da mesma forma, se os valores de capacidade e grau de superaquecimento medidos forem iguais aos valores de projeto e os valores de temperatura de evaporação e condensação medidos forem menor que os valores de projeto, então se constata que há quantidade de refrigerante em excesso e esta deverá ser reduzida.

Há que se ressaltar que as saídas estão intrinsecamente ligadas à combinação desses quatro parâmetros – capacidade de refrigeração, grau de superaquecimento, evaporação e condensação.

A segunda atividade dessa etapa de Aquisição de Conhecimento foi a **definição das entradas do SE**, ou seja, dos parâmetros que compõem um condicionador de ar doméstico e que são relevantes para o problema abordado neste escopo. Estes dados representam as características do produto analisado e contêm as informações sobre o sistema de refrigeração que foi projetado.

A empresa-alvo fabrica basicamente os seguintes tipos de condicionadores de ar: RAC (de parede ou janela) e Splits (unidades evaporadora e condensadora separadas), de ciclo frio e/ou reverso (com aquecimento) e de capacidades que variam desde 7.500 até 30.000 Btu/h. Para cada tipo de produto e de sistema de refrigeração existem diferentes parâmetros que o define, e no caso do SE proposto, estes parâmetros são tratados como diferentes “entradas” para o SE.

Como exemplo de aplicação do SE proposto, optou-se por utilizar um modelo de produto largamente produzido: **RAC, ciclo frio e 10.000 Btu/h**, onde constam os parâmetros que o definem no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Definição das **entradas** do SE proposto para RAC

Tipo de produto: Condicionador de Ar doméstico (RAC)
Ciclo: frio
Capacidade de projeto: 10.000 Btu/h
Delta de temperatura superaquecimento de projeto: 10 °C
Temperatura de evaporação de projeto: 9 °C
Temperatura de condensação de projeto: 45 °C
Vazão de ar: 230 m ³ /h
Diâmetro inicial do tubo capilar: 1 mm
Comprimento inicial do capilar: 1000 mm
Massa inicial de R22 de projeto: 500 g

Caso fosse utilizado um produto de outra capacidade (de 10.000 a 12.000 Btu/h) ou outro tipo de ciclo (frio ou reverso) ter-se-iam os seguintes valores de entrada, conforme constam nas Tabelas 3.3 e 3.4.

Tabela 3.3 – Definição das entradas para RAC 10.000 Btu/h

Tipo de Produto		RAC 10k	
Ciclo		frio	reverso
Capacidade	Btu / h	10.000	9.800
Delta SH	°C	10	14
Temp Evaporação	°C	9	10
Temp Condensação	°C	45	50
Vazão de Ar	m3/h	230	250
Diâmetro Capilar	mm	1	1
Comprimento Capilar	mm	1000	1200
Massa Refrigerante	g	500	530

Tabela 3.4 – Definição das entradas para RAC 12.000 Btu/h

Tipo de Produto		RAC 12k	
Ciclo		frio	reverso
Capacidade	Btu / h	12.000	11.500
Delta SH	°C	12	16
Temp Evaporação	°C	9	10
Temp Condensação	°C	45	50
Vazão de Ar	m3/h	300	320
Diâmetro Capilar	mm	1	1
Comprimento Capilar	mm	700	900
Massa Refrigerante	g	600	630

Como podem ser observados nas Tabelas 3.3 e 3.4 os valores diferem entre si devido às características intrínsecas de cada tipo de produto – modelo que opera somente em modo frio ou modelo com válvula reversora. Esses valores são recomendações de projeto (diretrizes), entretanto podem vir a sofrer algumas alterações devido aos requisitos determinados em cada caso, seguindo os valores alvo estipulados no início de cada novo projeto como: nível de ruído aceitável, classificação de eficiência energética, capacidade de refrigeração, entre outras.

Da mesma forma, caso opte-se por utilizar um produto do tipo Split de diferentes capacidades - de 9.000 a 12.000 Btu/h – com diferentes tipos de ciclos – frio ou reverso – os parâmetros utilizados como dados de entrada seriam conforme constam nas Tabelas 3.5 e 3.6.

Tabela 3.5 – Definição das entradas para Split 10.000 Btu/h

Tipo de Produto		Split 10k	
		frio	reverso
Capacidade	Btu / h	9.700	9.500
Delta SH	°C	14	16
Temp Evaporação	°C	10	12
Temp Condensação	°C	42	48
Vazão de Ar	m3/h	180	200
Diâmetro Capilar	mm	1	1
Comprimento Capilar	mm	1000	1200
Massa Refrigerante	g	600	650

Tabela 3.6 – Definição das entradas para Split 12.000 Btu/h

Tipo de Produto		Split 12k	
		frio	reverso
Capacidade	Btu / h	11.800	11.500
Delta SH	°C	15	18
Temp Evaporação	°C	10	12
Temp Condensação	°C	42	48
Vazão de Ar	m3/h	260	280
Diâmetro Capilar	mm	1	1
Comprimento Capilar	mm	700	900
Massa Refrigerante	g	700	750

Da mesma forma que foi comentado para os produtos RAC, como pode ser visto nas Tabelas 3.5 e 3.6, os parâmetros diferem devido às características intrínsecas de cada tipo de produto.

Embora as tabelas apresentem dados de produtos reais, esses valores são utilizados como referência de projeto. Conforme sugerido pelo Especialista, não é adequado que estes valores venham fixados dentro da Base de Conhecimento do SE, uma vez que a cada novo projeto de produto esses valores podem e devem ser alterados como forma de maximizar os valores de capacidade e minimizar os valores de consumo de energia. Para isto, alteram-se algumas características do produto como, número de filas ou tubos dos trocadores de calor, disposição dos tubos e do circuito percorrido pelo refrigerante no interior do trocador, densidade de aletas

(conhecidas como FPI – *fins per inch*), vazão do ventilador, capacidade do compressor, entre outros.

A terceira atividade dessa etapa de Aquisição de Conhecimento foi a **definição das Regras do SE**, ou seja, a conexão entre as saídas e as entradas do sistema. Elas representam o núcleo do conhecimento do Especialista e têm a função de orientar os usuários, que muitas vezes têm dificuldades em saber o que deve ser alterado no sistema de refrigeração de modo a obter os valores alvo. No Quadro 3.2, está um exemplo de regra de produção no domínio de conhecimento específico do protótipo. A listagem completa das onze regras utilizadas no desenvolvimento desse SE encontra-se no Apêndice A.

Quadro 3.2 – Definição das regras do SE proposto

<hr/> SE “a temperatura de evaporação medida for MAIOR que a de projeto E a temperatura de condensação medida for MENOR ou IGUAL a de projeto” ENTÃO “reduzir o diâmetro atual do capilar em 0,2mm e executar um novo ensaio” <hr/>
--

Todas as informações dessas três primeiras etapas do processo de Aquisição do Conhecimento são resultados das reuniões com o Especialista, realizadas antes de iniciar a modelagem do SE proposto. Uma das etapas mais importantes na modelagem do SE é gerar o correto encadeamento entre estas regras. Detalhes desta atividade e o resultado dela são apresentados no Capítulo 4.

CAPÍTULO 4

MODELAGEM DO SISTEMA ESPECIALISTA PROTÓTIPO

No capítulo anterior foram definidos alguns termos importantes para uma melhor compreensão desse trabalho. O presente capítulo disserta sobre a metodologia escolhida para desenvolver o SE, as formas utilizadas para representar o conhecimento, alguns detalhes da implementação computacional e as características exclusivas inerentes ao SE apresentado.

4.1 Metodologia

Embora sistemas especialistas baseiem-se amplamente em conhecimento heurístico, seu desenvolvimento possui diversas fases ou ciclos, de maneira análoga a programas computacionais convencionais ou algorítmicos. O processo de construção de um Sistema Especialista é denominado Engenharia de Conhecimento e é realizado por um engenheiro de conhecimento (EC). Trata-se da aquisição de conhecimento e codificação do mesmo no SE, e pode ser subdividida nas seguintes fases:

- **Aquisição de Conhecimento:** conforme já detalhado no item 3.7, esta etapa foi dividida em três atividades principais: a definição das saídas, a definição das entradas e a definição das regras – a conexão entre as saídas e as entradas do SE.

- **Representação do Conhecimento:** optou-se por representar o conhecimento através de regras de produção e orientação a objetos, já descritas no capítulo 3 e que serão detalhadas a seguir.
- **Implementação:** essa etapa foi a mais longa do processo e foi segmentada em diferentes versões do *software*. Num primeiro momento implementou-se um protótipo simplificado e apresentado na disciplina *EMC6607*. Num segundo momento foram realizadas alterações de modo a tornar o programa mais completo e possível de ser incrementado no futuro para tornar-se um programa industrial. As diversas fases da implementação e verificações estão detalhadas mais a frente neste mesmo capítulo.
- **Verificação e Validação:** foi realizada a Verificação pelo EC para examinar o cumprimento das especificações e assegurar a consistência e abrangência da Base de Conhecimento, que são afetadas por erros de semântica, sintaxe, especificação ou de representação do conhecimento, conforme detalhado no item 3.5. A Validação foi realizada pelo Especialista e buscou-se, além das questões acima relacionadas, detectar se o domínio de conhecimento estava correto e consistente. Os detalhes a respeito dessas etapas estão descritas no capítulo 5.

A complexidade envolvida no desenvolvimento de um SE torna necessária que sua implementação seja feita por etapas. O método mais utilizado para este fim é o **modelo incremental**, onde o sistema é desenvolvido a partir de incrementos na sua funcionalidade, através de ciclos definidos de desenvolvimento (GONZALEZ & DANKEL, 1993; GIARRATANO & RILEY, 2005).

A cada ciclo de desenvolvimento, realizam-se as seguintes tarefas:

- Aquisição de conhecimento (conceitualização e formulação)
- Implementação
- Verificação e Validação

O objetivo de cada ciclo é incorporar ao sistema uma ou mais novas funcionalidades, tornando-o cada vez mais completo. Todas estas fases serão detalhadas nos próximos itens deste capítulo.

4.2 Representação do Conhecimento

Dentre as técnicas mais usuais de representação do conhecimento, descritas no item 3.3, optou-se por executar uma modelagem com base em **regras de produção**, que representam as relações de causa-efeito dos parâmetros analisados, e **orientação a objetos**, que representa as entidades com seus atributos e valores a elas associadas.

A representação através de regras de produção está associada ao mecanismo de inferência (máquina de inferência). Esse mecanismo analisa as premissas das regras selecionadas com fatos existentes e considera a veracidade das premissas fazendo disparar as regras que as contém, sendo então executadas suas ações. Essa técnica é uma das mais utilizadas pela facilidade de entendimento, mas pode levar às situações de conflitos entre as regras, ou seja, os fatos existentes podem satisfazer premissas de várias regras simultaneamente, chamadas de regras de conflito. Para que isso não ocorra o mecanismo de inferência deve estar preparado (PASSOS, 2005). Nesse trabalho os problemas de conflitos entre regras foram resolvidos apenas pela orientação a objetos, não sendo necessário declarar saliência entre as regras.

Como já abordado no capítulo 3, os objetos são definidos por suas classes. Nas classes estão descritos os atributos que os objetos das mesmas possuem e o seu comportamento, através dos métodos (funções que implementam as ações que o objeto pode realizar).

No protótipo desenvolvido, a Base de Conhecimento foi estruturada em duas classes principais, sendo elas *SRPROJ* (que contém os dados de projeto) e *SRMED* (que irá conter os dados obtidos na medição em laboratório). Essas classes estão descritas com seus atributos e métodos no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Definição das Classes e seus atributos

<p>Classe: <i>Sistema de Refrigeração Projetado (SRPROJ)</i></p> <p>Atributos</p> <ul style="list-style-type: none">Tipo de produtoCicloCapacidade de refrigeração de projetoDelta de superaquecimento de projetoTemperatura de evaporação de projetoTemperatura de condensação de projetoDiâmetro do tubo capilarComprimento do tubo capilarMassa de R22 <p>Classe: <i>Sistema de Refrigeração Medido (SRMED)</i></p> <p>Atributos</p> <ul style="list-style-type: none">Capacidade de refrigeração medida:Delta de Superaquecimento medida:Temperatura evaporação medida:Temperatura condensação medida:Diâmetro do tubo capilarComprimento do tubo capilarMassa de R22 medida <p>Método 1: dimensionar a carga de refrigerante ideal para cada sistema de refrigeração</p> <p>Método 2: determinar diâmetro e comprimento do capilar ideais para cada sistema de refrigeração</p> <hr/>
--

Uma das características fundamentais da programação orientada a objetos é a transferência hierárquica de todas as definições e métodos de uma classe às suas subclasses. As classes são organizadas hierarquicamente com a classe mais genérica no topo e as mais especializadas logo abaixo (CLIPS, 2002).

Foram criadas também duas instâncias, sendo elas: SR_P da classe SRPROJ e SR_M da classe SRMED. Uma **instância** é uma representação específica de um fragmento de conhecimento (BITTENCOURT, 2006).

Os atributos da instância SR_P recebem os valores de projeto para um **RAC** (condicionador de ar de janela) operando em **ciclo frio**, escolhido como exemplo de aplicação deste SE. Para outros tipos de produtos esses valores são diferentes e devem ser incorporados ao SE pelo Engenheiro de Refrigeração que projeta o sistema. Para que seja facilitada essa tarefa de inserção de dados é sugerida que uma amigável interface gráfica seja desenvolvida em trabalhos futuros que venham a dar continuidade a esse protótipo.

Os atributos da instância SR_M iniciam sem valores definidos e são preenchidos pela leitura de um arquivo de dados com o resultado da medição do produto que está sob análise. O SE desenvolvido faz esta captura dos dados medidos no calorímetro automaticamente através de uma função. Os valores medidos são então comparados com os dados de projeto presentes na sua Base de Conhecimento.

Quadro 4.2 – Definição da instância para os parâmetros de projeto

Definição da Instância SR_P of SR_PROJ
<p>Tipo "RAC" Ciclo frio Capacidade de projeto = 10.000 (Btu/h) Grau de Superaquecimento de projeto = 10 (°C) Temperatura Evaporação de projeto = 9 (°C) Temperatura Condensação de projeto = 45 (°C) Diâmetro inicial do tubo capilar de projeto = 1 (mm) Comprimento inicial do tubo capilar de projeto = 1000 (mm) Massa de R22 de projeto = 500 (g)</p>

O Quadro 4.2 traz os valores de projeto que constam na instância SR_P e foram utilizados para validar o protótipo de Sistema Especialista. Para efeito de implementação, no presente trabalho optou-se por mapear e armazenar na Base de Conhecimento as principais possibilidades de combinação existentes para desenvolver os produtos, muito embora estes valores possam sofrer alterações dependendo do produto que está em desenvolvimento.

Conforme demonstrado no item 3.7 na etapa de Aquisição do Conhecimento foram identificadas onze condições que traduzem o raciocínio de um especialista em refrigeração e a interação entre elas reflete as ações a serem tomadas durante a investigação realizada no sistema de refrigeração para torná-lo mais eficiente e otimizado. Essas condições foram posteriormente traduzidas em regras através de linguagem computacional e constam no Apêndice A.

Após a tradução das condições em regras em linguagem computacional, houve uma importante etapa de identificação do encadeamento entre essas regras. Os diagramas das Figuras 4.1 a 4.4 foram elaborados em conjunto com o Especialista de forma a tornar mais clara esta interação entre as regras antes de criá-las no programa. É de grande importância que esse encadeamento esteja corretamente desenhado, caso contrário as saídas teriam as suas veracidades comprometidas. Por exemplo, caso uma regra esteja erroneamente encadeada com outra, a informação de saída para o usuário será diferente da que deve ser feita, acarretando em erradas ações pelo técnico que o estiver utilizando como apoio aos ensaios de desenvolvimento de produtos.

A regra 1 é utilizada para inicialmente ativar as regras, além de carregar os manipuladores de mensagens que trazem o texto de apresentação do SE e carregar os dados de projetos e os medidos nas instâncias pré-definidas. Essa regra também executa o comando que realiza a ligação entre ela e as outras três que deverão ser ativadas, como é mostrado na Fig. 4.1.

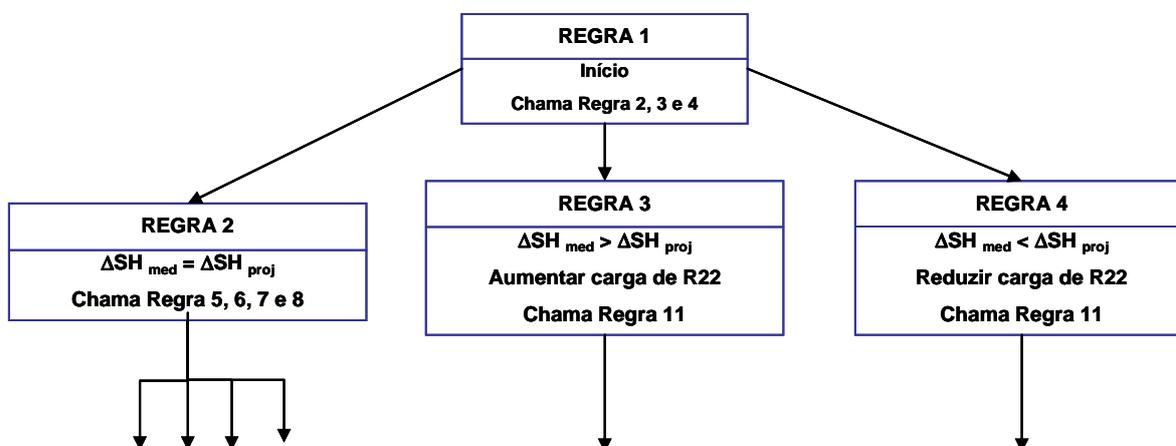


Figura 4.1 – Encadeamento entre as regras de 1 a 4

Nas figuras 4.1 a 4.4 o delta da temperatura de superaquecimento medida e de projeto são denominadas reduzidamente por “ ΔSH_{med} ” e “ ΔSH_{proj} ”, respectivamente. Da mesma forma, as temperaturas de evaporação e condensação medidas e de projetos são denominadas reduzidamente por “ $T_{evap_{med}}$ ”, “ $T_{cond_{med}}$ ”, “ $T_{evap_{proj}}$ ”, “ $T_{cond_{proj}}$ ”, respectivamente.

Analisando a regra 2 na Fig. 4.2, pode-se perceber que para o caso de igualdade entre os valores das temperaturas de superaquecimento de projeto e medida, o próximo passo é analisar as temperaturas de evaporação e condensação do sistema que está sendo testado. As quatro possíveis situações estão refletidas nas regras de 5 a 8. Para cada situação, há uma diferente ação a ser tomada e o resultado, conseqüentemente, também difere.

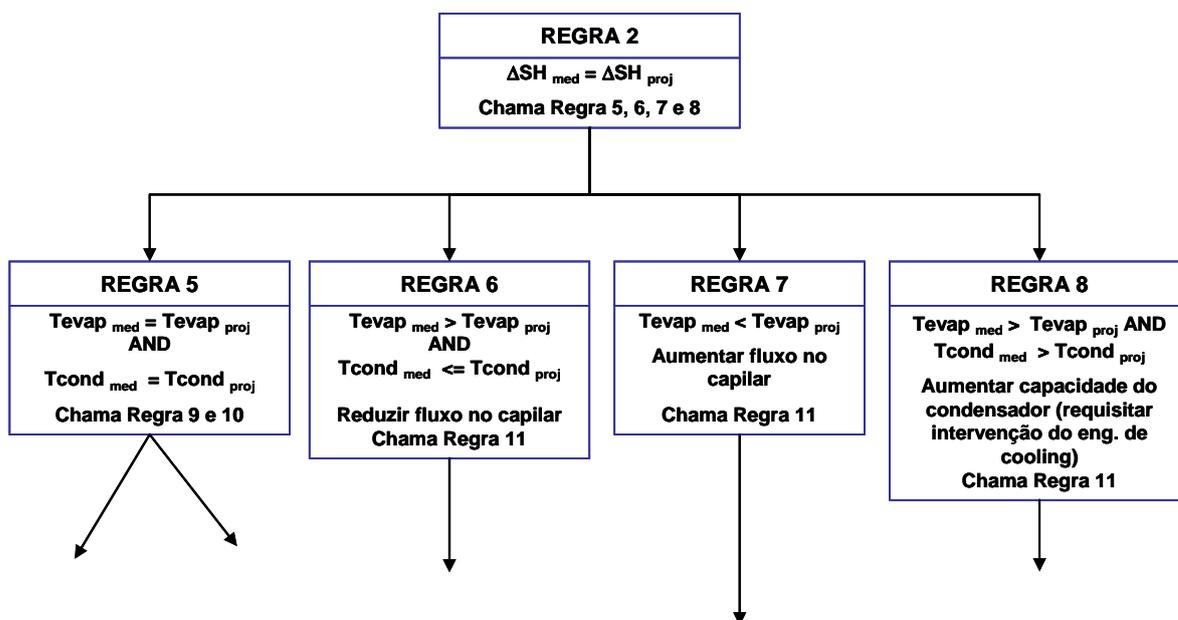


Figura 4.2 – Encadeamento entre as regras de 2 a 8

Analisando a regra 5, uma vez obtida a igualdade entre os valores das temperaturas de superaquecimento de projeto e medida, esta é disparada e está ligada às regras 9 e 10, que avaliam o valor da capacidade de refrigeração do sistema, como pode ser visto na Fig. 4.3. Caso essa igualdade não tenha sido atingida, ou seja, não é verdadeira, as regras 6, 7 e 8 serão ativadas e somente disparadas uma vez que suas condicionais sejam satisfeitas.

As regras de 6 a 8, assim como as 9 e 10 estão ligadas com a regra 11, que executa uma mensagem na tela questionando ao usuário se um novo ensaio poderá ser iniciado após as alterações terem sido feitas. A cada alteração efetivada no produto, um novo ensaio deve ser realizado de modo a testar o impacto que essa alteração resultou no produto como um todo. E conforme já mencionado, a cada alteração realizada no sistema de refrigeração é necessário que aguarde a estabilização das pressões antes de iniciar a aquisição dos dados.

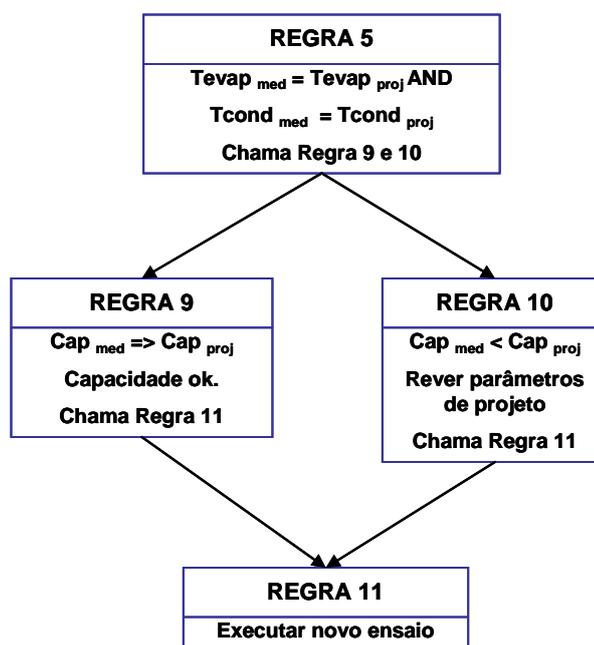


Figura 4.3 – Encadeamento entre as regras 5, 9, 10 e 11

A Fig. 4.4 mostra o encadeamento completo entre todas as 11 regras do SE proposto, seja ele para o desenvolvimento de um sistema de refrigeração para um RAC ou para um Split. As regras e o encadeamento entre elas são as mesmas para os diferentes tipos de produtos, independente de suas capacidades de refrigeração ou tipos de ciclo. O que difere são os valores de projeto para cada novo produto desenvolvido.

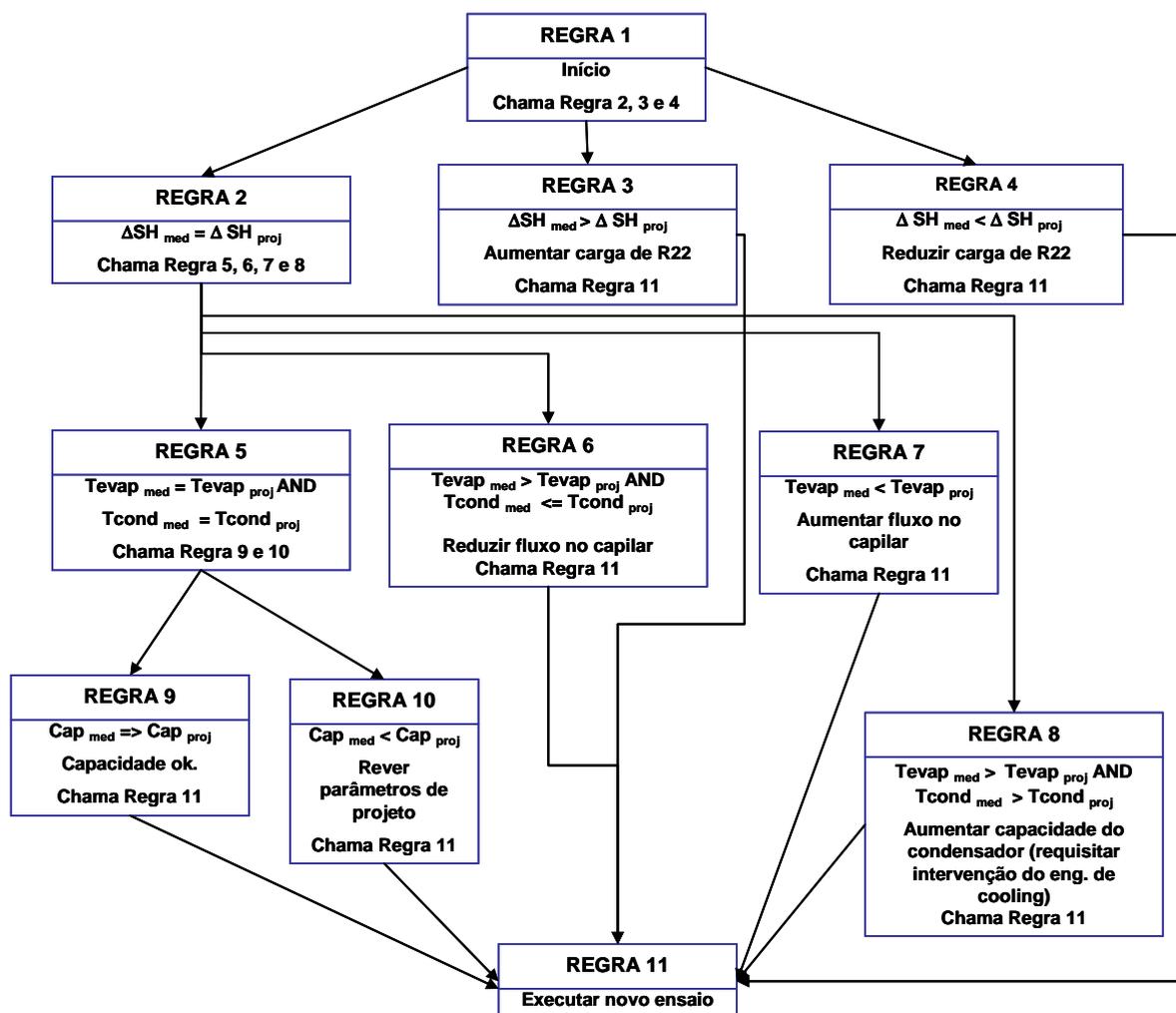


Figura 4.4 – Encadeamento entre todas as regras

A representação do conhecimento em forma de regras explicita as interações entre as mesmas e traz as principais informações que o operador do calorímetro necessita na hora de tomar as decisões para desenvolver o sistema de refrigeração. Essas regras traduzem um raciocínio que deve ser seguido de forma a resolver um problema, no caso, o desenvolvimento de um sistema de refrigeração. Com isso, obtém-se mais produtividade através da redução no tempo de ensaios de desenvolvimento de produtos, assim como no aprendizado de novos técnicos que podem se juntar à equipe.

4.3 Implementação Computacional

É durante a implementação que o engenheiro traduz na forma computacional toda a base de conhecimento adquirida através de entrevistas com os especialistas humanos, no caso o Engenheiro de Refrigeração.

Foi escolhido um ambiente de programação (*shell*) gratuito e largamente utilizado para realizar a implementação. O *shell*, ou ambiente de programação, é uma ferramenta para desenvolvimento de softwares que dispõe de um mecanismo para a indução de regras. Fornece mais orientações e mecanismos de como representar e acessar o conhecimento, tornando o desenvolvimento mais dinâmico e fácil do que se fosse utilizada uma linguagem de programação (GIARRATANO & RILEY 2005).

O *shell* utilizado para a implementação do Sistema Especialista foi o CLIPS v.6.20, um dos *softwares* mais populares e que foi desenvolvido pelo Departamento de Inteligência Artificial do Centro Espacial Johnson da NASA em 1985 (CLIPS, 2004).

CLIPS é um acrônimo para “*C Language Integrated Production System*” - Linguagem C Integrada para Sistemas de Produção. Os principais motivos para esta escolha foram os seguintes:

- A ferramenta fornece as estruturas necessárias para a resolução do problema (encadeamento direto, regras, objetos, fatos).
- Confiabilidade da ferramenta: a ferramenta foi desenvolvida por um centro de pesquisa de alto nível e é utilizada com resultados positivos desde que foi criada.
- O custo de aquisição da ferramenta é zero, pois é um software gratuito (*freeware*).
- O engenheiro de conhecimento já possuía experiência na utilização da ferramenta, adquirida no curso da disciplina *EMC6607*.

Alguns conceitos essenciais da linguagem orientada a objetos que o CLIPS utiliza vieram de outros programas, como por exemplo, SIMULA¹³ inseriu o conceito de classes, hierarquia, superclasses e instâncias. Por todas essas características estarem embutidas no CLIPS denomina-se COOL (*Common Object-Oriented Language*) (GIARRATANO & RILEY, 2005).

Devido à natureza do problema modelado, optou-se por utilizar o raciocínio inferencial dirigido por dados (*data driven*), ou também conhecido como encadeamento direto entre as regras (*forward chain*), como já mencionado no item 3.2.

A principal desvantagem encontrada em relação à utilização desta ferramenta diz respeito à sua interface, que apresenta apenas textos como mecanismo de interação entre o usuário e o sistema.

Durante a implementação computacional há uma evolução natural no Sistema Especialista. O Quadro 4.3 traz um sumário destas etapas onde pode ser visto quais foram os pontos de melhoria em cada nova versão submetida para validação do Especialista.

Quadro 4.3 – Síntese da evolução das versões

VERSÃO	Data	Descrição da implementação	Resultado da Validação
<i>Versão 1</i>	<i>2006</i>	Havia um erro de representação do conhecimento na versão 1 do protótipo, atribuído a um mau entendimento dos corretos encadeamentos entre as regras, gerando uma informação de saída errada aos usuários finais.	Reprovado pelo Especialista ao notar que as saídas não estavam coerentes. Foi constatado que havia um erro no encadeamento entre as regras, gerado por uma má comunicação entre o EC e o especialista nas primeiras entrevistas.
<i>Versão 2</i>	<i>2006</i>	Correção do encadeamento entre as regras, gerando informações coerentes e corretas para os usuários finais.	Aprovado pelo Especialista e apresentado como trabalho final na Disciplina <i>EMC6607</i>

¹³ **Simula** é uma família de linguagens de programação, projetadas para apoiar a simulação de eventos discretos, criadas entre 1962 e 1968 por Kristen Nygaard e Ole-Johan Dahl no Centro Norueguês de Computação em Oslo.

<i>Versão 3</i>	<i>2007</i>	Implementada a função que busca os dados medidos gerado pelo software que opera o calorímetro	Aprovado pelo Especialista e realizadas algumas simulações para checar consistência do SE.
<i>Versão 4</i>	<i>2008</i>	Acrescentada opção do SE operar para RAC e para Splits, utilizando valores pré-estabelecidos.	Aprovado pelo Especialista.

As evoluções sugeridas para essa versão 4 de modo a torná-lo um SE industrial e efetivamente aplicável ao calorímetro e ao processo de desenvolvimento de produtos na empresa-alvo serão abordadas no capítulo 6, no item que disserta sobre as recomendações a trabalhos futuros.

4.4 Características do SE proposto

O SE proposto tem em sua Base de Conhecimento as informações referentes aos dados de projeto, elaborados pelo Engenheiro de Refrigeração e mapeados nas instâncias, conforme demonstrado no Quadro 4.2.

O produto em avaliação, seja um condicionador de ar fabricado ou ainda um protótipo, é instalado em um Calorímetro e os dados de leitura são adquiridos pelo *data-logger*, conectado ao *LabView*, conforme mencionado no capítulo 2.

A execução do SE consiste em retornar uma informação que sugere uma ação para o usuário. Através da comparação entre os valores de projeto e os medidos no ensaio, obtém-se diferentes situações e cenários, orientando, desta forma, os usuários que não dispõem de total domínio da técnica do desenvolvimento de condicionadores de ar.

Um parâmetro importante para avaliar como o sistema de refrigeração se comporta é a temperatura de superaquecimento, que é a diferença entre a temperatura medida na tubulação de sucção e a temperatura de saturação correspondente à pressão de sucção. A medição da temperatura de

superaquecimento é crucial para determinar se existe refrigerante na fase líquida retornando ao compressor, enquanto o mesmo está funcionando, o que acarretaria em sérios problemas a este componente, conhecido como “golpe de líquido”. Essa medição é obtida através da leitura de um termopar soldado na parte externa da tubulação de cobre e conectado ao *data-logger* do calorímetro.

Atualmente, o tempo de ensaio de desenvolvimento está diretamente relacionado ao grau de experiência e habilidade do técnico que opera o calorímetro para testar um produto. Técnicos pouco experientes levam muito mais tempo para tomar decisões corretas do que os técnicos mais antigos e experientes. Atualmente, ao realizar uma substituição de compressor e ajuste do sistema de refrigeração pela inserção desse novo componente, um técnico mais experiente levaria cerca de uma semana para realizar essa tarefa, para um produto que opere somente em modo frio, ou duas semanas, para um produto com ciclo reverso (aquecimento). Já um técnico pouco experiente nessa função levaria cerca de quatro a seis semanas para conseguir desenvolver o mesmo sistema em ciclo frio.

Esse Sistema Especialista traz em seu núcleo a heurística usada pelos operadores mais experientes, e busca igualar esse tempo de ensaio feito pelos diferentes níveis de experiência e conhecimento dos operadores envolvidos. A meta é que o tempo de ensaio de um operador menos experiente seja no mínimo equivalente ao tempo de ensaio de um mais capacitado.

Não apenas a redução no tempo de ensaio é o motivador desse trabalho, mas também o aumento da disponibilidade do conhecimento, tornando acessível a todos os operadores, tanto atuais como futuros, a heurística disponível nesse domínio de conhecimento.

Devido à aplicação desse SE ser voltada para ensaios em calorímetro, optou-se por realizar a variação em quatro dos dez parâmetros de projetos apresentados no Quadro 4.2. Os demais parâmetros não são alterados durante as medições feitas em calorímetro, mas sim utilizando um túnel de vento – um outro equipamento, que é utilizado para medir a vazão de ar do produto. Caso a modificação necessária seja alterar algum elemento do circuito de refrigeração, o Engenheiro de Refrigeração necessita alterar o projeto e especificar o novo componente. Por exemplo, caso a rotação do motor ventilador não seja suficiente para obter a vazão de ar requerida, um novo motor deverá ser especificado.

Esses quatro parâmetros podem apresentar três situações de valores durante os ensaios. É possível que essas variáveis apresentem valores iguais, maiores ou menores do que os de projeto. Dessa forma, a quantidade de possíveis saídas do programa são 81 combinações.

De forma a exemplificar algumas possibilidades de saídas, seguem alguns exemplos apresentados nas próximas figuras. A Fig. 4.5 mostra um exemplo de como está a apresentação atual de saída do protótipo de SE, para uma determinada seqüência de valores de projeto e medidos e as informações que o SE transmite ao usuário do calorímetro perante uma determinada situação.

```
DADOS DE PROJETO:
[SR_P] of SRPROJ
(tipo R&C)
(ciclo frio)
(nome "ArCondicionado")
(capacidade_proj 10000)
(DeltaSH_proj 10)
(TempEvap_proj 9)
(TempCond_proj 45)
(VazaoAr_proj 230)
(DiamCapilar 1)
(CompCapilar 1000)
(MassaR22_inicial 500)

A capacidade do produto MEDIDA foi de: 11000Btu/h
O Delta de Superaquecimento MEDIDO foi de: 10°C
A temperatura de evaporacao MEDIDA foi de: 10°C
A temperatura de condensacao MEDIDA foi de: 43°C

Reduzir o fluxo no capilar reduzindo o seu diametro.
O diametro atual de 1 mm deve ser substituido por um de 0.8 mm.

A razão desta recomendação é que foi constatado que a temperatura
de evaporação medida 10 C está MAIOR que
a temperatura de evaporação de projeto 9 C e a temperatura de
condensação medida 43 C está menor ou igual a temperatura
de condensação de projeto 45 C.
realizar novo teste com o novo diametro de capilar!

Deseja voltar ao menu principal para efetuar um novo teste? s/n
```

Figura 4.5 – Exemplo de apresentação de dados de saída do SE para um determinado grupo de valores

Na Figura 4.5, podem ser vistos os dados de projeto na listagem e os valores medidos no ensaio com um RAC. A orientação ao usuário do SE é apresentada através de uma frase explicativa para que o mesmo saiba que ação corretiva tomar. É sempre sugerido que um novo ensaio seja realizado após as alterações terem sido implementadas no produto que está sendo testado.

Há situações em que as alterações podem ser realizadas com o produto ainda instalado no calorímetro, como por exemplo, aumento da quantidade de refrigerante. Por outro lado, há situações onde é necessário que se retire o produto do calorímetro para realizar a alteração, como por exemplo, quando se deve aumentar ou reduzir a vazão no tubo capilar, substituindo o atual por um novo. Neste caso, é preciso retirar a carga de refrigerante, coletando-a adequadamente para recuperação, soldar um novo tubo capilar, conectar o produto a uma bomba de vácuo e acrescentar uma nova carga de refrigerante.

Um outro exemplo de resposta do SE para o usuário quando se utiliza outros valores medidos é apresentado na Fig. 4.6.

```

*****
Sistema Especialista Prototipo para Desenvolvimento
de Condicionadores de Ar

Cintia A Lopes - cintial@whirlpool.com
Universidade Federal de Santa Catarina - POSMEC
Florianopolis - 2008
*****

DADOS DE PROJETO:
[SR_P] of SRPROJ
(tipo RAC)
(ciclo frio)
(nome "ArCondicionado")
(capacidade_proj 10000)
(DeltaSH_proj 10)
(TempEvap_proj 9)
(TempCond_proj 45)
(VazaoAr_proj 230)
(DiamCapilar 1)
(CompCapilar 1000)
(MassaR22_inicial 500)

A capacidade do produto MEDIDA foi de: 11000Btu/h
O Delta de Superaquecimento MEDIDO foi de: 10°C
A temperatura de evaporacao MEDIDA foi de: 9°C
A temperatura de condensacao MEDIDA foi de: 45°C

Capacidade medida 11000 Btu/h é igual ou maior que a
capacidade de projeto 10000 Btu/h!

Gerar relatório e enviar ao solicitante do teste.

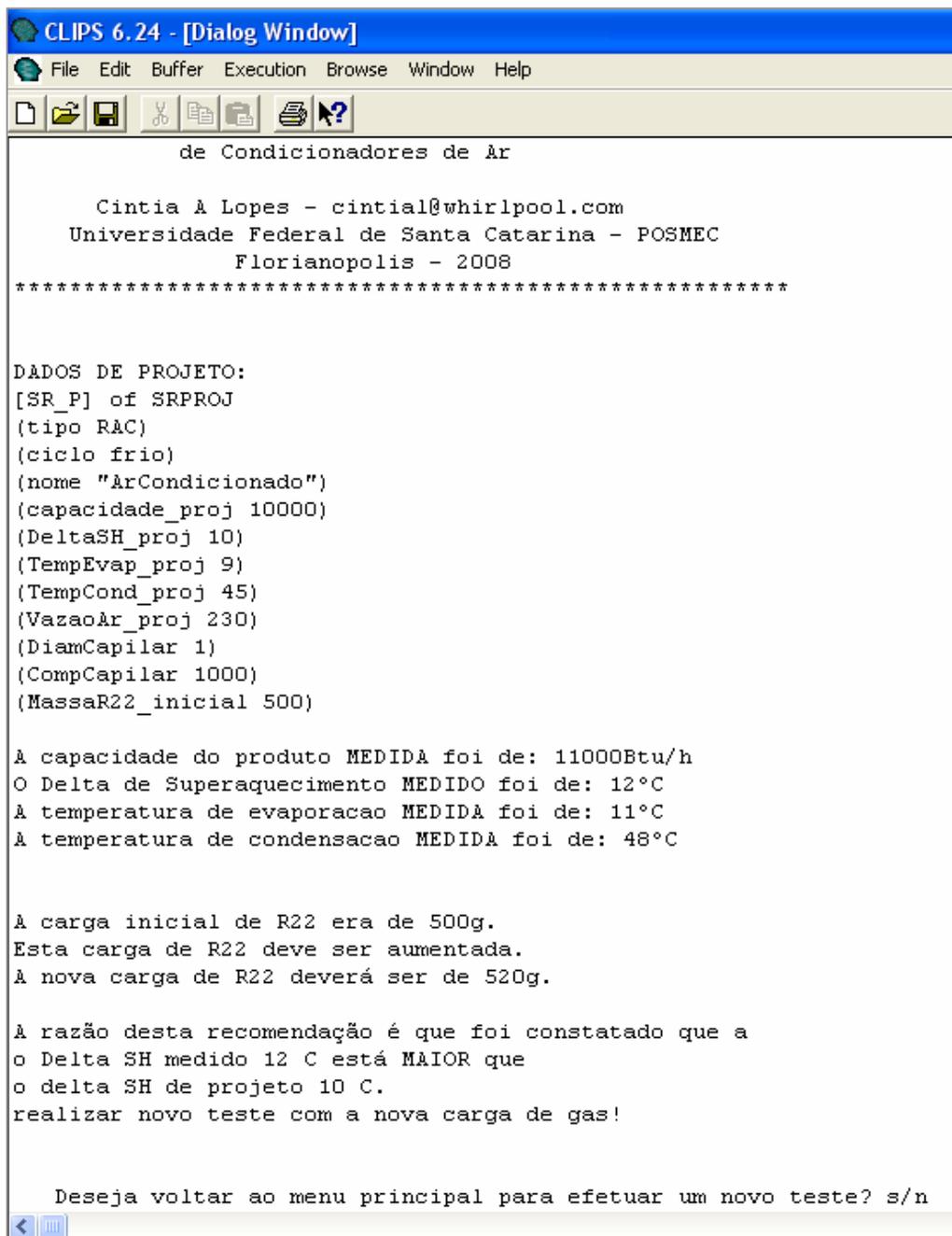
Deseja voltar ao menu principal para efetuar um novo teste? s/n

```

Figura 4.6 – Exemplo de apresentação de dados de saída do SE

Como pode ser visto no exemplo apresentado na Fig. 4.6, a capacidade de refrigeração medida está maior que a de projeto. Entretanto, esta regra só foi disparada após a verificação das regras que avaliam os valores de delta de temperatura de superaquecimento, evaporação e condensação, conforme já demonstrado pelo encadeamento entre todas as regras, na Fig. 4.4. No exemplo em questão, apenas o valor de capacidade de refrigeração medida está maior que a de projeto; as temperaturas estão todas iguais. Trata-se de um exemplo teórico, pois na prática dificilmente em um ensaio de desenvolvimento se obtém os valores alvo sem realizar diversos ajustes no sistema de refrigeração.

Como um outro exemplo típico indica-se que a capacidade de refrigeração medida, as temperaturas de superaquecimento, evaporação e condensação medidas são maiores que os respectivos valores de projeto, como pode ser visto na Fig. 4.7.



```
CLIPS 6.24 - [Dialog Window]
File Edit Buffer Execution Browse Window Help

de Condicionadores de Ar

Cintia A Lopes - cintial@whirlpool.com
Universidade Federal de Santa Catarina - POSMEC
Florianopolis - 2008
*****

DADOS DE PROJETO:
[SR_P] of SRPROJ
(tipo RAC)
(ciclo frio)
(nome "ArCondicionado")
(capacidade_proj 10000)
(DeltaSH_proj 10)
(TempEvap_proj 9)
(TempCond_proj 45)
(VazaoAr_proj 230)
(DiamCapilar 1)
(CompCapilar 1000)
(MassaR22_inicial 500)

A capacidade do produto MEDIDA foi de: 11000Btu/h
O Delta de Superaquecimento MEDIDO foi de: 12°C
A temperatura de evaporacao MEDIDA foi de: 11°C
A temperatura de condensacao MEDIDA foi de: 48°C

A carga inicial de R22 era de 500g.
Esta carga de R22 deve ser aumentada.
A nova carga de R22 deverá ser de 520g.

A razão desta recomendação é que foi constatado que a
o Delta SH medido 12 C está MAIOR que
o delta SH de projeto 10 C.
realizar novo teste com a nova carga de gas!

Deseja voltar ao menu principal para efetuar um novo teste? s/n
```

Figura 4.7 – Exemplo de apresentação de dados de saída do SE

Uma situação como esta apresentada na Fig. 4.7 é um bom exemplo de que não basta a capacidade de refrigeração estar acima do desejado; se as temperaturas estiverem acima do valor especificadas, o sistema de refrigeração precisa ser revisto, pois o mesmo não atingirá os valores de eficiência energética desejados e estabelecidos pelo Governo e o sistema deve estar superdimensionado para os valores alvo de projeto.

A Fig. 4.8 mostra um exemplo em que o valor de capacidade de refrigeração medido está menor do que o valor estipulado no projeto, o delta de superaquecimento está igual e as temperaturas de evaporação e condensação medidos estão menores do que os dados de projeto.

```

DADOS DE PROJETO:
[SR_P] of SRPROJ
(tipo R&C)
(ciclo frio)
(nome "ArCondicionado")
(capacidade_proj 10000)
(DeltaSH_proj 10)
(TempEvap_proj 9)
(TempCond_proj 45)
(VazaoAr_proj 230)
(DiamCapilar 1)
(CompCapilar 1000)
(MassaR22_inicial 500)

A capacidade do produto MEDIDA foi de: 9000Btu/h
O Delta de Superaquecimento MEDIDO foi de: 10°C
A temperatura de evaporacao MEDIDA foi de: 8°C
A temperatura de condensacao MEDIDA foi de: 48°C

Aumentar o fluxo no capilar aumentando o seu diametro.
O diametro atual de 1 mm deve ser substituido por um de 1.2 mm.

A razão desta recomendação é que foi constatado que a temperatura
de evaporação medida 8 C está MENOR que
a temperatura de evaporação de projeto 9 C.
realizar novo teste com o novo diametro de capilar!

Deseja voltar ao menu principal para efetuar um novo teste? s/n |

```

Figura 4.8 – Exemplo de apresentação de dados de saída do SE

Nessa situação, a recomendação é para aumentar o fluxo de refrigerante que passa pelo tubo capilar através da alteração do seu diâmetro ou do seu comprimento. Para isso, um novo tubo capilar deve ser instalado no produto.

Através dos exemplos e do encadeamento entre as regras apresentados é possível compreender como o SE opera perante diferentes situações hipotéticas e reais e qual é a sua contribuição dentro da empresa-alvo. A sua maior contribuição é orientar técnicos pouco experientes para que ganhem velocidade nas tomadas de decisão ao realizar os ensaios de desenvolvimento de condicionadores de ar. Uma outra importante contribuição é permitir que esse conhecimento fique armazenado na empresa mesmo com eventuais desligamentos de funcionários experientes que dominam a heurística envolvida nos processos de desenvolvimentos de produtos.

As etapas de Validação e Verificação, que foram realizadas pelo Engenheiro do Conhecimento e pelo Especialista, serão abordadas no próximo capítulo.

CAPÍTULO 5

VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO

No capítulo anterior foi apresentada a metodologia escolhida para desenvolver o SE, as formas utilizadas para representar o conhecimento, detalhes da implementação computacional e as características exclusivas inerentes ao SE desenvolvido. Nesse próximo capítulo apresenta-se o processo de Verificação e Validação a que protótipo desenvolvido foi submetido, sendo essa uma importante etapa do processo de desenvolvimento de Sistemas Especialistas.

5.1 Introdução

Antes de ser entregue ao usuário final, um sistema especialista deve passar pela Verificação e Validação. Essa tarefa tem por objetivo garantir que o sistema apresente resultados corretos e que atende às necessidades dos usuários finais (GONZALEZ & DANKEL, 1993).

Para que se possa realizar essa tarefa, é necessário definir o que pode ser considerado um resultado satisfatório, além das necessidades dos usuários finais. Para isso, são definidas métricas que são utilizadas como parâmetros de avaliação do Sistema Especialista (SILVA 1998).

Nesse capítulo são apresentados conceitos teóricos sobre a Verificação e Validação de Sistemas Especialistas e como esses conceitos foram aplicados no protótipo desenvolvido no presente trabalho. Também são abordadas as métricas definidas como sendo satisfatórias para Validar o SE protótipo perante os usuários finais.

5.2 Aspectos importantes sobre Verificação e Validação de Sistemas Especialistas

Embora seja formalmente apresentada como última etapa no desenvolvimento de um sistema especialista, essa tarefa na verdade é realizada ao longo do desenvolvimento do protótipo (GONZALEZ & DANKEL, 1993). Dessa forma, tem-se a Verificação ao final de cada ciclo de desenvolvimento, sendo dada maior ênfase à última Validação realizada antes da entrega do protótipo ao usuário final, conforme demonstrado na Fig. 3.6 onde demonstra o modelo incremental adotado no desenvolvimento desse trabalho.

Embora as atividades de Verificação e Validação tenham o mesmo objetivo final, eliminar erros para garantir que o sistema apresente a resposta correta, os erros a serem eliminados em cada uma das duas etapas são diferentes. As maiores causas de erros em sistemas especialistas são (GONZALEZ & DANKEL, 1993):

- Falta de especificações ou, se elas existem, falta de comprometimento a elas.
- Erros semânticos e sintáticos introduzidos durante a implementação do sistema (conhecidos como *bugs*).
- Representação incorreta do domínio de conhecimento, resultando em uma solução incorreta ou na incapacidade de chegar a uma solução.

Os dois primeiros tipos de erros são abordados pela Verificação, enquanto o último é responsabilidade da Validação. Erros de sintaxe, segundo ALVES (2001), na verdade "são formas inadequadas de inserir o conhecimento no ambiente de programação". Já os erros de semântica, segundo o mesmo autor, "representam modificações indevidas no conhecimento do especialista humano".

Ao longo do ciclo de desenvolvimento do protótipo é realizada a Verificação, geralmente em caráter informal, através da correção do que foi feito até o momento, garantindo que erros não sejam propagados durante a evolução do sistema. Os erros de semântica são referentes ao conhecimento adquirido e implementado até o momento, enquanto os erros de sintaxe são erros gerados na implementação computacional (GONZALEZ & DANKEL, 1993).

A Validação também é realizada informalmente durante o desenvolvimento do protótipo, porém é necessária que seja realizada uma Validação formal antes da entrega ao usuário final, no caso os técnicos do Laboratório de Desenvolvimento e Aprovação de Produtos da empresa-alvo.

A Validação consiste na manipulação do protótipo em seus diferentes estágios, pelo especialista do domínio do conhecimento. Nessa etapa busca-se um parecer do especialista quanto à validade e confiabilidade no desempenho do sistema. A Validação não implica simplesmente em testar as informações de saídas do sistema e identificar se estão corretas, mas se este obedece às necessidades e exigências do usuário. Segundo REY & BONILLO (2000), os métodos de Validação são freqüentemente classificados em dois grupos principais: qualitativo e quantitativo. Para esses autores, os métodos qualitativos empregam técnicas subjetivas para a comparação do desempenho do sistema, já os métodos quantitativos estão baseados no uso de medidas estatísticas. Os autores apresentam uma ferramenta para validação, denominada SHIVA, utilizando essas duas abordagens.

Decorrentes disso, no presente trabalho somente foram utilizados métodos qualitativos, apenas variando as características: formal ou informal. A Validação informal consiste em reuniões com um ou mais especialistas do domínio do conhecimento sempre que necessário, sem uma predefinição e muitas vezes focaliza pontos determinados do sistema. A Validação formal já requer um maior planejamento, geralmente acompanhada de questionários estruturados e uma análise mais detalhada do sistema vislumbrando vários aspectos (PASSOS, 2005).

5.3 Testes Alfa & Beta

É praticamente impossível prever como o usuário final irá realmente utilizar o programa. Instruções de uso podem ser mal interpretadas e saídas que parecem ser totalmente claras para quem a programou podem ser ininteligíveis para alguém no campo. Se o software foi desenvolvido como um produto para ser utilizado por muitos consumidores, é impraticável realizar os testes de aceitação formal com cada

um. Para descobrir erros que usuários finais possam se deparar, é utilizada a metodologia de testes α e β (CARD & GLASS, 1990).

Segundo, CARD & GLASS (1990), o α -teste é conduzido no ambiente de programação e realizado por um usuário. O software é utilizado em sua forma natural com o EC observando o usuário e registrando erros e problemas usuais. Esse tipo de teste é conduzido em um ambiente controlado.

O β -teste é submetido a mais de um usuário em diferentes locais. Ao contrário do α -teste, o EC geralmente não está presente. Por esta razão, o β -teste é uma aplicação mais realista do software em um ambiente que não pode ser manipulado pelo desenvolvedor. Como resultado para os problemas apontados durante esse teste, os engenheiros de software ou do conhecimento, em se tratando de SE, podem realizar as modificações e então preparar o lançamento do produto para toda a base de usuários (CARD & GLASS, 1990).

Seguindo a definição de um outro autor, tem-se que α -teste se refere ao testar uma aplicação quando o desenvolvedor (EC) está próximo à execução; pequenas alterações poderão ser realizadas como resultado dessa avaliação. Tipicamente essa avaliação é feita por usuários finais e não por programadores do sistema. O β -teste se refere ao teste que é realizado quando o desenvolvimento e os testes já estão essencialmente finalizados e *bugs* finais e problemas devem ser encontrados antes do lançamento da versão final. Da mesma forma, essa avaliação também é feita por usuários finais e não por programadores do sistema (FUTRELL & SHAFER, 2002).

A seguir são detalhadas as etapas de Verificação, a definição das métricas e a Validação do SE proposto.

5.4 Verificação do Sistema Especialista protótipo

Um objetivo da Verificação é garantir a existência de uma relação adequada entre as especificações do sistema e o que ele realmente faz. Idealmente as especificações refletem exatamente os requisitos do sistema, o que infelizmente nem sempre se verifica. A Verificação também garante que o sistema está livre de erros, introduzidos pelos desenvolvedores durante a implementação. A Verificação

de Sistemas Especialistas é, em geral, similar à verificação de programas convencionais (GONZALEZ & DANKEL, 1993).

No presente trabalho, as diversas verificações foram realizadas durante cada melhoria realizada no programa, uma vez que se optou por utilizar o modelo incremental nesse desenvolvimento, demonstrado na Fig. 3.6.

Em algumas ocasiões, a solução para uma determinada inconsistência observada através da Verificação levou várias semanas para ser corretamente implementada, tendo em vista algumas dificuldades computacionais com a programação do SE.

Os erros de semântica eram detectados através de comparações com as descrições obtidas na fase de Aquisição do Conhecimento, e assim que identificados eram discutidos com o Especialista, que quase sempre esteve disposto a sanar as dúvidas.

Os erros de sintaxe eram identificados e resolvidos durante a implementação de novos incrementos do protótipo. Para cada regra, classe, instância, função ou mensagem inseridas, o engenheiro do conhecimento executava o protótipo e capturava os erros. Os erros de sintaxe mais comuns formam erros de codificação em CLIPS e até mesmo simples erros de digitação.

Conforme já mencionado no item 4.4, ao se aplicar as três possibilidades de variação em quatro dos dez parâmetros avaliados no calorímetro, existem 81 possibilidades de saídas como resultado do SE. As três possibilidades de variação correspondem às situações nas quais os valores medidos são iguais, maiores ou menores que os valores estabelecidos como referência, ou seja, os valores de projeto.

Dessa forma, todas as possibilidades de saídas foram verificadas antes de submeter o SE à Validação pelo Especialista. A tabela completa utilizada nesta Verificação consta no Apêndice B.

5.5 Definição de Métricas para Validação

Como forma de definir uma métrica para avaliar se o SE atende às suas necessidades, discutiu-se largamente com o Especialista como seria adequado testar o protótipo de SE.

Constatou-se que, devido às limitações de interface gráfica do atual protótipo, seria considerado aceitável utilizar a tabela 3.2 para verificar as Saídas do SE.

Através desta Tabela é possível identificar se as informações apresentadas pelo software estão de acordo com o que foi estabelecido como saída adequada para o SE. Caso a saída seja divergente do que se apresenta nesta Tabela, há inconsistência no programa e as mesmas devem ser corrigidas antes de concluir a atual versão do Sistema Especialista.

5.6 Validação do Sistema Especialista protótipo

Após os passos acima mencionados, submeteu-se o protótipo de Sistema Especialista à análise do Especialista que participou do desenvolvimento. Conforme estabelecido como métrica, optou-se por utilizar uma tabela com as Saídas para cada variação de parâmetro como forma de submeter o protótipo à análise. A planilha utilizada encontra-se no Apêndice C, na Tabela C.3.

Nesta tabela pode-se observar que foram manipulados quatro parâmetros de medição, sendo eles: **capacidade de refrigeração, delta de superaquecimento, temperatura de evaporação e temperatura de condensação medidas**. A coluna “Possibilidade de Resultados Medidos” expressa as três possibilidades de resultados que cada parâmetro pode ter em comparação com os dados de projeto, ou seja, igual, maior ou menor valor. A coluna “Saída” expressa a frase que deverá ser escrita na interface com o usuário e corresponde à informação que contribuirá com o processo de desenvolvimento de produtos, uma vez que é a instrução necessária que recomenda uma ação.

Após a Validação pelo Especialista, submeteu-se esse protótipo à análise de um segundo Engenheiro de Refrigeração para que avaliasse a consistência das informações. O SE protótipo foi também submetido a dois técnicos do Laboratório de Desenvolvimento e Aprovação de Produtos da empresa-alvo para verificarem se a linguagem utilizada era facilmente compreendida, tendo seus resultados positivos em ambas as análises.

Após a análise dos resultados pelos técnicos e pelo Engenheiro de Refrigeração discutiram-se sugestões para a futura interface gráfica de forma a facilitar a entrada dos valores de projeto e a interpretação das saídas para os técnicos que operam os calorímetros.

Com base nessa Validação realizada com os técnicos do laboratório, principais usuários finais, estimou-se que o tempo de execução dos trabalhos realizados por técnicos pouco experientes poderá se igualar ao tempo de ensaio realizado por um muito experiente, a ser novamente testado após a implementação desse SE na funcionalidade do calorímetro da empresa-alvo.

Dessa forma o ciclo de desenvolvimento desse protótipo foi encerrado como trabalho de mestrado, sendo a sua continuidade objeto de uma eventual expansão em outro trabalho acadêmico ou através de um projeto da empresa-alvo com os devidos recursos alocados a ele.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

6.1 Introdução

Atualmente, questões relacionadas ao uso de sistemas computadorizados em centros de informação e bibliotecas invariavelmente tocam no assunto da “inteligência” desses sistemas. A preocupação com o nível de inteligência de, por exemplo, sistemas de recuperação e catalogação, tem se tornado possível principalmente porque o campo da Inteligência Artificial (IA) e, especialmente aquele ramo aplicado, conhecido como Sistemas Especialistas (SE) têm surgido como o segmento da área de computação que mais cresceu nesta última década (FURNIVAL, 1995).

Do exposto no tópico dos objetivos desse projeto, verifica-se que o mesmo tem plenas características de um projeto de Pesquisa Aplicada, pois suas atividades visam o aprofundamento e a aplicação de conhecimentos preexistentes, com vista ao aprimoramento do processo de desenvolvimento de condicionadores de ar domésticos na indústria.

Para o sucesso do desenvolvimento de um Sistema Especialista é fundamental prever a adequada alocação de recursos tanto pela organização que detém o conhecimento e onde o sistema será aplicado, quanto pela equipe responsável pelo desenvolvimento.

O trabalho aqui apresentado procurou demonstrar como esta técnica pode ser utilizada em uma aplicação importante no meio industrial, desenvolvendo um sistema protótipo que abre caminho para futuras aplicações.

A seguir serão comentados alguns aspectos importantes sobre o desenvolvimento do trabalho, assim como as contribuições obtidas com este projeto e trabalhos futuros que podem ser realizados a partir do que foi aqui demonstrado.

6.2 Contribuições do trabalho

Durante o aprendizado sobre Sistemas Especialistas, foi identificada que a utilização de um SE para apoio à fase de ensaios de condicionadores de ar na empresa-alvo seria de grande contribuição para a mesma. Antes de iniciar o desenvolvimento, esta aplicação foi largamente discutida com o líder do Laboratório de Desenvolvimento e Aprovação de Produtos da referida empresa, assim como com o Especialista envolvido no trabalho.

A grande vantagem deste SE é contribuir minimizando as dificuldades encontradas pelos técnicos durante a fase de determinação de carga de fluido refrigerante e dimensão de tubo capilar em sistemas de refrigeração, mais especificamente em condicionadores de ar domésticos. Muitas vezes os técnicos não dispõem do completo domínio técnico e conhecimento em sistemas de refrigeração e não sabem que ação corretiva tomar para ajustar tal sistema, o que gera gastos com o longo tempo de desenvolvimento e os erros inerentes ao processo de aprendizagem.

Muitas vezes também, se faz necessário concluir os ensaios de desenvolvimento com base em prazos para início de produção muito apertados, o que impossibilita que um técnico com pouca experiência possa levar várias semanas na tentativa de otimizar um sistema de refrigeração.

Não apenas a redução no tempo de ensaio é o motivador desse trabalho, mas também o aumento da disponibilidade do conhecimento, tornando acessível a todos

os operadores, tanto atuais como futuros, a heurística disponível nesse domínio de conhecimento.

6.3 Comentários sobre o desenvolvimento do protótipo

Podemos sintetizar as fases do desenvolvimento da modelagem através das seguintes tópicos:

- ❖ Na etapa de **Revisão Bibliográfica** foi identificada a necessidade de realizar um vasto levantamento sobre Sistemas Especialistas, tanto aplicados ao mesmo domínio do conhecimento em questão como também de diferentes naturezas, uma vez que servem para ilustrar e complementar o aprendizado. Os detalhes dos Sistemas Especialistas aplicados a Refrigeração encontram-se no item 3.6. De forma a tornar o trabalho mais completo optou-se também por realizar uma recapitulação em Psicometria e Refrigeração, onde os detalhes estão nos capítulos 2 e 3 deste material.

- ❖ Na etapa de **Aquisição do Conhecimento**, detalhada no capítulo 3, foram realizadas diversas reuniões com o Especialista. Um fator positivo observado nessa fase foi que a aproximação física entre o Engenheiro do Conhecimento e o Especialista, por trabalharem na mesma área corporativa, tornou essa etapa mais produtiva e agilizada. Isso possibilitou uma boa interação e troca de informações sempre que necessário. É importante ressaltar também que se essa etapa não for realizada com muito critério e atenção, as informações podem não ser adequadamente transferidas para o EC, gerando resultados errôneos após a implementação computacional.

- ❖ A etapa de **Representação do Conhecimento** foi a qual se buscou representar em linguagem computacional o conhecimento adquirido na fase anterior, utilizando regras de produção e orientação a objetos. Nessa etapa é onde se

realizou a definição da estrutura do SE, ou seja, como as informações vão estar alocadas na Base de Conhecimento, a definição das classes e das instâncias. Os detalhes dessa fase estão descritos no capítulo 4, item 4.2.

- ❖ A etapa de **Implementação Computacional** foi a mais longa de todo o processo. As maiores dificuldades encontradas foram de ordem computacional e envolveram aprendizados sobre o uso da ferramenta, o CLIPS, e as peculiaridades da programação de Sistemas Especialistas. Foram utilizados outros SEs de modo a entender a sua lógica e sanar as principais dúvidas durante a implementação. A evolução das versões do SE estão apresentadas no Quadro 4.3, no capítulo 4 deste trabalho.

- ❖ A etapa de **Verificação do Protótipo** foi realizada de modo a garantir a existência de uma relação adequada entre as especificações do sistema e o que ele realmente executa, assim como garantir que o sistema esteja livre de erros de sintaxe e de semântica. Os detalhes dessa etapa e as tabelas utilizadas para realizar a Verificação constam no item 5.4 e no Apêndice B, respectivamente.

- ❖ Através da etapa e **Validação do protótipo** buscou-se checar a coerência técnica quanto a capacidade de apoio à tomada de decisão do Sistema utilizando testes submetidos ao Especialista, a um outro Engenheiro de Refrigeração e aos técnicos desenvolvedores de produtos da empresa-alvo. Os detalhes dessa etapa e as tabelas utilizadas para realizar a Validação constam no item 5.5 e 5.6 e no Apêndice C, respectivamente.

6.4 Recomendações para Trabalhos Futuros

Esse Sistema Especialista protótipo se aplica a ensaios de determinação de quantidade de refrigerante (conhecido como *carga de refrigerante*) e dimensões do tubo capilar para condicionadores de ar do tipo RAC e Split, de diversas faixas de capacidade de refrigeração e também para produtos que operam com ciclo frio ou reverso (modo de aquecimento). De forma a exemplificar a aplicação desse SE protótipo, optou-se por utilizar um produto que é largamente produzido na empresa-alvo. Foram selecionados os parâmetros de um condicionador de ar do tipo RAC, que opera exclusivamente com ciclo frio e 10.000 Btu/h de capacidade de refrigeração.

Conforme já foi abordado ao longo do capítulo 3, foi recomendado pelo Especialista que não estivesse inserido na Base de Conhecimento os valores de referência para projeto (demonstrados nas Tabelas 3.3 a 3.6), mas sim aptos a serem incluídos pelo Engenheiro de Refrigeração que projetou o produto, uma vez que há sutilezas envolvidas no projeto de sistemas de refrigeração que visam justamente alterar estes valores a cada novo projeto de produto. Há que se ressaltar também que estes valores de projeto diferem entre fabricantes e são inerentes às características de cada trocador de calor e às tecnologias envolvidas na fabricação destes.

Outro motivo pelo qual se optou por não inserir os dados de projeto dentro da Base de Conhecimento do SE é que há atualmente diversos softwares para projeto de sistemas de refrigeração. O objetivo deste SE é atuar como apoio na fase de ensaios e não como software de projeto de sistemas de refrigeração. Dessa forma, fica a cargo do Engenheiro de Refrigeração, que possui domínio para projetar um novo sistema, que determine estes parâmetros dentro do SE a cada nova solicitação de ensaio feita ao laboratório.

Desta forma, um ponto de melhoria a ser realizado nesse protótipo é o desenvolvimento de uma interface gráfica para a inserção dos dados pelo Engenheiro de Refrigeração e outra para apresentar os resultados aos usuários do SE – os técnicos do laboratório. Como forma de se obter uma interface amigável, sugere-se o envolvimento dos usuários finais quando na elaboração da mesma de

modo a garantir que os termos e a forma de apresentar estão de acordo com suas efetivas necessidades.

Além da interface gráfica, outro ponto de melhoria do Sistema Especialista protótipo seria estabelecer uma margem de erro aceitável para as comparações de valores medidos e de projeto. Atualmente, o SE possui condicionais de igualdade em diversas regras e, para ser mais realista, poderia ser acrescentado um erro aceitável de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ entre os valores medidos e os de projeto utilizados na comparação, pois é o erro das medições do calorímetro atualmente.

Após essas melhorias sugeridas para os trabalhos futuros, esse protótipo tem plena capacidade de se tornar um software industrial com reais aplicações na empresa-alvo.

6.5 Comentários Finais

A aplicação de ferramentas computacionais tem contribuído para o desenvolvimento da engenharia através de sistemas de auxílio ao projeto, a maioria destas ferramentas sendo aplicadas na fase de projeto. Existem poucas ferramentas aplicadas nas tarefas que exigem conhecimento especializado, como por exemplo, a parte de ensaios de desenvolvimento de sistemas de refrigeração.

A Inteligência Artificial fornece técnicas que possibilitam que ferramentas inteligentes passem a auxiliar o engenheiro, de forma a dotá-lo de uma maior capacidade de desenvolvimento, acelerando todo o processo dentro das indústrias.

Pelo desenvolvimento desse trabalho procurou-se demonstrar o potencial da utilização da Inteligência Artificial, mais precisamente de Sistemas Especialistas, na criação de ferramentas inteligentes de auxílio aos ensaios de sistemas de refrigeração em geral.

Os resultados obtidos mostram que com a continuidade no desenvolvimento do protótipo pode-se utilizá-lo como uma importante ferramenta no auxílio ao projeto, possibilitando que técnicos com pouca experiência em sistemas de refrigeração

possam obter resultados tão rapidamente quanto os técnicos com mais experiência. Não apenas a redução no tempo de ensaio é o motivador deste trabalho, mas também o aumento da disponibilidade do conhecimento, tornando acessível a todos os operadores, tanto atuais como futuros, a heurística disponível nesse domínio de conhecimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, **Handbook of Fundamentals**, EUA, 1997

ALVES, G. D., **Sistema especialista protótipo para diagnóstico de falhas em um sistema hidráulico naval**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

BALACHANDRA, R., An expert system for new product development projects. **Journal: Industrial Management & Data Systems**, MCB UP Ltd, vol. 100. 2000, Pág. 317 – 324. Disponível em <<http://www.emeraldinsight.com/10.1108/02635570010291784>>. Acesso em: 01/Out/08

BERRIOS, R. N., CIPRIANO, F., PAREDES, A., Expert System fault detection and diagnosis for the refrigeration process of a hydraulic power plant. **Control Conference 2008** - Publication Date: 16-18 July 2008 On page(s): 122-126. Disponível em < http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4605618 > acessado em 12 setembro 2008.

BEZERRA, E., **Princípios de Análise e Projeto de Sistemas com UML**. Editora CAMPUS, 2002.

BITTENCOURT, G., **Inteligência Artificial – Ferramentas e Teorias**, Editora da UFSC, 3ª Ed., Florianópolis, 2006.

BORGES, J. B., **Desenvolvimento de Protótipo de Sistema Especialista para Projeto Pneumático**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

CAMEJO, P. J., **An Expert System for the Design of Heating, Ventilating, and air-conditioning Systems**. Master's thesis, Purdue Univ. Air Force Inst. of Tech., Wright-Patterson AFB, OH, 1989.

CARD, D. N.; GLASS, R. L. **Measuring Software Design Quality**. Prentice Hall, 1990.

CLIPS: A Tool for Building Expert Systems. Disponível em: <<http://www.ghg.net/clips/CLIPS.html>>. Acesso em: 6 out. 2004.

DOSSAT, R.J., **Principles of Refrigeration**. Ed. Hemus, 2004.

DURKIN, J., **Expert Systems: design and development**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1994.

FUTRELL, R. T. & SHAFER, L., **Quality Software Project Management**. Prentice Hall PTR, 2002.

FURNIVAL, A. C., Delineando as limitações: sistemas especialistas e conhecimento tácito - **Ciência da Informação**. Vol 24, número 2, 1995.

GIARRATANO, J. C., **CLIPS User's Guide**. Vol I – Basic Programming Guide, 2002.

GIARRATANO, J. & RILEY, G., **Expert Systems: Principles and Programming**. 4th Edition, Thomson Course Technology, Boston, 2005.

GONZALEZ, A. J. & DANKEL, D. D., **The Engineering of Knowledge-Based Systems – Theory and Practice**. Prentice-Hall, Inc., 1993.

GROSSMANN Jr., H., **Um Sistema Especialista para Auxílio ao Diagnóstico de Problemas em Computadores Utilizando Raciocínio Baseado em Casos**. 2002. Dissertação de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2002.

HU, Q., SO, A. T P, TSE, W. L. and REN, Q., Development of ANN-based models to predict the static response and dynamic response of a heat exchanger in a real MVAC system. **Journal of. Physics: Conference Series**, 2005. Disponível em: <<http://www.iop.org/EJ/abstract/1742-6596/23/1/013>>. Acesso em: 12 setembro 2008.

IGNIZIO, James P. **Introduction to Expert Systems – The development Implementation of Rule-Based Expert Systems**. McGraw-Hill, 1991.

JAFAR, M.J.; BAHILL, A.T.; OSBORN, D., A Knowledge-Based System for HVAC. **ASHRAE, J. Am. Soc. Heating, Refrigeration, and Air Conditioning**, Vol. 33, No. 1, Jan. 1991, pp. 20-26.

LIEBOWITZ, J., **Introduction to Expert Systems**. Santa Cruz, California: Mitchell Publishing, 1988.

MOHIUDDIN, T.; BITTER, R.; NAWROCKI, M., **LabVIEW**. CRC Press, 2006.

PASSOS, A., **Sistema Especialista Aplicado à Assistência Técnica: Estudo de Caso em uma Organização Fabricante de Produtos de Telecomunicações**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

_____, **Refrigeração I: ciclo, fluido, processo de compressão**. Disponível em: < <http://www.mspc.eng.br/fldetc/refrig1.asp#circuit>>. Acesso em: 02 maio 2007.

REY, E. M.; BONILLO, M., **Validation of intelligent systems: a critical study and a tool Expert Systems with Applications**. 18, 1-16, 2000.

RIBEIRO, H. C. e S., **Introdução aos Sistemas Especialistas**. Rio de Janeiro Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1987.

RUSSELL S.; NORVIG P., **Inteligência Artificial**. Editora Campus, 2004.

SILVA, J. C., **EMC6607 - Sistemas Especialistas aplicados à Engenharia** curso de pós-graduação 2º trimestre 2006. Notas de Aula.

SILVA, J. C., **Expert System Prototype for Hydraulic System Design Focusing on Concurrent Engineering Aspects**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

STOECKER, W. F; JONES, J. W., **Refrigeração e Ar Condicionado**. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1985.

SURYANARAYANA N. V.; ARICI Ö, **Design & Simulation of Thermal Systems**. Ed. McGraw-Hill Professional, 2002.

TASSOU S. A; GRACE I. N. Refrigeration fault diagnosis system. **International Journal of Refrigeration**, Vol. 28, Issue 5, August 2005, Pages 680-688. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V4R-4FH0DB7-1&_user=10&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=c0398b9d236897b6cf3c1d0b7242e11e>, Acesso em 12 setembro 2008.

WATERMAN, D. A., **A Guide to Expert Systems**. Addison - Wesley Publishing Company, USA, 1986.

ZIMMERMANN, M. A., **Sistema Especialista Protótipo para Auxílio na Seleção de Bombas Hidrostáticas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Regras

Conforme dissertado no capítulo 3, a fase de Aquisição de Conhecimentos foi dividida em três etapas, sendo elas: a **definição das saídas do SE**, exposto na Tabela 3.2; a **definição das entradas do SE**, exposto no Quadro 3.1; e a **definição das Regras do SE**, ou seja, a conexão entre as saídas e as entradas do sistema.

As Regras representam o núcleo do conhecimento do Especialista e resultam das condicionais por ele geradas. Através das informações nelas inseridas, é possível gerar as devidas recomendações aos usuários do SE que, muitas vezes, têm dificuldades em saber que ação tomar para ajustar o sistema de refrigeração de modo a obter os valores alvo estabelecidos para o produto em desenvolvimento da maneira mais eficaz.

Essas regras são válidas para o desenvolvimento de um condicionador de ar do tipo RAC ou Split, uma vez estabelecidos os devidos parâmetros de projeto para cada tipo de produto, conforme abordado no capítulo 3. Embora cada tipo de produto tenha suas particularidades, que dependem das características dos componentes selecionados, a lógica de raciocínio e as ações a serem tomadas durante a execução dos ensaios de desenvolvimento são as mesmas para todos os tipos de condicionadores de ar.

Segue abaixo a listagem das regras, expressas em condicionais pelo Especialista:

REGRA 1:

Iniciar o Sistema Especialista

REGRA2:

SE “o delta de temperatura de superaquecimento medido for IGUAL a de projeto”

ENTÃO “ verificar vazão pelo capilar através da medição das temperaturas de evaporação e condensação”

REGRA 3:

SE “o delta de temperatura de superaquecimento medido for MAIOR que a de projeto”

ENTÃO “aumentar a carga de refrigerante atual em 20g e executar um novo ensaio”

REGRA 4:

SE “o delta de temperatura de superaquecimento medido for MENOR que de projeto”

ENTÃO “reduzir a carga de refrigerante atual em 20g e executar um novo ensaio”

REGRA 5:

SE “a temperatura de evaporação medida for IGUAL a de projeto

E a temperatura de condensação medida for IGUAL a de projeto”

ENTÃO “checar a capacidade de refrigeração do produto”

REGRA 6:

SE “a temperatura de evaporação medida for MAIOR que a de projeto

E a temperatura de condensação medida for MENOR ou IGUAL a de projeto”

ENTÃO “reduzir o diâmetro atual do capilar em 0,2mm e executar um novo ensaio”

REGRA 7:

SE “a temperatura de evaporação medida for MENOR que a de projeto

ENTÃO “aumentar o diâmetro atual do capilar em 0,2mm e executar um novo ensaio”

REGRA 8:

SE “a temperatura de evaporação medida for MAIOR que a de projeto.

E a temperatura de condensação medida for MAIOR que a de projeto”

ENTÃO “solicitar a intervenção do engenheiro para reprojeter a área do condensador”

REGRA 9:

SE “a capacidade de refrigeração medida for MAIOR ou IGUAL a capacidade de projeto”

ENTÃO “escrever mensagem de saída ‘produto aprovado’ e gerar relatório de ensaio.”

REGRA 10:

SE “a capacidade de refrigeração medida for MENOR que a capacidade de projeto”

ENTÃO “escrever mensagem de saída ‘produto reprovado’, apesar dos ajustes feitos, e gerar relatório de ensaio.”

REGRA 11:

Executar um novo ensaio

Posteriormente, essas regras foram escritas em linguagem computacional e, juntamente com o Especialista, foi elaborado o encadeamento entre elas, conforme é demonstrado na Figura A.1. O encadeamento é quem determina o caminho que o SE irá percorrer de modo a obter uma informação adequada ao usuário do Sistema. Ele representa a forma de raciocínio do Especialista ao tentar solucionar um problema desta natureza.

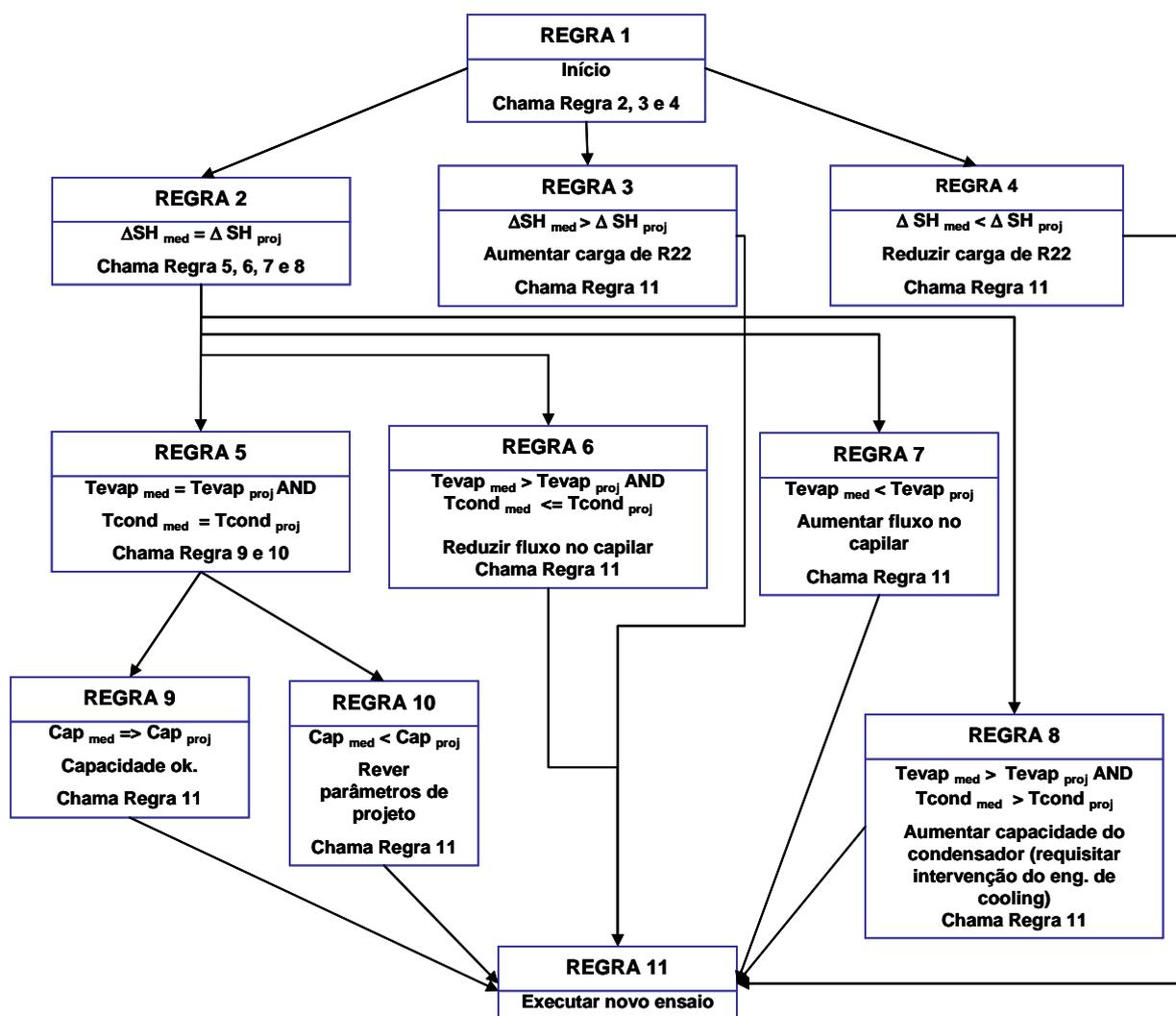


Figura A.1 – Encadeamento entre as regras

APÊNDICE B

Verificação

Devido ao fato do SE protótipo ainda não possuir uma interface gráfica, utilizou-se uma planilha para realizar a Verificação. Através dessa ferramenta, foi possível avaliar todas as 81 possibilidades de resultados apresentados pelo SE protótipo.

Para realizar esta Verificação foram utilizados os seguintes valores de projeto, conforme consta na Tabela B.1

Tabela B.1 – Valores de projeto utilizados na Verificação

	Valores de Projeto
	ENTRADAS
Capacidade_proj (Btu/h)	10.000
DeltaSH_proj (°C)	10
TempEvap_proj (°C)	9
TempCond_proj (°C)	45

Conforme detalhado no item 5.4 há possibilidade dos valores medidos serem iguais, maiores ou menores do que com os valores estipulados durante o projeto de um sistema de refrigeração. Com base nisso, foi determinada uma nomenclatura conforme segue na Tabela B.2

Tabela B.2 – Nomenclatura dos valores medidos utilizada na Verificação

Valor medido MENOR que de projeto	-
Valor medido IGUAL ao de projeto	0
Valor medido MAIOR que de projeto	+

APÊNDICE C

Validação

Devido ao fato do SE protótipo ainda não possuir uma interface gráfica, foi decidido em comum acordo com o Especialista que utilizasse uma planilha para realizar a Validação do SE. Através desta ferramenta, foi possível avaliar se as saídas do SE estão coerentes e a sua funcionalidade na orientação ao técnico – usuário final do SE.

Os valores de projeto utilizados para Validação constam na Tabela C.1 e são referentes a um produto RAC 10.000 Btu/h de capacidade de refrigeração e com ciclo frio.

Tabela C.1 – Valores de projeto utilizado para realizar a Validação dos Resultados do SE

	Valores de Projeto
	ENTRADAS
Capacidade_proj (Btu/h)	10.000
DeltaSH_proj (°C)	10
TempEvap_proj (°C)	9
TempCond_proj (°C)	45
Vazo Ar_proj (m3/h)	230
DiamCapilar (mm)	1
CompCapilar (mm)	1000
MassarR22_inicial (g)	500

Foi utilizada uma nomenclatura para comparar os valores medidos com os valores estipulados no projeto, conforme a Tabela C.2.

Tabela C.2 – Nomenclatura utilizada para a Validação dos Resultados do SE

Valor medido MENOR que de projeto	<
Valor medido IGUAL ao de projeto	=
Valor medido MAIOR que de projeto	>

Na Tabela C2, onde consta “<” significa que o valor obtido na medição é **menor** que os valores estipulados no projeto. Onde consta “=” significa que o valor medido é **igual** ao de projeto; e onde consta “>” significa que o valor obtido na medição é **maior** que os valores determinados no projeto do sistema de refrigeração.

Através da Tabela C.3, checkou-se a forma e o conteúdo das recomendações de saída do Sistema Especialista protótipo e mostrou-se de acordo com as indicações que um Especialista sugeriria em face de situações análogas às apresentadas.

Tabela C.3 – Ferramenta de apoio para realizar a Validação dos Resultados do SE

PARÂMETROS	Possibilidades de resultados medidos	SAÍDAS
Capacidade_med	>	<p>"Capacidade medida 10500 Btu/h = ou > que a capacidade de projeto 10.000 Btu/h!"</p> <p>"Gerar relatório e enviar ao solicitante do teste."</p> <p>"Deseja voltar ao menu inicial para efetuar um novo teste? s/n"</p>
DeltaSH_med	=	
TempEvap_med	=	
TempCond_med	=	
Capacidade_med	>	<p>"A carga inicial de R22 era de 500g. Esta carga de R22 deve ser aumentada."</p> <p>"A nova carga de R22 deverá ser de 520g."</p> <p>"A razão desta recomendação é que foi constatado que a temperatura de SH medida 11C está > que a temperatura de SH de projeto 10C."</p> <p>"Executar novo teste com a nova carga de gas!"</p>
DeltaSH_med	>	
TempEvap_med	>	
TempCond_med	>	
Capacidade_med	=	<p>"A carga inicial de R22 era de 500g."</p> <p>"Esta carga de R22 deve ser reduzida. A nova carga de R22 deverá ser de 480g."</p> <p>"A razão desta recomendação é que foi constatado que a temperatura medida 9C está < que a temperatura de projeto " 10C."</p> <p>"Executar novo teste com a nova carga de gas!"</p>
DeltaSH_med	=	
TempEvap_med	<	
TempCond_med	<	
Capacidade_med	<	<p>"Solicitar novo dimensionamento do sistema pelo Eng. Refrigeração para aumentar a capacidade do condensador (nova densidade de aletas, área, rotação ventilador)"</p> <p>"Deseja voltar ao menu principal para efetuar um novo teste? s/n"</p>
DeltaSH_med	=	
TempEvap_med	>	
TempCond_med	>	
Capacidade_med	<	<p>" Reduzir fluxo no capilar reduzindo o seu diâmetro. O diâmetro atual de 1mm deve ser substituído por um de 0.8mm."</p> <p>"A razão desta recomendação é que foi constatado que a temperatura de evaporação medida 10°C está > que a temperatura de evaporação de projeto 9°C e a temperatura de condensação medida 45°C está < ou = a temperatura de condensação de projeto 45°C."</p> <p>"Executar novo teste com o novo diâmetro de capilar!"</p>
DeltaSH_med	=	
TempEvap_med	>	
TempCond_med	=	
Capacidade_med	<	<p>" Aumentar fluxo no capilar aumentando o seu diametro."</p> <p>"O diametro autal de 1mm deve ser substituído por um de 1.2mm".</p> <p>"A razão desta recomendação é que foi constatado que a temperatura de evaporação medida 8C está < que a temperatura de evaporação de projeto 9C."</p> <p>"Executar novo teste com o novo diâmetro e capilar!"</p>
DeltaSH_med	=	
TempEvap_med	<	
TempCond_med	<	
Capacidade_med	<	<p>"A capacidade medida 9500Btu/h está abaixo do valor de projeto 10.000Btu/h."</p> <p>"Contactar o Eng. de Cooling para que os parâmetros de projeto sejam revistos. "</p> <p>"Deseja voltar ao menu inicial para efetuar um novo testes? s/n"</p>
DeltaSH_med	=	
TempEvap_med	=	
TempCond_med	=	

APÊNDICE D

Histórico dos Condicionadores de Ar¹⁴

Os aparelhos de ar condicionado atuais, que são utilizados para controlar a temperatura e a umidade de ambientes fechados, provêm da criação de um processo mecânico para condicionar o ar, criado em 1902, pelo engenheiro norte-americano Willis Havilland Carrier (1876-1950). Filho de um fazendeiro, sua mãe era responsável por consertar máquinas de costura, relógios e outros aparatos da fazenda, habilidade que Carrier realmente herdou. De sua mãe também herdou o gosto pela matemática e pela solução de problemas desde a infância.

Essa tecnologia teve início, na época, a partir de um problema aparentemente insolúvel pelo qual uma empresa de Nova York passava - a *Sacket-Wilhems Lithographing*, uma gráfica em Brooklyn. Ao realizar impressões em papel, o clima muito quente de verão e a grande umidade do ar faziam com que o papel absorvesse essa umidade de forma que as impressões saíssem borradas e fora de foco. A causa deste problema foi rapidamente identificada por Carrier, aos 25 anos, recém-formado em engenharia mecânica, onde ele percebeu que as variações de temperatura e umidade faziam o papel expandir ou contrair o suficiente para desalinhar as impressões de tinta. Ele determinou qual deveria ser o nível ideal de umidade para impressão e calculou a temperatura exata que manteria a umidade neste nível requerido.

Ao observar um denso nevoeiro que cobria a estação ferroviária de Pittsburgh, nos Estados Unidos, enquanto aguardava o trem, Carrier entendeu o fenômeno do ponto de orvalho. Em 1902 ele desenvolveu um sistema de condicionador para controlar a temperatura e a umidade utilizando um bocal de spray de inseticida. O sistema funcionou - foi o primeiro processo de condicionamento de ar feito mecanicamente. Este equipamento foi patenteado nos Estados Unidos com o título "*Apparatus for Treating Air*" sob o registro de número 808897, em 1906. Utilizando serpentinas de tubos resfriados foi possível controlar a temperatura e obter uma umidade relativa abaixo de 55%. Através do ajuste do

¹⁴ Adaptado de http://www.air-conditioners-and-heaters.com/willis_carrier.htm

movimento do ar e do nível de temperatura foi possível determinar o tamanho e a capacidade da unidade para adequar às aplicações.

Em 1914, Carrier desenvolveu um aparelho para aplicação residencial, que era muito maior e mais simples do que o ar condicionado de hoje em dia, e também desenhou o primeiro condicionador de ar para hospitais, que foi desenvolvido com o objetivo de aumentar a umidade de um berçário (para bebês nascidos prematuramente), no Allegheny Hospital de Pittsburg.

A primeira instalação de condicionador de ar residencial aconteceu na mansão de Charles G. Gates em 1914, em Minneapolis. Carrier desenhou o aparelho medindo 6 metros de profundidade, 1,8 metros de largura, 2,1 metros de altura, muito maior e menos potente que os atuais aparelhos.

O sucesso e a expansão do invento obrigaram Carrier a preparar documentos bibliográficos que pudessem ser consultados por técnicos. Essas informações tornaram-se referência para estudos de refrigeração e climatização em todo o mundo. Em 1915 montou, com mais seis sócios, a empresa *Carrier Engineering Corporation*.

A partir desta experiência, o sistema foi adotado por muitas indústrias de diversos segmentos, como têxtil, indústrias de papel, farmacêuticos, tabaco e alguns estabelecimentos comerciais.

Carrier também equipou a câmara dos deputados dos EUA com condicionadores de ar em 1928, o Senado Americano em 1929 e os escritórios executivos da Casa Branca em 1930, tornando mais agradável o trabalho durante o verão quente e úmido de Washington. Os vagões da ferrovia B&O foram os primeiros veículos de passageiros a possuírem condicionadores de ar, em 1930.

Nos anos 20, o ar condicionado tomou-se mais acessível ao público em muitos prédios públicos. O aparelho teve sua primeira aparição em público em 1922, no *Grauman's Metropolitan Theatre*, em Los Angeles. O condicionador de ar também ajudou a indústria cinematográfica, pois, nos meses de verão, a frequência dos cinemas caía muito e várias salas fechavam nesse período.

Também nos anos 30, Willis Carrier desenvolveu um sistema que viabilizou o ar condicionado em arranha-céus. A distribuição do ar em alta velocidade através de dutos *Weathermaster*, criada em 1939, economizava mais espaço do que os sistemas utilizados na época. Nos anos 50, os modelos residenciais de ar condicionado começaram a ser produzidos em massa. Nesta época, em 1950, Willis Carrier morreu.

Em 1952, a Carrier desenvolveu a primeira produção em série de unidades centrais de condicionadores de ar para residências. O estoque foi vendido em duas semanas.