

Altemir Palmede Pedroso

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ESPECIALISTA  
PROTÓTIPO PARA SUPORTE AO DIAGNÓSTICO DE  
PROBLEMAS DE BAIXO DESEMPENHO DE  
COMPRESSORES HERMÉTICOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Jonny Carlos da Silva

Florianópolis  
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Pedroso, Altemir Palmede

Desenvolvimento de um Sistema Especialista Protótipo para Suporte ao Diagnóstico de Problemas de Baixo Desempenho de Compressores Herméticos / Altemir Palmede Pedroso ; orientador, Jonny Carlos da Silva – Florianópolis, SC, 2013.

155 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Projeto de Sistemas Mecânicos. 3. Sistemas Especialistas. 4. Compressores Herméticos. 5. Diagnóstico de Problemas. I. Silva, Jonny Carlos da. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Altemir Palmede Pedroso

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ESPECIALISTA  
PROTÓTIPO PARA SUPORTE AO DIAGNÓSTICO DE PROBLEMAS  
DE BAIXO DESEMPENHO DE COMPRESSORES HERMÉTICOS**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de **Mestre em Engenharia**, especialidade Engenharia Mecânica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 14 de março de 2013.

---

Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng.  
Orientador

---

Prof. Júlio Cesar Passos, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Nelson Back, Ph. D.

---

Prof. Jader Riso Barbosa Junior, Ph. D.

---

Prof. Victor Juliano De Negri, Dr. Eng.



Este trabalho é dedicado à minha  
esposa Daniela e aos meus filhos  
Pedro e Laura.

## **AGRADECIMENTOS**

Os meus sinceros agradecimentos àqueles que fazem o ensino público na UFSC, que mesmo com todas as dificuldades, sabem dignificar sua profissão, promovendo um ensino de qualidade.

Muito obrigado ao Professor Jonny, pelos conhecimentos transmitidos, dedicação e objetividade nas análises, correções e discussões.

Agradeço também à Whirlpool - Unidade de Compressores que forneceu todo o apoio e suporte necessários para realização desta dissertação.

Obrigado aos colegas e amigos de trabalho que sempre me incentivaram e participaram em várias discussões e avaliações, sugerindo, corrigindo, criticando e orientando vários temas apresentados neste trabalho.

Não poderia deixar de agradecer os colegas de trabalho que fizeram a validação do Sistema Especialista. São eles Eduardo Luiz Rosário, Luciano Muller, Laerte Campestrini e Xu Jianwen.

Agradecimento especial para Daniela, que sempre esteve presente em todos os momentos deste trabalho.

O que nos define é o som que somos capazes de produzir e não aquele que somos obrigados a ouvir (Kleber Mendonça Filho).

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>11</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>12</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....</b>	<b>15</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>16</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>17</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>19</b>
1.1 ASPECTOS GERAIS .....	19
1.2 PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO NA EMPRESA-ALVO .....	21
1.3 CONTEXTO DO TRABALHO.....	23
1.4 OBJETIVOS GERAIS .....	25
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	26
<b>2. COMPRESSORES HERMÉTICOS E SUBSISTEMAS.....</b>	<b>27</b>
2.1 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO A VAPOR .....	27
2.2 TIPOS DE COMPRESSORES .....	30
2.3 DESEMPENHO DO COMPRESSOR HERMÉTICO .....	34
2.3.1 <i>Capacidade de refrigeração, consumo de potência e COP.....</i>	<i>35</i>
2.3.2 <i>Nível de potência sonora (ruído).....</i>	<i>36</i>
2.3.3 <i>Mínima tensão de partida.....</i>	<i>38</i>
2.4 DECOMPOSIÇÃO FUNCIONAL E SUBSISTEMAS.....	38
2.4.1 <i>Motor elétrico .....</i>	<i>41</i>
2.4.2 <i>Componentes elétricos para partida e proteção.....</i>	<i>41</i>
2.4.3 <i>Kit mecânico.....</i>	<i>43</i>
2.4.4 <i>Sistema de sucção .....</i>	<i>44</i>
2.4.5 <i>Câmara de compressão.....</i>	<i>45</i>
2.4.6 <i>Sistema de descarga.....</i>	<i>46</i>
2.4.7 <i>Carcaça e suspensão .....</i>	<i>46</i>
<b>3. SISTEMAS ESPECIALISTAS DESENVOLVIDOS NO CONTEXTO DESTES TRABALHO.....</b>	<b>49</b>
3.1 DIAGNÓSTICO DE PROBLEMAS DE DESEMPENHO EM COMPRESSORES.....	49

3.2 CONCEITOS BÁSICOS DE SISTEMAS ESPECIALISTAS .....	50
3.3 SISTEMAS ESPECIALISTAS E MÉTODOS DE DIAGNÓSTICOS DE FALHAS CORRELATOS COM ESTE TRABALHO .....	52
3.4 PROTÓTIPO INICIAL DESENVOLVIDO COMO ESTUDO DE VIABILIDADE .....	59
<b>4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA ESPECIALISTA .....</b>	<b>63</b>
4.1 ESCOPO, ENTRADAS E SAÍDAS DO SE .....	63
4.2 AQUISIÇÃO DO CONHECIMENTO .....	69
4.3 REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO .....	76
4.4 IMPLEMENTAÇÃO .....	78
4.5 RESULTADOS OBTIDOS .....	81
<b>5. VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO SE .....</b>	<b>87</b>
5.1 ALGUNS CONCEITOS DE VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO .....	87
5.2 VERIFICAÇÃO DO SE .....	89
5.3 VALIDAÇÃO DO SE .....	91
5.3.1 Testes de Validação do SE.....	91
5.3.2 Utilidade e Potencialidade do SE .....	94
5.4 AVALIAÇÃO DO SE PELOS USUÁRIOS FINAIS .....	99
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>101</b>
6.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES.....	101
6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	103
6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	104
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>106</b>
<b>APÊNDICE A– DIAGRAMAS DE CAUSA-EFEITO PARA OS PROBLEMAS DE CAPACIDADE DE REFRIGERAÇÃO .....</b>	<b>111</b>
<b>APÊNDICE B– DIAGRAMAS DE CAUSA-EFEITO PARA OS PROBLEMAS DE CONSUMO DE POTÊNCIA .....</b>	<b>113</b>
<b>APÊNDICE C– DIAGRAMA DE CAUSA-EFEITO PARA OS PROBLEMAS DE POTÊNCIA SONORA (RUÍDO) .....</b>	<b>115</b>
<b>APÊNDICE D– DIAGRAMAS DE CAUSA-EFEITO PARA OS PROBLEMAS DE MÍNIMA TENSÃO DE PARTIDA.....</b>	<b>116</b>
<b>APÊNDICE E– FTAS PARA CAPACIDADE DE REFRIGERAÇÃO .....</b>	<b>118</b>
<b>APÊNDICE F– FTAS PARA O CONSUMO DE POTÊNCIA.....</b>	<b>127</b>

APÊNDICE G– FTA PARA RUÍDO ACIMA DO ESPECIFICADO .....	134
APÊNDICE H– FTAS PARA MÍNIMA TENSÃO DE PARTIDA.....	140
APÊNDICE I– ENTRADA DE DADOS PARA VERIFICAÇÃO DO SE.....	148
APÊNDICE J– DIAGRAMA FUNCIONAL DO SE .....	151
APÊNDICE K– EXEMPLO DE RELATÓRIO DE SAÍDA DO SE .....	152

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Temperaturas padronizadas nas condições ASHRAE e CECOMAF. ....	36
Tabela 3.1- Dados de entrada para capacidade e consumo. Fonte: Whirlpool – Unidade de Compressores. ....	60
Tabela 3.2- Entrada X Saída para o SE.....	61
Tabela 4.1- Exemplo de dados de entrada para avaliação de capacidade e consumo. Fonte: Whirlpool - Unidade de Compressores. ....	66
Tabela 4.2- Número de cenários de entrada para o SE. ....	68
Tabela 4.3- Atributos de desempenho x Sistemas de medição. ....	72
Tabela 4.4- Entrada de dados para o problema de capacidade baixa. ....	81
Tabela 5.1- Atributos X número de entradas para verificação do SE. ....	90
Tabela 5.2- Exemplo de caso para validação do SE. ....	93
Tabela 5.3- Sumário da avaliação do SE pelos usuários finais. ....	100
Tabela I.1- Entrada de dados para verificação do SE - atributos de capacidade e consumo.....	148
TabTabela I.2- Entrada de dados para verificação do SE - atributo de ruído..	148
Tabela I.3- Entrada de dado para verificação do SE - atributo de mínima tensão de partida. ....	150

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Aparato apresentado na patente de Perkins. ....	19
Figura 1.2- Metodologia C2C para desenvolvimento de produtos.....	21
Figura 2.1- Sistema de refrigeração por compressor a vapor: (a) principais.....	27
Figura 2.2- Tipos de compressores e faixa de aplicação. ....	30
Figura 2.3- Esquema do compressor alternativo. Adaptado de Rigola (1998)..	33
Figura 2.4- Elementos construtivos de um compressor hermético. Adaptado do catálogo de compressores. Fonte: Whirlpool – Unidade de Compressores.....	34
Figura 2.5- Espectro de ruído para compressor. Adaptado de Trott (2008). ....	37
Figura 2.6- Função global de um compressor hermético de refrigeração. ....	39
Figura 2.7- Subsistemas do compressor hermético. ....	40
Figura 3.1- Representação da estrutura de um SE. Adaptado de Giarratano e Riley (1998). ....	50
Figura 3.2- Modelo incremental para desenvolvimento de sistemas. Adaptado de Kendal e Creen (2007). ....	51
Figura 3.3- Dados de saída do SE para aumento da carga de gás (Lopes, 2008). ....	54
Figura 3.4- Estrutura para árvore de diagnóstico. Adaptado de Liu <i>et al.</i> (2001). ....	57
Figura 4.1- Espectro de frequência - dados de entrada de ruído. ....	67
Figura 4.2- Esquema para o processo de aquisição do conhecimento.....	70
Figura 4.3- Diagrama causa-efeito geral para baixo desempenho.....	72
Figura 4.4- Diagrama causa-efeito para baixa capacidade referente ao sistema de descarga.....	73
Figura 4.5- FTA geral para o baixo desempenho do compressor hermético. ....	74
Figura 4.6- Desdobramento da FTA de alto consumo para o motor elétrico. ....	75
Figura 4.7- Diagrama de atributos para a classe "Resultados de Desempenho". ....	77
Figura 4.8- Diagrama funcional de regra sobre capacidade de refrigeração baixa.....	78
Figura 4.9- Fluxograma de processo para o SE. ....	80
Figura 4.10- Parecer do SE para os dados de entrada da Tabela 4.4.....	82
Figura 4.11- Diagrama causa-efeito para o diagnóstico da Figura 4.10.....	83
Figura 4.12- Informações adicionais para o diagrama da Figura 4.11. ....	83
Figura 4.13- Dados de entrada para o exemplo do problema de ruído. Fonte: Whirlpool – Unidade de Compressores. ....	84
Figura 4.14- Parecer do SE para o problema de ruído. ....	85
Figura 5.1- Avaliação da base de conhecimento. Adaptado de Kendal e Creen (2007).....	88
Figura A.1- Diagrama causa-efeito para capacidade abaixo do valor especificado. ....	111

Figura A.2- Diagrama causa-efeito para capacidade acima do valor especificado. ....	112
Figura B.1- Diagrama causa-efeito para consumo acima do valor especificado. ....	113
Figura B.2- Diagrama causa-efeito para consumo abaixo do valor especificado. ....	114
Figura C.1- Diagrama causa-efeito para ruído acima do especificado. ....	115
Figura D.1- Diagrama causa-efeito para partida acima do valor especificado. ....	116
Figura D.2- Diagrama causa-efeito para partida abaixo do valor especificado. ....	117
Figura E.1- Desdobramento da FTA para capacidade abaixo do valor. ....	118
Figura E.2- Desdobramento da FTA para capacidade baixa referente aos sistemas de medição, motor elétrico e componentes elétricos. ....	119
Figura E.3- Desdobramento da FTA para capacidade baixa referente ao kit mecânico. ....	120
Figura E.4- Desdobramento da FTA para capacidade baixa referente ao sistema de sucção. ....	121
Figura E.5- Desdobramento da FTA para capacidade baixa referente ao sistema de descarga. ....	122
Figura E.6- Desdobramento da FTA de capacidade baixa referente à câmara de compressão. ....	123
Figura E.7- Desdobramento da FTA para capacidade acima do valor especificado. ....	124
Figura E.8- Desdobramento da FTA para capacidade alta referente aos sistemas de medição e kit mecânico. ....	125
Figura E.9- Desdobramento da FTA para capacidade alta referente aos sistemas de descarga e câmara de compressão. ....	126
Figura F.1- Desdobramento da FTA para consumo acima do valor especificado. ....	127
Figura F.2- Desdobramento da FTA para consumo alto referente aos sistemas de medição e componentes elétricos. ....	128
Figura F.3- Desdobramento da FTA para consumo alto referente ao kit mecânico. ....	129
Figura F.4- Desdobramento da FTA para consumo alto referente ao motor elétrico. ....	130
Figura F.5- Desdobramento da FTA para consumo alto referente à câmara de compressão. ....	131
Figura F.6- Desdobramento da FTA para consumo abaixo do valor especificado. ....	132
Figura F.7- Desdobramento da FTA para consumo abaixo do valor especificado. ....	133
Figura G.1- Desdobramento da FTA para ruído acima do valor especificado. ....	134

Figura G.2- Desdobramento da FTA para ruído alto referente aos sistemas de medição, carcaça e suspensão. ....	135
Figura G.3- Desdobramento da FTA para ruído alto referente ao kit mecânico. ....	136
Figura G.4- Desdobramento da FTA de ruído alto referente ao motor elétrico e a câmara de compressão.....	137
Figura G.5- Desdobramento da FTA para ruído alto referente ao sistema de sucção. ....	138
Figura G.6- Desdobramento da FTA para ruído alto referente ao sistema de descarga. ....	139
Figura H.1- Desdobramento da FTA para partida acima do valor especificado. ....	140
Figura H.2- Desdobramento da FTA para partida alta referente aos sistemas de medição e componentes elétricos.....	141
Figura H.3- Desdobramento da FTA para partida alta referente ao kit mecânico. ....	142
Figura H.4- Desdobramento da FTA para partida alta referente ao motor elétrico. ....	143
Figura H.5- Desdobramento da FTA para partida alta referente aos sistemas de sucção, descarga e câmara de compressão. ....	144
Figura H.6- Desdobramento da FTA para partida abaixo do valor especificado. ....	145
Figura H.7- Desdobramento da FTA para partida baixa referente aos sistemas de medição, sucção, descarga e componentes elétricos. ....	146
Figura H.8- Desdobramento da FTA para partida alta referente ao kit mecânico e motor elétrico. ....	147

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
BOM	Bill of material
CECOMAF	Europeen des Constructeurs de Materiel Frigorifique
CLIPS	C Language Integrated Production System
CLT	Concept lockdown tollgate
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
COP	Coeficiente de performance (W/W)
FTA	Failure tree analysis
<i>h</i>	Entalpia específica do fluido refrigerante (J/kg)
IDT	Investment decision tollgate
ISO	International Organization for Standardization
IT	Information technology
LCT	Concept lockdown tollgate
<i>m</i>	Vazão fornecida pelo compressor (kg/s)
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PRT	Project release tollgate
PTC	Positive temperature coefficient
Q	Capacidade de refrigeração (W)
R&D	Research and development
R11	Tricloromonofluormetano (CCL <sub>3</sub> F)
R134a	Tetrafluoroetano (CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub> )
R22	Monoclorodifluormetano (CHClF <sub>2</sub> )
R600a	Isobutano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )
SE	Sistema especialista
TDA	Tear down analysis
W <sub>p</sub>	Consumo de potência (W)
WDT	Winning definition tollgate

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um Sistema Especialista para diagnóstico das causas fundamentais dos problemas de baixo desempenho em compressores herméticos para refrigeração doméstica. O sistema foi desenvolvido para ser usado como ferramenta de suporte nas fases finais de implantação dos novos projetos de compressores. Foram implementados diagnósticos para os principais atributos de desempenho do compressor, a saber: capacidade de refrigeração, consumo de potência, mínima tensão de partida e ruído. Primeiramente, são revisados os conceitos fundamentais relativos a compressores herméticos e seus componentes, assim como para seus principais atributos de desempenho e problemas associados. Também são apresentados os fundamentos de Sistemas Especialistas e sua aplicação no desenvolvimento do Sistema Especialista. A seguir, é exposto o desenvolvimento do Sistema Especialista e seus processos de aquisição e representação do conhecimento, implementação do código computacional, verificação e validação do sistema. As conclusões mostram que a metodologia de Sistema Especialista foi aplicada com resultados satisfatórios no desenvolvimento do sistema para diagnósticos de problemas de baixo desempenho de compressores herméticos e que os diagnósticos elaborados estão atualizados e alinhados com as recomendações dos especialistas. Este sistema contribui para melhoria na qualidade dos diagnósticos das falhas, reduzindo tempo e custo das análises, além de permitir o compartilhamento de conhecimento e informações dos especialistas mais experientes com os técnicos mais jovens. Dois resultados principais foram obtidos para a empresa-alvo: o sistema foi incorporado como parte do programa para treinar novos técnicos e especialistas de vários países solicitaram utilização do sistema.

**Palavras-chave:** Compressor alternativo. Sistema Especialista. Diagnóstico.

## ABSTRACT

This work presents the development of an Expert System for diagnosis of low performance root causes in hermetic compressors for household appliances. The system was developed to be used as support tool along the final product implementation phases. It was implemented diagnoses for main compressor performance attributes as follows: cooling capacity, power consumption, minimum starting voltage and noise. Initially, fundamental concepts related to hermetic compressor and components are revised as well as for their main performance attributes and associated problems. Next, basics of Expert Systems are presented and its application in developing the prototype system. The Expert System development and its processes of knowledge acquisition, knowledge representation, computational code implementation, verification and system validation are presented. Finally, conclusions show that Expert System methodology was applied with satisfactory results in the development of prototype system for low performance root cause diagnoses of hermetic compressors. Moreover, the diagnoses elaborated by the Expert System are updated and aligned with the recommendations of experts. The Expert System contributes to improve fault diagnosis quality reducing time and cost of analysis. Also, it allows knowledge and technical information sharing between the most experienced experts and beginners. Two main outcomes were the system has been incorporated as part of TechSkill program, to train new product analysts, and experts from different countries have requested to use the system.

**Keywords:** Reciprocating compressor. Expert System. Diagnosis.



## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 ASPECTOS GERAIS

Em 1834, o inventor americano Jacob Perkins depositou, em Londres, a patente de um aparato que prometia, através da utilização de fluídos voláteis, a produção de frio. A patente foi a primeira descrição completa conhecida de um sistema de refrigeração que trabalha em um ciclo por compressão a vapor. O esquema do aparato, conforme exposto na Figura 1.1, mostra uma máquina que pode ser considerada o primeiro protótipo de todos os subsequentes sistemas de compressão a vapor (Gosney, 1982).

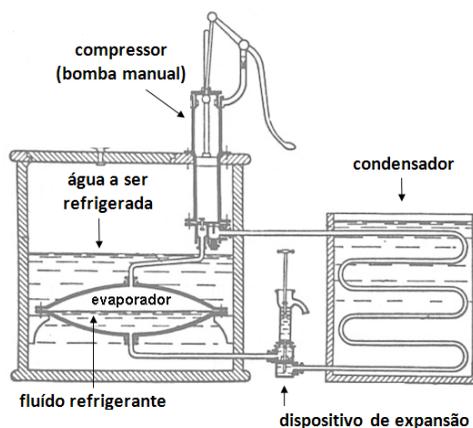


Figura 1.1- Aparato apresentado na patente de Perkins.  
Adaptado de Gosney (1982).

No aparato de Perkins, já estão presentes os principais componentes de um sistema de refrigeração por compressão a vapor, ou seja: fluido refrigerante, evaporador, condensador, dispositivo de expansão e compressor (bomba manual). O refrigerante (éter ou outro fluido volátil) evapora, retirando calor da água contida no tanque. A bomba manual succiona vapor do evaporador e o comprime a alta pressão, enviando o mesmo até o condensador que o transforma em líquido condensado. A válvula de expansão controla a diferença de

pressão entre o condensador e o evaporador, deixando passar o refrigerante condensado para o evaporador, fechando o ciclo.

No esquema rudimentar de Perkins, a bomba manual (compressor) produz a diferença de pressão necessária entre condensador e evaporador, usando o princípio fundamental de elevação de pressão através da redução do volume do fluido aprisionado no cilindro. A bomba manual ainda tem a função adicional de fornecer o fluxo de massa para o sistema de refrigeração, em pulsos.

Passados mais de 170 anos desde o depósito da patente de Perkins, e mesmo com o avanço tecnológico nas diversas áreas da ciência e engenharia nas últimas décadas, os compressores empregados na maioria dos modernos sistemas de refrigeração domésticos e comerciais leves ainda utilizam o mesmo princípio fundamental de funcionamento que foi apresentado na patente. Nestes compressores, o processo de redução de volume e aumento de pressão é obtido com o emprego de pistão e cilindro e os mesmos continuam sendo aplicados pela grande maioria dos fabricantes de compressores para refrigeração doméstica. Na Whirlpool – Unidade de Compressores, uma das maiores fabricantes mundiais de compressores, que passa a ser referida como empresa-alvo, a capacidade de produção destes compressores é superior a 34 milhões de unidades por ano (Todescat, 2012).

Ressalta-se que, atualmente, não há ameaças à tecnologia de compressão a vapor em aplicações convencionais e ainda existem oportunidades para melhoria na eficiência dos compressores utilizados, considerando seus componentes isoladamente e através de interações com o sistema de aplicação (Todescat, 2012).

No mercado global de compressores para refrigeração doméstica, os consumidores demandam que os novos produtos e processos sejam cada vez mais inovadores e sustentáveis, entreguem a função prometida com o desempenho declarado e possuam alta qualidade. Existe uma demanda específica para que os principais fabricantes continuem no esforço de melhoria dos atributos dos novos produtos, principalmente, para aumentar o nível eficiência e reduzir o nível de ruído. Na empresa-alvo, estes novos produtos precisam ser implementados de maneira mais rápida, com mais confiabilidade e custos competitivos.

Neste cenário, o número de produtos variantes nas plataformas existentes de compressores da empresa-alvo não pára de crescer e muitas vezes, os mesmos precisam ser introduzidos em linhas de produção localizadas não só no Brasil, mas também em outros países como China, Itália, Eslováquia ou México.

## 1.2 PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO NA EMPRESA-ALVO

Produtos destinados à produção em grande escala, como os compressores herméticos, precisam ter suas características técnicas e econômicas completamente determinadas antes de serem liberados para produção em série. Isto é obtido usando modelos e protótipos e, freqüentemente, necessitam-se vários passos até a aprovação final do produto (Pahl *et al.*, 2007). Em cada passo, protótipos são produzidos e submetidos a experimentos e testes de desempenho e os resultados são analisados e discutidos para verificar a conformidade do produto em relação a seus requisitos. Back *et al.* (2008) sugerem um processo similar na fase do projeto detalhado, iniciando-se com a fabricação de componentes, passando para montagem de protótipos, apresentação do protótipo, testes de laboratório, elaboração do plano de ação corretiva e, finalmente, aprovação do protótipo.

Na empresa-alvo, estas atividades estão previstas na metodologia interna de desenvolvimento de novos produtos, a qual é denominada C2C<sup>1</sup> (customer to customer). Esta metodologia é constituída de várias fases e pedágios, conforme pode ser observado na Figura 1.2.

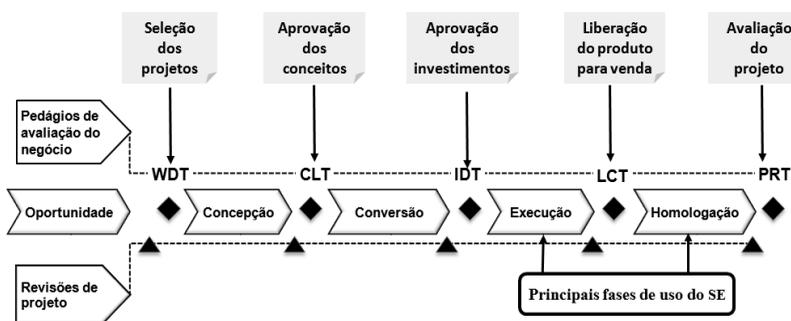


Figura 1.2- Metodologia C2C para desenvolvimento de produtos.  
Fonte: Whirlpool - Unidade de Compressores.

<sup>1</sup> Adaptado do material disponível na intranet da empresa-alvo.

São necessárias quatro grandes fases para implantação de um novo projeto, a saber: Concepção, Conversão, Execução e Homologação. Sendo que cada fase é precedida por uma revisão de projeto e por um pedágio. Nos pedágios, são analisadas as informações disponíveis referentes aos resultados previstos após a implantação do projeto, para o negócio da empresa-alvo. Nos eventos de revisão de projeto, são abordados, além dos aspectos técnicos, os riscos envolvidos e, se necessário, ações de mitigação e eliminação de riscos são disparadas.

No início do processo, as oportunidades candidatas a tornarem-se projetos são submetidas ao WDT (Winning definition tollgate), que é o fórum responsável pela triagem dos projetos e seleciona os que têm mais possibilidades de trazerem vantagens competitivas para os negócios da empresa.

A oportunidade aprovada no WDT torna-se um projeto e segue para planejamento de recursos, investimentos, custos, cronograma e entra na fase de Concepção. Nesta fase, são elaborados a análise preliminar financeira do negócio, os projetos preliminares de produto e processos de fabricação, assim como a identificação dos fornecedores potenciais. No final desta fase, o projeto é submetido ao CLT (Concept lockdown tollgate), cujo objetivo principal é a verificação da viabilidade dos conceitos adotados.

Na fase de Conversão, são definidas as configurações de produto e realizados os desenvolvimentos de componentes, materiais e fornecedores, assim como é concluída a definição do projeto dos processos de fabricação. Novamente, o projeto é submetido a um pedágio, desta vez denominado IDT (Investment decision tollgate). Caso o projeto em análise seja considerado com riscos técnicos aceitáveis e esteja de acordo com as metas de negócio da empresa-alvo, são aprovados os investimentos de capital, despesas e recursos, para implementação do mesmo.

Após o IDT, entra-se na denominada fase de Execução do projeto que consiste na instalação dos equipamentos e processos de fabricação, introdução dos novos componentes, materiais e fornecedores, assim como na aprovação e implantação final do produto na fábrica. A Execução termina com o LCT (Launch contract tollgate) que visa basicamente a liberação formal dos produtos para venda, disparando os planos de lançamento oficial do produto no mercado.

A fase final é chamada de Homologação e tem como objetivos o acompanhamento da curva de crescimento da produção e dos resultados de desempenho do produto. Nesta fase, também são concluídos os

planos de ações originados durante a fase de implantação de produto e processos. O último pedágio da metodologia C2C é o PRT (Project release tollgate), que verifica se o projeto atingiu as metas estabelecidas e faz análises das lições aprendidas com a implantação do mesmo.

### 1.3 CONTEXTO DO TRABALHO

O processo de desenvolvimento e implantação de novos compressores para o mercado de refrigeração doméstica e comerciais leves segue a metodologia de projeto anteriormente comentada. Nas fases de Execução e Homologação, o processo exige a fabricação e testes de muitos protótipos e lotes de pré-série, na configuração final do produto, principalmente, para verificação da conformidade dos resultados de desempenho obtidos, em relação aos requisitos do cliente e aos resultados obtidos nas fases anteriores de projeto. Também há uma grande necessidade de confirmar se os novos componentes especificados realmente têm o desempenho esperado, quando os mesmos são fabricados pelos processos de fabricação definitivos ou similares.

Porém, os resultados dos testes de desempenho destes primeiros lotes de compressores montados para aprovação do produto, na fase Execução, nem sempre estão alinhados com os requisitos de desempenho e um processo de análise das causas fundamentais destes desvios precisa começar o mais rapidamente possível. Mesmo que os primeiros lotes de compressores apresentem resultados satisfatórios e o produto seja certificado e comece a ser produzido, em alguns casos, os lotes subsequentes produzidos na fase Homologação apresentam desvios no desempenho e precisam também ser investigados.

Este processo de investigação é conduzido, normalmente, pelo especialista de produtos ou pesquisador, os quais têm o conhecimento específico no desenvolvimento de novos compressores e experiência na análise de causas de baixo desempenho, em compressores herméticos para refrigeração. Como o número de novos projetos e projetos derivados cresce a cada ano, a demanda por análise de causas fundamentais também cresceu, assim como a de especialistas com conhecimento específico.

Em muitos casos, os lotes de aprovação do produto são montados e testados em locais distante da matriz que está localizada no Brasil, em plantas situadas no exterior (Itália, China, Eslováquia ou México) e

estão sob a coordenação de especialistas de produtos que não estão inteiramente familiarizados com o processo de análise e investigação das causas principais dos problemas de desempenho. Estes profissionais, muitas vezes, precisam de suporte de um especialista de produtos experiente para resolver os problemas de baixo desempenho que ocorrem durante a implantação dos novos compressores.

Existe também uma necessidade de treinamento de novos especialistas de produtos que estão começando a participar dos novos desenvolvimentos e precisam, cada vez mais rápido, ser capacitados e ganhar autonomia no desenvolvimento e análise de desempenho dos compressores.

Acrescenta-se que, nas tarefas de diagnóstico das falhas principais, não há uniformidade nos procedimentos de identificação e correção das mesmas, sendo que, algumas vezes, este processo torna-se lento e dispendioso, quando não é coordenado por um especialista experiente.

As dificuldades comentadas nos parágrafos anteriores motivaram a procura por uma ferramenta de suporte ao processo de implantação de compressores herméticos, que por sua vez, levou ao desenvolvimento de um Sistema Especialista protótipo<sup>2</sup>, objeto desta dissertação.

Sistema Especialista (SE) é um programa computacional que emula o comportamento de um especialista em um domínio específico de conhecimento (Liebowitz, 1988) e a literatura mostra que podem ser empregados em funções que requerem a interferência de um especialista, para realizar o diagnóstico de problemas, como o apresentado anteriormente.

Os primeiros SEs foram desenvolvidos por pesquisadores da área de Inteligência Artificial, na década de 70 e desde então são utilizados para solução de problemas em diversas áreas do conhecimento humano, tais como sistemas para suporte ao processo de decisão, planejamento de projetos, identificação de agentes bacterianos e sistemas para diagnóstico de problemas nas áreas de medicina e mecânica (Kendal; Creen, 2007).

Do exposto até o momento, observa-se que o desenvolvimento de uma metodologia padrão de análise e a construção de um SE de suporte permitirá reduzir as dificuldades encontradas por analistas no processo de diagnósticos das causas principais dos problemas de desempenho,

---

<sup>2</sup> A denominação *protótipo* não é utilizada no restante deste trabalho para identificar o SE desenvolvido.

durante a implantação dos novos compressores, reduzindo tempo e custo destas análises, nas fases de Execução e Homologação.

O SE também irá facilitar o compartilhamento do conhecimento e experiência entre especialistas e pesquisadores, inclusive para outras áreas da empresa-alvo e para outras plantas. Este sistema também poderá ser usado por engenheiros e técnicos que trabalham na Garantia da Qualidade e que fazem o acompanhamento dos resultados dos testes de desempenho dos compressores implantados há algum tempo na fábrica.

#### 1.4 OBJETIVOS GERAIS

- Os objetivos deste estudo são sistematizar o processo de diagnóstico das causas fundamentais dos problemas de baixo desempenho de compressores herméticos para refrigeração doméstica e desenvolver um SE que suporte esta sistematização, melhorando a qualidade dos diagnósticos das falhas e proporcionando redução de tempo e custo destas análises.

#### 1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Além dos objetivos listados no item 1.4, a conclusão deste trabalho deve resultar nos seguintes benefícios:

- Facilitar o compartilhamento do conhecimento e experiência entre especialistas e pesquisadores envolvidos no processo de desenvolvimento e implantação de compressores herméticos.
- Armazenar o conhecimento sobre diagnóstico dos problemas de desempenho em compressores de forma segura e estruturada.
- A estrutura do SE implementado deve permitir que o mesmo seja expandido no futuro, agregando funcionalidades que não possam ser implementadas durante este trabalho.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto por seis capítulos. O capítulo 1 apresenta a estrutura do trabalho, os objetivos gerais e específicos da dissertação.

No capítulo 2 são revisados os conceitos básicos relativos a compressores herméticos de refrigeração, seus principais subsistemas e componentes. Também é apresentada a análise funcional do compressor, seus principais atributos de desempenho e alguns dos problemas encontrados no processo de desenvolvimento e implantação do mesmo.

No capítulo 3, os fundamentos de SEs são mostrados, assim como a aplicação de seus conceitos no desenvolvimento do SE para diagnóstico de problemas de desempenho em compressores herméticos. Este capítulo contém uma revisão bibliográfica dos SEs desenvolvidos em domínios correlatos a esta dissertação.

O capítulo 4 apresenta o desenvolvimento do SE e descreve as fases de aquisição do conhecimento, representação do conhecimento, implementação do código computacional e os resultados obtidos.

O capítulo 5 expõe os conceitos referentes aos processos de verificação e validação, suas aplicações no SE e os resultados obtidos com estes processos.

Finalmente, no capítulo 6 é elaborada a síntese das principais conclusões e recomendações para novos trabalhos na área.

## 2. COMPRESSORES HERMÉTICOS E SUBSISTEMAS

O objetivo deste capítulo é revisar os conceitos básicos relativos a compressores herméticos para refrigeração doméstica, apresentar a análise funcional do mesmo, descrevendo seus principais subsistemas e componentes, além de caracterizar os principais atributos de desempenho do compressor e seus respectivos sistemas de medição. Neste capítulo, são apresentados os termos e expressões utilizados no processo de desenvolvimento de novos compressores e que são mencionados ao longo deste trabalho.

### 2.1 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO A VAPOR

O ciclo de refrigeração por compressão a vapor é o mais usado na prática nos sistemas de refrigeração domésticos e comerciais leves, tais como refrigeradores, freezers, refresqueiras, bebedouros, frigobares, máquinas de fabricação de gelo, entre outros. Ele tem como base a habilidade dos fluidos absorverem grande quantidade calor ao se vaporizarem (Dossat, 1978) e consiste em submeter um fluido de refrigeração a quatro processos termodinâmicos em série, a saber: compressão, condensação, expansão e evaporação. Estes processos podem ser representados em um diagrama de pressão-entalpia do fluido refrigerante do sistema, conforme esquema da Figura 2.1b.

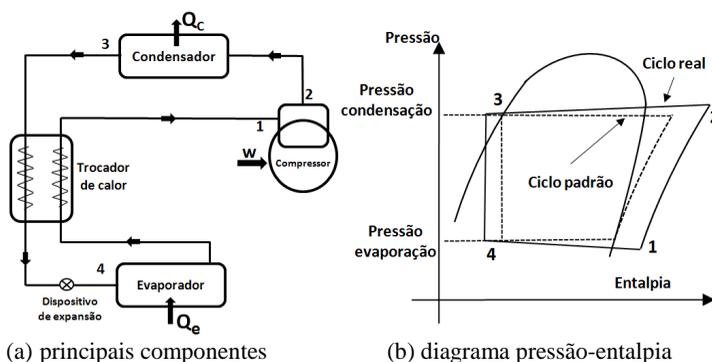


Figura 2.1- Sistema de refrigeração por compressor a vapor: (a) principais componentes (b) diagrama pressão-entalpia. Adaptado de Stoecker (1985).

No processo de compressão (representado pela linha 1 a 2 na Figura 2.1a), o vapor de refrigerante é aspirado pelo compressor e comprimido até atingir a pressão de condensação, consumindo potência. No condensador (linha 2 a 3), o vapor superaquecido a alta pressão troca calor com o ambiente, mudando de fase. A seguir, o fluido refrigerante é submetido a um dispositivo de expansão que reduz sua pressão até a pressão de evaporação (processo 3 a 4). No último processo (linha 4 a 1), o fluido passa pelo evaporador, retirando calor do ambiente a baixa pressão e produzindo o desejado efeito de refrigeração.

O ciclo padrão é representado pela linha tracejada e o ciclo real pela linha cheia. No ciclo real existem perdas de carga no evaporador e no condensador, de forma que a pressão de descarga do compressor precisa ser maior que a pressão de condensação e a pressão de sucção no compressor é sempre menor que a pressão de evaporação. No ciclo real existe sub-resfriamento do líquido que deixa o condensador, garantindo que o dispositivo de expansão sempre receba líquido e também superaquecimento na saída do evaporador, de forma que o compressor aspire somente vapor, protegendo seu mecanismo que é projetado para bombear somente vapor.

Na prática, estes efeitos de sub-resfriamento e superaquecimento são obtidos com a introdução de um trocador de calor, conforme representado na Figura 2.1a e nos refrigeradores domésticos, é comum uma troca de calor entre o tubo capilar e a linha de sucção do refrigerador. Também, acrescenta-se que a compressão do ciclo real não é isoentrópica, devido à presença de atrito entre as partes móveis do compressor e a outras perdas (Stoecker, 1985).

A capacidade de refrigeração de um sistema é a taxa na qual o calor é removido do ambiente refrigerado (Dossat, 1978) e para o circuito de refrigeração mostrado no esquema da Figura 2.1b é calculada conforme a equação abaixo:

$$Q = m(h_4 - h_1), \quad (2.1)$$

onde,  $m$  é a vazão de massa fornecida pelo compressor e  $h_1$  e  $h_4$  são as entalpias específicas do fluido refrigerante na entrada e saída do evaporador, respectivamente.

O COP (*coefficient of performance*) é definido como a razão entre a capacidade de refrigeração ( $Q$ ) e o consumo de potência do compressor ( $W_p$ ), conforme equação 2.2 (Gosney, 1982).

$$\text{COP} = Q/W_p \quad (2.2)$$

Em um ciclo de compressão a vapor, o compressor hermético é o elemento principal e exerce as funções de criar e manter uma diferença de pressão entre o evaporador e condensador, além de proporcionar a vazão necessária para o fluxo de massa de refrigerante do sistema. O tamanho do compressor, ou sua cilindrada, é definido de forma que o mesmo seja capaz de retirar todo o vapor de fluido gerado no evaporador. Se a capacidade do compressor for muito pequena, a pressão no evaporador aumenta e, se ao contrário, for excessiva, a pressão de evaporação é reduzida. Em ambos os casos, o sistema é forçado a trabalhar fora de sua condição de operação especificada, reduzindo seu desempenho.

A capacidade de refrigeração e o consumo de potência são os atributos principais de desempenho de um compressor hermético e seus valores nominais são medidos em ensaios específicos. A análise dos resultados destes ensaios é um dos objetos do presente estudo, conforme é discutido no item 2.3.

Os fluidos refrigerantes comumente usados nos sistemas de refrigeração podem ser classificados em quatro grupos: hidrocarbonetos (ex.: isobutano, propano), hidrocarbonos halogenados (ex.: comercialmente conhecidos como R11, R22, R134a), compostos inorgânicos (ex.: amônia, CO<sub>2</sub>) e misturas azeotrópicas (ex. R502) (Stoecker, 1985).

Para ser considerada adequada ao uso como fluido refrigerante, uma substância precisa ter uma série de características intrínsecas, tais como: propriedades termodinâmicas adequadas para facilitar a troca de calor, não tóxico, não inflamável, não reagir de forma desfavorável com o óleo lubrificante e com os materiais dos componentes usados no compressor, não ser agressiva a camada de ozônio, causar o mínimo impacto ao chamado “aquecimento global”, alta rigidez dielétrica e, finalmente, ser economicamente atraente (Trott, 2008).

Em vários tipos de compressores, o refrigerante entra em contato com óleo e uma pequena quantidade do mesmo é bombeada, juntamente com o gás refrigerante, circulando pelo sistema de refrigeração e voltando novamente para o compressor, ao final do ciclo.

## 2.2 TIPOS DE COMPRESSORES

Em geral, os compressores usados nos sistemas de refrigeração por compressão a vapor, produzidos em escala comercial e encontrados com frequência nos equipamentos domésticos, comerciais e industriais, podem ser classificados em duas grandes categorias (Trott, 2008): compressores de deslocamento positivo e compressores dinâmicos. A partir destas duas grandes divisões, os diversos tipos construtivos de compressores podem também ser categorizados, conforme o esquema da Figura 2.2a.

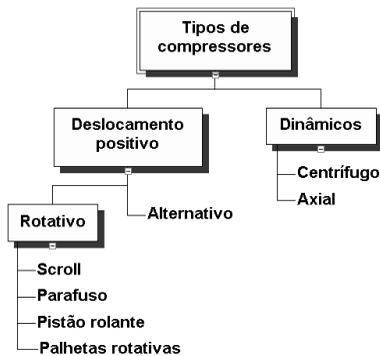


Figura 2.2a- Tipos de compressores. Adaptado de Trott (2008).

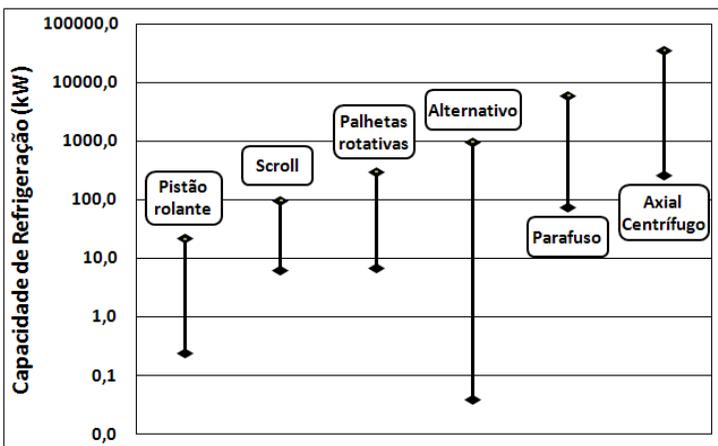


Figura 2.2b- Faixa aproximada de aplicação dos compressores. Adaptado de Trott (2008).

Os compressores de deslocamento positivo são divididos em compressores alternativos e rotativos e obtêm a diferença de pressão através da redução de volume do gás aprisionado, fornecendo o fluxo de massa para o sistema de refrigeração através de pulsos.

O compressor alternativo é composto essencialmente de um êmbolo (pistão) movimentando-se de forma alternada no interior de um cilindro, sendo que o pistão é acionado por um sistema simples de biela-manivela. O controle de entrada e saída da massa de refrigerante através dos orifícios de sucção e descarga é feito automaticamente pelas válvulas, as quais têm geometria, massa e rigidez projetadas para otimizar o desempenho do compressor. Nos compressores alternativos de simples estágio, o processo de compressão ocorre em apenas um lado do pistão, enquanto nos chamados compressores de duplo estágio, a compressão é feita em ambos os lados do mesmo.

O compressor alternativo do tipo linear dispensa o sistema de biela manivela e eixo excêntrico, sendo que o pistão é conectado diretamente a uma haste movimentada por um motor de deslocamento linear, fabricado a partir de um eletroímã e por um sistema massa-mola ressonante. A eficiência máxima é obtida quando o compressor oscila na frequência de ressonância do sistema massa-mola. Esta tecnologia ainda não é encontrada com frequência nos compressores de refrigeração.

Os compressores de deslocamento positivo são, geralmente, aplicados em sistemas de refrigeração domésticos e comerciais. Para aplicações onde o requisito por redução de consumo de energia é significativo, são aplicados os compressores de capacidade variável que são capazes de ajustá-la conforme demanda do sistema de refrigeração, pela variação na rotação do motor, que por sua vez, é controlada de forma eletrônica por um inversor de frequência.

Os compressores rotativos podem ser do tipo scroll, parafuso, pistão e palhetas rotativas. Os do tipo scroll são bastante usados em condicionadores de ar domésticos e automotivos e também como compressores de ar, tendo as vantagens de usar um número menor de componentes que o alternativo, não usar válvulas e poder atingir altas pressões de descarga. Gomes (2006) apresenta uma análise comparativa entre o desempenho termodinâmico entre os compressores alternativo, scroll e pistão rolante e conclui que o compressor alternativo apresenta menores perdas termodinâmicas que os compressores scroll e pistão rolante, principalmente, devido a processos mais eficientes de compressão, sucção e descarga. O tipo scroll é o que tem a maior

eficiência volumétrica, por ter os vazamentos minimizados e pela eliminação do espaço nocivo ou volume morto. O compressor de pistão rolante apresentou o pior desempenho devido à presença de níveis elevados de vazamentos.

O compressor tipo parafuso consiste de um par de rotores em forma de hélice de parafuso, os quais giram em sentido contrário e o aumento de pressão é obtido quando o gás é comprimido entre as hélices. Estes compressores são, geralmente, aplicados em refrigeração e condicionadores de ar comerciais e nos grandes condicionadores de ar industriais.

Os compressores dinâmicos aumentam a velocidade do gás de baixa pressão, com auxílio de uma pá e, a seguir, reduzem-na, convertendo a energia cinética em pressão estática, com a utilização de um difusor, obtendo o aumento de pressão desejado. Na categoria dos compressores dinâmicos estão os centrífugos, também chamados de turbocompressores, que apresentam a maior relação de compressão entre todos os compressores, e os do tipo axial, que são bastante empregados em turbinas de avião.

A seleção do tipo de compressor mais adequado para a aplicação depende da capacidade de refrigeração requerida, do tipo de refrigerante empregado e das características específicas do sistema de refrigeração ou instalação. A Figura 2.2b mostra a faixa aproximada da capacidade de refrigeração em que, geralmente, os compressores listados são aplicados, onde pode ser observado que o compressor alternativo é o que apresenta a maior faixa de utilização, entre 0,04 e 1000 kW (Trott, 2008).

Os compressores ainda podem ser divididos em herméticos, semi-herméticos e abertos. Nos compressores abertos, o mecanismo responsável pela compressão é acionado por um motor externo ao compressor (motor elétrico, turbina ou combustão interna) e a vedação do sistema precisa ser garantida para evitar vazamentos. São, geralmente, aplicados em grandes sistemas de refrigeração que usam amônia.

Nos compressores herméticos, o motor elétrico é integrado ao mecanismo responsável pelo processo de compressão e ambos são montados na carcaça do compressor, que é formada por duas peças (corpo e tampa) e soldada, de forma a ficar hermeticamente fechada. Esta alternativa elimina o risco de vazamento do gás refrigerante ou contaminação, quando o compressor é perfeitamente montado no sistema de refrigeração. A desvantagem do compressor hermético é que não pode ser reparado e quando acontece alguma falha de um ou mais

de seus componentes internos, um novo compressor precisa ser montado no sistema. Nos compressores semi-herméticos a carcaça é construída de forma que o compressor possa ser aberto e, posteriormente, fechado e seus componentes possam ser reparados.

A maioria dos compressores utilizados nos sistemas de refrigeração por compressão a vapor de baixa capacidade de refrigeração, ou seja, aqueles aplicados em refrigeradores e freezers domésticos ou aplicados em sistemas comerciais, como pequenos balcões frigoríficos, refresqueiras e similares, são do tipo alternativo e usam um mecanismo com apenas um pistão de simples efeito. Nestes compressores, normalmente, são montados motores elétricos de indução assíncronos e monofásicos.

A Figura 2.3 mostra um esquema do compressor hermético alternativo de um cilindro e simples efeito, destacando os componentes mais importantes do mesmo. Neste tipo construtivo, o gás de sucção entra pelo passador de sucção e toma o espaço da cavidade, que é a região interna entre a carcaça e o conjunto de componentes acoplados ao motor. O gás é então aspirado, entra na câmara de sucção, flui até o orifício de sucção, entra no cilindro, é comprimido e descarregado para o sistema de descarga e, finalmente, segue para o passador de descarga do compressor.

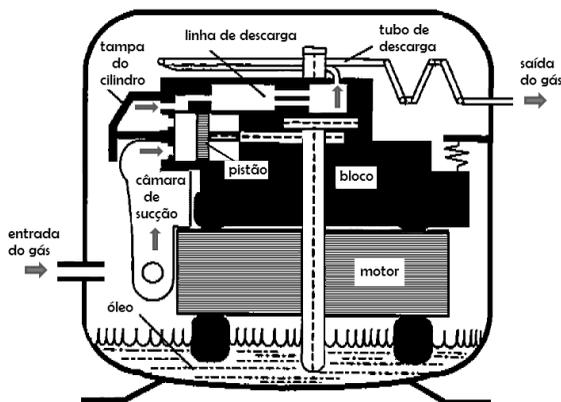


Figura 2.3- Esquema do compressor alternativo. Adaptado de Rigola (1998).

De maneira geral, os compressores herméticos produzidos, atualmente, em escala industrial têm a denominação de seus principais elementos construtivos consolidada, sendo a mesma usada ao longo

deste trabalho. A Figura 2.4 mostra a localização e a denominação destes elementos para um compressor produzido pela empresa-alvo deste trabalho.

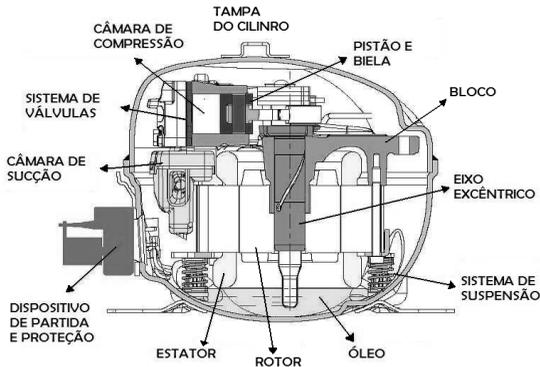


Figura 2.4- Elementos construtivos de um compressor hermético. Adaptado do catálogo de compressores. Fonte: Whirlpool – Unidade de Compressores.

### 2.3 DESEMPENHO DO COMPRESSOR HERMÉTICO

Os atributos de desempenho mais importantes relacionados aos novos desenvolvimentos de compressores para refrigeração, os quais são medidos em ensaios específicos são: capacidade de refrigeração, consumo de potência, COP, nível de potência sonora e mínima tensão de partida.

Estas características de desempenho são avaliadas em ensaios específicos, durante as várias fases do processo de desenvolvimento de produto dos novos modelos e comparadas com os valores requisitados no início do projeto. Os resultados destes ensaios são fundamentais para tomada de decisão sobre o prosseguimento do projeto e aprovação das especificações dos componentes, ou para ações de reprojeção em componentes específicos que precisam de melhoria no desempenho.

Em alguns casos, os lotes de compressores testados apresentam desvios de desempenho em relação à especificação e precisam ser investigados. Este processo de investigação é conduzido, normalmente, pelo especialista de produtos ou pesquisador na empresa-alvo, os quais têm o conhecimento específico na área de desenvolvimento de novos compressores e experiência na análise de causas de baixo desempenho de compressores. Este trabalho apresenta uma ferramenta de suporte ao

diagnóstico de problemas destas causas para o baixo desempenho, conforme é mostrado no capítulo 4.

### **2.3.1 Capacidade de refrigeração, consumo de potência e COP**

Os valores de capacidade de refrigeração, consumo de potência e COP estão entre os principais atributos de desempenho dos compressores herméticos e, geralmente, são apresentados nos catálogos técnicos de compressores e usados pelos fabricantes de sistemas de refrigeração nos processos de aprovação de seus produtos. Para medição destes atributos, são empregados calorímetros padronizados, que contém um circuito de refrigeração montado em bancada especial, devido à necessidade de medição precisa, controle e monitoramento das diversas variáveis do ensaio. Neste trabalho, os resultados de medições de calorímetro apresentados estão de acordo com a norma ISO 917 (Testing of refrigerant compressors), que segundo Flesch (2008) é a que tem maior abrangência territorial.

Estes atributos de desempenho são apresentados, normalmente, para condições específicas de temperaturas do ensaio calorimétrico e são regulamentadas por vários órgãos e associações ligados ao mercado de refrigeração e ar condicionado, tais como, ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*) e CECOMAF (*Europeen des Constructeurs de Materiel Frigorifique*).

As condições do ensaio do compressor são, normalmente, estabelecidas em função da faixa de temperatura de evaporação em que o compressor é aplicado. As faixas de aplicação mais usadas são LBP (*low back pressure* ou baixa pressão de retorno) e HBP (*high back pressure* ou alta pressão de retorno) e definem os valores para as temperaturas de evaporação, condensação, ambiente, sub-resfriamento e de entrada do compressor, para o ensaio calorimétrico. A Tabela 2.1 apresenta estes valores padronizados de temperaturas para as condições ASHRAE e CECOMAF, que são as mais frequentemente usadas nos catálogos de compressores para o mercado de refrigeração doméstica.

Tabela 2.1- Temperaturas padronizadas nas condições ASHRAE e CECOMAF.

Variável padronizada	ASHRAE		CECOMAF	
	LBP	HBP	LBP	HBP
Faixa de aplicação				
Temperatura de evaporação	-23,3 °C	7,2 °C	-25 °C	7,2 °C
Temperatura de condensação	54.4 °C	54.4 °C	55 °C	55 °C
Temperatura de sub-resfriamento	32 °C	32 °C	55 °C	55 °C
Temperatura do box calorimétrico	32 °C	32 °C	32 °C	32 °C
Temperatura de entrada no compressor	32 °C	32 °C	32 °C	32 °C

Os resultados dos testes de calorímetro, nas condições de LBP apresentadas na Tabela 2.1, são usados como dados de entrada do SE, conforme é discutido no capítulo 4.

### 2.3.2 Nível de potência sonora (ruído)

O nível de potência sonora dos sistemas de refrigeração domésticos e comerciais leves é, atualmente, um dos requisitos mais importantes a ser considerado nos novos projetos e os especialistas responsáveis pelas aprovações estão sempre trabalhando para obter um acoplamento adequado entre sistema de refrigeração, tubulações e o compressor, de forma a minimizar o ruído emitido pelo sistema de refrigeração.

As normas ISO especificam vários métodos de medição do nível de potência sonora de máquinas e equipamentos, seja para câmaras reverberantes, anecóicas ou semi-anecóicas. Neste trabalho, as medições apresentadas estão de acordo com a norma ISO 3741 (Acoustics – Determination of sound Power levels of noise sources – Precision methods for broad-band sources in reverberation rooms), que estabelece o procedimento para medições em câmara reverberante, em função de ser a utilizada pela empresa-alvo nas medições de ruído dos compressores herméticos.

Tojo *at al.* (1980) e Sangoi (1987) mostram que o ruído irradiado pela carcaça do compressor provém, principalmente, de três subsistemas do compressor, a saber: câmara de compressão, kit mecânico e motor elétrico. Na câmara de compressão, o processo de elevação da pressão de sucção até a pressão de descarga gera uma vibração estrutural no mecanismo do compressor. No motor elétrico, o fluxo magnético

produz esforços no estator e rotor que também são transmitidos para o mecanismo do compressor. No kit mecânico, durante o ciclo de compressão do vapor, os componentes móveis são submetidos a variações agudas de aceleração, gerando vibrações também nos demais componentes. Tem-se ainda o fluxo pulsante na câmara de descarga que excita os modos acústicos das tubulações de descarga do compressor e do sistema de refrigeração. O fluxo intermitente de gás no sistema de sucção também transmite o ruído gerado na câmara de compressão para a cavidade, que por sua vez, excita as frequências naturais da carcaça.

As vibrações estruturais geradas nos subsistemas do compressor são transmitidas para a carcaça através do sistema de suspensão, sistema de descarga, óleo lubrificante e cavidade. As vibrações da carcaça, por sua vez, geram um nível de potência sonora que é, geralmente, representado por um espectro de frequência, conforme exemplo da Figura 2.5 (Trott, 2008). Este espectro é mostrado em dB(A), com bandas de 1/3 de oitava e frequências que variam de 100 Hz a 10 kHz. O ruído total mostrado no final do espectro da Figura 2.5 é o resultado da soma das medições de pressões sonoras para cada banda de 1/3 de oitava do espectro e da conversão deste resultado em dB(A), conforme estabelecido pela norma ISO 3741.

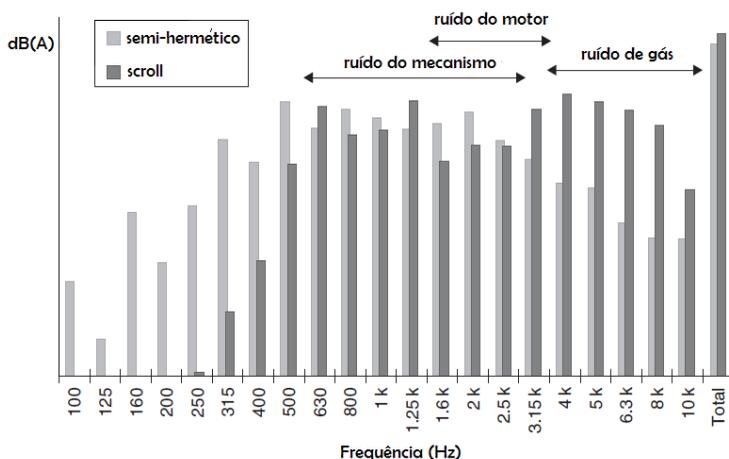


Figura 2.5- Espectro de ruído para compressor. Adaptado de Trott (2008).

Neste exemplo, também observa-se uma associação das possíveis fontes de ruído com algumas bandas de frequência. De forma que, o

ruído proveniente do motor está associado com a faixa de frequência entre 1,6 e 3,15 kHz, o ruído do gás com a faixa de 4 a 10 kHz e o ruído do mecanismo com a faixa de 630 Hz a 2,5 kHz.

Assim como no exemplo acima, o SE desenvolvido e apresentado no capítulo 4 deste trabalho faz o diagnóstico das principais causas de ruído alto associadas com uma faixa de frequência do espectro para os compressores herméticos de refrigeração doméstica.

### **2.3.3 Mínima tensão de partida**

O atributo de mínima tensão de partida, para os compressores herméticos, corresponde à tensão elétrica mais baixa necessária para o motor sair do repouso e atingir a sua rotação nominal de trabalho, sob determinadas condições de ensaio, descritas a seguir. O ensaio é realizado em uma bancada que contém um circuito de refrigeração capaz de estabelecer e monitorar as pressões de sucção e descarga. O operador também pode controlar o tempo de atuação da bobina auxiliar do compressor, assim como as temperaturas das bobinas do motor e a impedância do painel de testes. O ensaio é realizado segundo um procedimento operacional interno da empresa-alvo.

O atributo de mínima tensão de partida é um dos principais requisitos de produto para compressores que são destinados a mercados que trabalham com variabilidade alta no fornecimento de energia elétrica, como é o caso de Turquia e Índia.

## **2.4 DECOMPOSIÇÃO FUNCIONAL E SUBSISTEMAS**

Para suportar o processo de estruturação do SE para diagnóstico de problemas de baixo desempenho de compressores, utilizou-se ferramentas e técnicas desenvolvidas no método da síntese funcional, que é empregado para busca de soluções de concepção de sistemas técnicos (Back *et al.*, 2008). Uma técnica deste método consiste em formular a função global do sistema a ser estudado e, a seguir, incluir as interfaces com outros sistemas técnicos e o meio ambiente e explicitar o fluxo de energia, material e sinal de controle do sistema. O segundo passo consiste em fazer o desdobramento da função global em funções parciais, as quais quando combinadas e completas, entregam a função

global originalmente definida, seguindo o fluxo natural de energia e material, do início até a saída do sistema técnico.

O sistema compressor tem duas funções principais, a saber: estabelecer uma diferença de pressão entre o evaporador e o condensador e proporcionar a vazão necessária para o fluxo de massa de refrigerante do sistema de refrigeração, como mostrado no esquema da Figura 2.6. O fluxo de gás refrigerante entra pelo sistema de sucção do compressor, é comprimido e sai pelo sistema de descarga. Tem-se na entrada a massa de refrigerante com pressão e temperatura baixas, assim como energia elétrica. Como saída tem-se massa de refrigerante com pressão e temperatura altas. Um sinal de controle recebido do sistema de refrigeração aciona o fornecimento de energia para o processo de compressão.

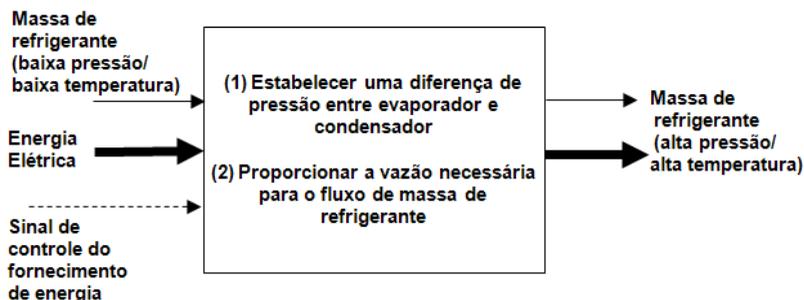


Figura 2.6- Função global de um compressor hermético de refrigeração.

O sistema compressor descrito acima pode ser desdobrado nos seguintes subsistemas: componentes elétricos (protetor térmico e dispositivo de partida), motor elétrico, kit mecânico, câmara de compressão, sistema de sucção, sistema de descarga e subsistema de carcaça e suspensão, conforme o esquema mostrado na Figura 2.7. A linha cheia e grossa representa o fluxo de energia através dos subsistemas do compressor e a linha cheia e fina o fluxo de massa. Em cada rotação do rotor, o gás refrigerante é aspirado para câmara de compressão, comprimido e descarregado, formando um ciclo completo.

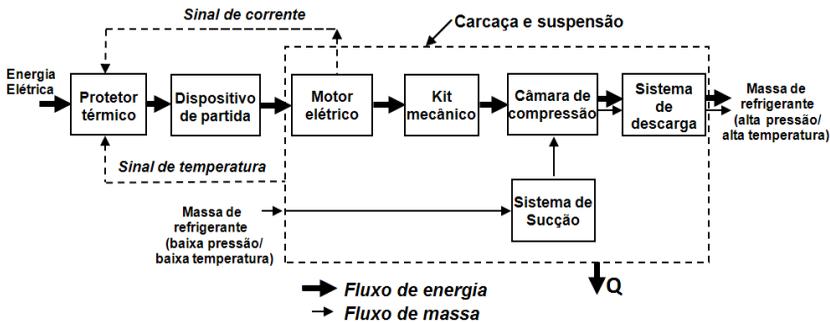


Figura 2.7- Subsistemas do compressor hermético.

O fluxo de energia ao longo dos subsistemas do compressor hermético também realça onde ocorrem os processos de perda de potência. A partir da energia elétrica entregue ao compressor, o dispositivo de partida representa a primeira perda de potência importante no fluxo de energia. Esta perda pode ser reduzida com a utilização de dispositivos eletrônicos de partida. Seguindo o fluxo de energia, chegamos nas perdas associadas ao motor elétrico, as quais são representadas por correntes parasitas e histereses. Atualmente, o motor elétrico (estator e rotor) apresenta o maior custo de matéria-prima entre todos os subsistemas, além de representar uma parcela significativa das perdas do compressor. A potência útil entregue pelo motor elétrico ao eixo, por sua vez, é reduzida no kit mecânico devido ao atrito entre as partes móveis do mecanismo nos mancais, folga pistão x cilindro e bomba de óleo.

Segundo Possamai *et al.* (2004), as perdas termodinâmicas estão associadas ao escoamento do fluido refrigerante no interior do compressor. Ao escoamento de sucção estão associadas às perdas devido às restrições na câmara de sucção, válvula e orifício de sucção, além do superaquecimento do gás de sucção antes de chegar à câmara de compressão. As perdas na câmara de compressão, por sua vez, estão associadas às irreversibilidades do processo de compressão. Finalmente, ao escoamento de descarga estão associadas às perdas devido às restrições na válvula, orifício de descarga, câmara de descarga, além do

superaquecimento do gás no sistema de descarga, antes de deixar o compressor.

A seguir, é apresentada uma descrição resumida dos componentes e funcionamento dos subsistemas.

### **2.4.1 Motor elétrico**

O motor elétrico tem a função de transformar energia elétrica em energia mecânica, na forma de movimento rotativo e torque para o eixo do mecanismo do compressor. A maioria dos compressores herméticos para refrigeração doméstica usa motores elétricos de indução assíncronos e monofásicos, que são formados, basicamente, de estator e rotor. O estator é a parte estática, composto de uma estrutura de aço elétrico, formado a partir de lâminas tratadas termicamente para reduzir as perdas por correntes parasitas ou histerese (Filippo, 2000). A estrutura de aço contém ranhuras que acomodam as duas bobinas de fios de cobre ou alumínio, uma principal, que atua durante a partida e o funcionamento contínuo do compressor e uma auxiliar, que atua somente durante a partida. O rotor também é produzido a partir de um pacote de lâminas de aço elétrico, em cujas ranhuras é injetado alumínio a quente sobre pressão, formando uma gaiola, também chamada de gaiola de esquilo (Filippo, 2000).

Entre estator e rotor é formada uma folga radial ou entreferro, que, geralmente, é otimizada durante o projeto dos motores elétricos dos compressores herméticos, de forma a reduzir as perdas elétricas e obter os maiores torques possíveis.

Em alguns resultados de teste de calorímetro em compressores herméticos, cujo consumo de potência está acima do especificado, o mesmo pode estar associado ao motor elétrico e seus componentes. Esta variabilidade pode advir de várias causas, tais como: folga radial abaixo do especificado, aço elétrico com perdas elétricas acima do especificado, diâmetro do fio de cobre do estator abaixo do valor especificado, excesso de bolhas e ou impurezas no rotor, anel de Al do rotor com altura abaixo do especificado e pacote de lâminas do estator ou rotor com altura abaixo do especificado (falta de lâminas).

### **2.4.2 Componentes elétricos para partida e proteção**

Os componentes elétricos são os dispositivos responsáveis pelas funções de auxiliar a partida do compressor e protegê-lo contra sobrecargas de corrente e ou temperaturas. Quando energia elétrica é aplicada ao dispositivo de partida, o mesmo aciona a bobina auxiliar do motor elétrico e assim o compressor ganha um incremento temporário nos torques de partida e de aceleração, para vencer as resistências iniciais impostas pelo próprio compressor e pelo sistema de refrigeração. Quando este incremento não é suficiente, é necessário empregar um capacitor de partida para aumentar os torques e ajudar o compressor a alcançar sua rotação nominal.

Atualmente, o dispositivo de partida utilizado nos compressores herméticos pode ser de três tipos, a saber: relé de corrente, PTC (*positive temperature coefficient*) ou dispositivo eletrônico. Os do tipo relé de corrente são acionados pelo efeito magnético de sua bobina, que é ligada em série com a bobina principal do compressor. Na partida, os contatos são fechados para deixar passar corrente para a bobina auxiliar. Quando o compressor atinge a rotação nominal, a corrente na bobina principal é reduzida, minimizando o campo magnético, que fica incapaz de suportar o peso dos contatos e abre o circuito, isolando a bobina auxiliar (Dossat, 1978).

O PTC não tem partes móveis e constitui-se de uma pastilha cuja resistência elétrica é função da temperatura e é montado em série com a bobina auxiliar. Quando o compressor é ligado, a pastilha do PTC está fria e deixa passar corrente para a bobina auxiliar. Quando o motor está próximo da rotação nominal a pastilha já está quente, cortando o fornecimento de corrente para a bobina auxiliar (Gosney, 1982).

O dispositivo eletrônico de partida tem uma placa eletrônica que controla o tempo de atuação da bobina auxiliar e não tem consumo residual de potência, contribuindo para redução das perdas do compressor.

O protetor térmico tem a função de proteger o compressor contra amperagens e temperaturas altas que podem acometer o compressor em momentos críticos do ciclo de refrigeração, ou quando o suprimento de energia elétrica fica fora das condições de operação que o motor elétrico foi projetado. Também pode acontecer em alguns momentos, o compressor entrar em situação de rotor bloqueado, recusando-se a partir e aquecendo rapidamente algumas partes do motor (Gosney, 1982). Em todas estas situações críticas, o protetor térmico precisa atuar rapidamente, cortando temporariamente o fornecimento de energia

elétrica para o motor elétrico e evitando danos que podem levar a falha do compressor.

Em alguns resultados de testes de calorímetro, quando o nível de consumo de potência está acima dos valores especificados e a capacidade de refrigeração está de acordo com o esperado, a causa principal do alto consumo pode estar associada à utilização de componentes elétricos diferentes dos especificados para o modelo de compressor, durante o teste de calorímetro, ou pela utilização de componentes elétricos com problemas de qualidade. Neste caso, recomenda-se uma verificação específica da qualidade dos componentes elétricos, tais como: medição da capacitância dos capacitores utilizados nos testes e verificação do funcionamento adequado dos dispositivos de partida e proteção térmica.

### **2.4.3 Kit mecânico**

Os componentes deste subsistema transformam o movimento de rotação recebido do rotor em alternativo, para permitir a compressão do gás refrigerante, através de um mecanismo de biela-manivela. O kit mecânico é formado por eixo, no qual o rotor é montado, biela, pino do pistão, pistão, bloco e óleo lubrificante. Com estes componentes são formados quatro conjuntos de folgas mecânicas que são fundamentais para o funcionamento e otimização dos compressores, a saber: eixo principal x mancal, eixo excêntrico x olhal maior da biela, olhal menor x pino do pistão e pistão x cilindro. A folga pistão x cilindro tem o compromisso de minimizar os vazamentos pelas paredes laterais do pistão e do cilindro e permitir o deslizamento do pistão, sempre com a menor perda mecânica possível.

O bloco ainda exerce a função de formar o cilindro, o mancal e a estrutura para montagem do cabeçote e fixação do estator. O kit mecânico contempla o sistema de lubrificação do compressor que contém o óleo, a bomba de óleo, os canais e furos de lubrificação do eixo e bloco. O óleo que está armazenado no cárter, assim que o compressor é ligado, imediatamente é aspirado pela bomba e escoado pelos canais de lubrificação, lubrificando os componentes do kit mecânico e, no final do ciclo, sob o efeito da gravidade, retorna para o cárter. O óleo, além de ser o elemento principal dos mancais hidrodinâmicos do kit mecânico, durante o seu fluxo pelos

componentes, também ajuda na retirada do calor dos mesmos, gerado no processo de compressão.

Em testes de calorímetro, o alto consumo em relação ao especificado pode estar associado também ao subsistema kit mecânico. Ele é, geralmente, caracterizado pela existência de marcas de desgaste prematuro na superfície dos componentes móveis do kit mecânico, a saber: pistão, cilindro, mancal principal, mancal secundário, olhal maior, eixo excêntrico, olhal menor e pino do pistão. Caso estas marcas estejam presentes, é recomendável fazer medições dos erros de forma (circularidades) e posição (paralelismos e perpendicularismos) dos componentes acima. Verificar também se há sinais de atravessamento do pistão, o qual pode ser caracterizado por desgaste prematuro do topo e da saia do pistão, quando este desgaste está defasado 180°. É importante verificar também se o comprimento do topo do pistão, as larguras dos mancais e as folgas entre os componentes móveis estão de acordo com o especificado.

O kit mecânico também pode ser responsável por desvios da capacidade de refrigeração em relação ao especificado, principalmente, para os casos de baixa capacidade. Uma das possibilidades está associada com a montagem de compressores com folga pistão x cilindro acima do valor especificado, gerando vazamento excessivo de refrigerante pela mesma (Ussyk, 1984; Lilie *et al.*, 1984).

#### **2.4.4 Sistema de sucção**

O sistema de sucção é o responsável por conduzir o gás refrigerante proveniente do evaporador para o interior da câmara de compressão e é composto pelos seguintes componentes: tubo de sucção ou passador de sucção, câmara de sucção e válvula de sucção. O passador de sucção conduz o gás da linha de sucção do refrigerador para o interior do compressor. A câmara de sucção é, geralmente, construída de um material com propriedades de isolamento térmico, e tem a função de servir de reservatório de gás com temperaturas mais baixas que as do restante do gás disponível no interior da carcaça, contribuindo para melhorar a aspiração de massa de refrigerante por unidade de volume para o interior da câmara de compressão. Outra função importante da câmara de sucção é atenuar as pulsações de gás provocadas pelo escoamento de sucção, originados na válvula de sucção, minimizando a geração de ruído (Soedel *et al.*, 1974). Um projeto adequado da câmara

de sucção é fundamental para estabilizar o movimento da válvula de sucção. A válvula de sucção tem a função de comandar o fluxo de entrada de gás refrigerante para o interior da câmara de compressão, abrindo e fechando ao longo do ciclo, nos momentos adequados, para otimizar o desempenho do compressor. Seu funcionamento depende da diferença de pressão entre a câmara de sucção e a câmara de compressão.

Em resultados de testes de calorímetro com baixa capacidade de refrigeração associada ao alto nível de ruído, a baixa capacidade pode ser causada por vazamento excessivo na região do pescoço da câmara de sucção, ou pela danificação do filtro do tubo da câmara de sucção ou ainda pela presença de excesso de resíduos no mesmo, causando entupimento e redução do fluxo de massa.

#### **2.4.5 Câmara de compressão**

É na câmara de compressão que acontece todo o processo de elevação da pressão do gás refrigerante, através da redução de volume do mesmo, pela atuação do movimento alternativo do pistão. Este subsistema é composto da câmara de compressão, junta do cilindro e das paredes e interfaces dos componentes que formam a mesma. A altura da câmara de compressão, que é definida pela distância entre o pistão e a placa de válvulas quando o pistão está no seu ponto morto superior, forma, juntamente com o diâmetro do cilindro, a maior contribuição do volume morto do mecanismo do compressor.

Em avaliações onde o resultado de teste de calorímetro mostra capacidade de refrigeração acima do limite de aceitação associado com nível de potência sonora também acima do limite de aceitação, o subsistema com maior possibilidade de ser o responsável pela capacidade alta é a câmara de compressão, que pode estar com valor abaixo do mínimo especificado.

Por outro lado, altura da câmara acima do valor especificado (volume morto) pode ser responsável por capacidade abaixo do valor especificado. Quanto maior o volume morto, maior é o curso percorrido pelo pistão antes de abrir a válvula de sucção, ou seja, a abertura da válvula de sucção é atrasada, reduzindo a massa aspirada e contribuindo para uma queda na capacidade de refrigeração (Ussyk, 1984).

## 2.4.6 Sistema de descarga

O sistema de descarga é responsável pela condução do fluxo de gás de alta pressão para a linha de descarga do refrigerador e contém os seguintes componentes: válvula de descarga, tampa do cilindro, tubo de descarga e passador de descarga. A válvula de descarga, assim como a de sucção, controla o fluxo de gás refrigerante da câmara de compressão para a região de descarga do compressor e tem seus movimentos dependentes da diferença de pressão entre a câmara de compressão e a região de descarga.

A região de descarga é, geralmente, composta por dois volumes que, utilizando o princípio de funcionamento dos ressonadores de “Helmholtz”, têm a função de minimizar o nível de pulsação gerado durante o processo de compressão e transmitido para o sistema de descarga do compressor (Soedel, 2007). Os volumes de descarga são conectados ao passador de descarga através do tubo de descarga do compressor. Este tubo tem em sua geometria uma série de curvas dispostas de forma que sua estrutura tenha rigidez e massa capazes de minimizar a transmissão de vibração para a linha de descarga do refrigerador (Sangoi, 1983). O último componente, passador de descarga, tem a função de conduzir o fluxo de gás de alta pressão para fora do compressor e está conectado a linha de descarga que leva o fluxo de gás para o condensador do sistema.

Em testes de calorímetro, a baixa capacidade de refrigeração pode também ser causada por desvios de qualidade relacionados a este subsistema do compressor. Estes desvios estão associados, principalmente, à baixa qualidade de acabamento do anel de descarga (planicidade acima especificado, presença de riscos e degraus, excesso de poros e presença de resíduos ou poeira em cima do anel). Também pode ser causada pelo empenamento da válvula de descarga, planicidade acima do especificado do acento da válvula de descarga na placa de válvulas, torque dos parafusos do cabeçote abaixo do especificado e planicidade da tampa do cilindro acima do especificado.

## 2.4.7 Carcaça e suspensão

Com exceção dos componentes elétricos, a carcaça condiciona todos os demais subsistemas e torna o compressor efetivamente

hermético. Os passadores de sucção, processo e descarga são soldados na mesma, juntamente com a placa base e a base da tampa dos componentes elétricos. A carcaça também tem a função de minimizar os níveis de potência sonora e vibração transmitidos pelo compressor.

A carcaça é a irradiadora do ruído e transmissora de vibrações e é projetada de forma que seus primeiros modos de vibração não coincidam com ressonâncias geradas pelos outros componentes do compressor (Soedel, 2007). Desvios dimensionais da forma e espessura especificadas podem deslocar os modos de vibração da carcaça, de forma que coincidam com os modos dos outros componentes e, conseqüentemente, aumentar o nível de potência sonora emitido pelo compressor.

Sobre a suspensão é montado todo o mecanismo do compressor e ela é composta de molas de compressão, batentes plásticos e arruelas de proteção para o estator. A suspensão tem a função de minimizar a transmissão do nível de vibração para a carcaça. O compressor é montado no refrigerador sobre amortecedores de vibração, os quais minimizam a transmissão da vibração para o gabinete do sistema de refrigeração. A suspensão precisa ser projetada adequadamente para minimizar o efeito do desbalanceamento das forças e momentos do kit mecânico e reduzir o nível de vibração transmitido para a carcaça. A utilização de molas de suspensão com rigidez de acordo com a especificação e a montagem dos contrapesos nas posições corretas são fundamentais para manter baixos os níveis de ruído e vibração.

Como fontes de aumento no nível de ruído, podemos citar a montagem do compressor com folgas entre os componentes mecânicos que têm movimentos relativos diferentes (acima ou abaixo) dos valores especificados e a montagem com altura da câmara de compressão abaixo do valor especificado.

Uma das principais tarefas das equipes de projetos dos novos modelos de compressores é a otimização dos diversos subsistemas do compressor, de forma a obter a máxima eficiência energética, o menor nível de ruído, o menor tamanho (principalmente, altura), com o menor custo de matéria prima e ainda agregar alta confiabilidade e o menor nível de investimento em ativos e processos de fabricação.

Este capítulo revisou os conceitos principais referentes a compressores herméticos para refrigeração doméstica e seus principais atributos de desempenho, assim como descreveu os sistemas de medição associados aos respectivos atributos. Também foi exposta uma análise funcional desenvolvida para o compressor, com uma descrição sumarizada de seus subsistemas. O próximo capítulo apresenta os

conceitos fundamentais relativos a SEs e como foram utilizados no desenvolvimento do SE para diagnóstico de problemas de desempenho em compressores herméticos.

### **3. SISTEMAS ESPECIALISTAS DESENVOLVIDOS NO CONTEXTO DESTE TRABALHO**

Este capítulo tem como objetivo apresentar um resumo dos conceitos básicos de Sistemas Especialistas (SE) e como estes podem ser aplicados no desenvolvimento do SE, objeto deste trabalho, assim como uma revisão da literatura publicada sobre SEs com domínios correlatos a esta dissertação.

#### **3.1 DIAGNÓSTICO DE PROBLEMAS DE DESEMPENHO EM COMPRESSORES**

O processo de desenvolvimento de novos compressores para o mercado de refrigeração demanda, frequentemente, dos especialistas responsáveis, diagnósticos para problemas de desempenho, em vários momentos de seu ciclo, conforme comentado no capítulo 1. Estes problemas são causados, na maioria das vezes, por desvios de qualidade nos componentes do compressor hermético.

Atualmente, o processo de diagnóstico de problemas de desempenho não é padronizado entre os especialistas da empresa-alvo e não existe uma ferramenta de suporte informatizada que auxilie os novos engenheiros e técnicos com pouca experiência na implantação de novos modelos de compressores. Como resultado, as análises levam mais tempo que o necessário. Um diagnóstico correto leva, geralmente, menos de uma semana para ser comprovado, após o compressor ser analisado, remontado e as repetições dos testes de desempenho concluídas. Enquanto um diagnóstico errado pode tirar a atenção da equipe de projeto por várias semanas, até que, num processo de tentativa e erro, se encontre a causa fundamental do problema. Desta forma, quando não assistido por especialistas mais experientes, um diagnóstico não adequado atrasa o processo de implantação de novos compressores.

Também há necessidade de construção de uma ferramenta que facilite o compartilhamento do conhecimento e experiência dos especialistas e pesquisadores para outras áreas da empresa e para outras plantas. Para reduzir estes problemas, este trabalho propõe a construção de um Sistema Especialista, cujo objetivo principal é ser uma

ferramenta de suporte ao diagnóstico de problemas de baixo desempenho em compressores herméticos.

### 3.2 CONCEITOS BÁSICOS DE SISTEMAS ESPECIALISTAS

Sistemas Especialistas (SEs) são programas de computadores projetados para emular o conhecimento de especialistas em áreas específicas do conhecimento humano (Kendal, 2007). Espera-se que o SE ofereça suporte ou dê apoio às decisões sobre determinado tipo de problema ou domínio e explique os resultados obtidos.

A estrutura de um SE pode ser representada conforme o esquema da Figura 3.1. Onde a base de conhecimento representa a memória de longo prazo (regras) e também pode estar parcialmente representada no conjunto de instâncias – objetos que compõem o sistema, o motor de inferência representa o processador cognitivo e a memória de trabalho representa a memória de curto prazo. A agenda é o conjunto das regras (ainda não executadas) que tiveram suas condicionais satisfeitas pelos fatos ou objetos da memória de trabalho. O mecanismo de aquisição do conhecimento permite ao usuário inserir de forma automática conhecimento no sistema. A estrutura se completa com um mecanismo que explica as razões encontradas pelo SE para suas conclusões e, finalmente, com uma interface de comunicação com o usuário.

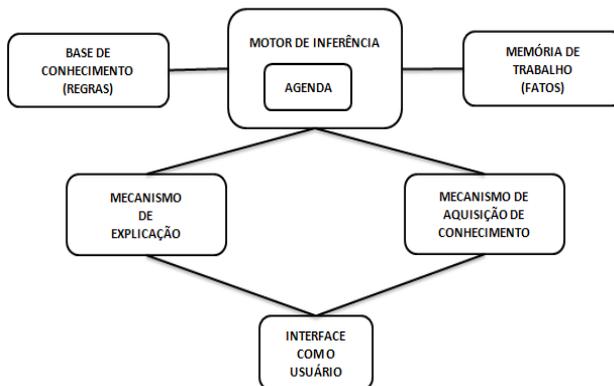


Figura 3.1- Representação da estrutura de um SE. Adaptado de Giarratano e Riley (1998).

O conjunto das inferências que conectam o problema à solução é chamado de encadeamento. No encadeamento direto, o SE trabalha para encontrar as soluções que corroboram os fatos ou objetos, enquanto no encadeamento reverso, o SE trabalha para encontrar os fatos que satisfazem as hipóteses (Giarratano; Riley, 1998). Sistemas Especialistas desenvolvidos para diagnóstico de problemas similares ao apresentado neste trabalho, geralmente, utilizam o encadeamento reverso.

A representação do conhecimento deve ser feita com a utilização de técnicas e ferramentas que mais fielmente reproduzam a forma do especialista pensar e pode ser feito através de regras de produção, redes semânticas, modelagem por objetos ou uma combinação destas técnicas.

Para implantação de Sistemas Especialistas, normalmente, é aplicado o modelo de ciclo de vida incremental (Giarratano; Riley, 1998), cuja idéia básica é desenvolver o sistema com base em incrementos de sua funcionalidade, aumentando sua amplitude, porém disponibilizando o mesmo em profundidade, com todas as fases do ciclo de desenvolvimento de um sistema especialista, até a validação. A Figura 3.2 mostra um esquema do modelo incremental para desenvolvimento de sistemas em geral que engloba as fases de identificação dos requisitos, projeto do sistema protótipo, implementação do protótipo e, finalmente, avaliação do sistema para cada ciclo de incremento implementado.

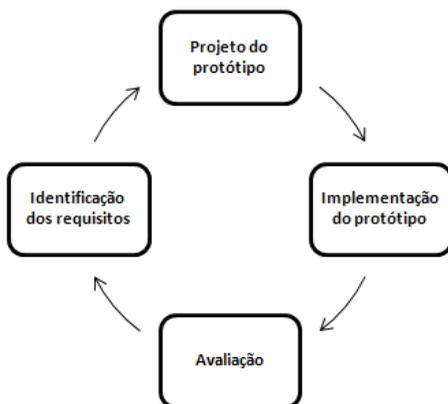


Figura 3.2- Modelo incremental para desenvolvimento de sistemas. Adaptado de Kendal e Creen (2007).

Para implantação do SE, objeto deste trabalho, foi também aplicado o modelo de ciclo de vida incremental e seu processo de implantação foi dividido em dois ciclos, conforme é apresentado no capítulo 4. O primeiro ciclo mapeou diagnósticos para problemas de desempenho de compressores relativos aos atributos de capacidade de refrigeração e consumo de potência e o segundo ciclo adicionou diagnósticos relacionados a problemas de ruído e mínima tensão de partida.

Segundo Liebowitz (1988), para construção de um sistema especialista, recomenda-se usar uma metodologia específica que é composta pelos seguintes passos: seleção do problema a ser resolvido pelo SE, aquisição do conhecimento, representação do conhecimento, implementação (codificação), avaliação e testes (verificação e validação), implementação e manutenção. Podemos citar os trabalhos recentes de Lopes (2008), Mecabô (2007), Matelli (2008) e Massirer (2007) que aplicaram esta metodologia para desenvolvimento de protótipos de Sistemas Especialistas. Nestes trabalhos, os autores seguiram os passos recomendados pela metodologia, elaboraram uma documentação adequada e enfatizaram os pontos mais relevantes que fizeram com que a implantação dos SEs fosse bem sucedida.

SEs podem ser implementados empregando-se uma linguagem de programação (ex.: LISP, PROLOG, C) ou através de um ambiente Shell, cuja utilização torna a codificação com menor custo e mais simplificada. No ambiente Shell, a estrutura do SE está previamente montada com seus componentes principais e faz-se necessário adicionar a base de conhecimento e as regras, assim como uma interface específica, caso necessário. O CLIPS (*C Language Integrated Production System*) é um ambiente Shell do tipo livre, frequentemente, usado na programação de Sistemas Especialistas. Ele foi desenvolvido pelo Departamento de Inteligência Artificial do Centro Espacial Johnson da NASA, em 1986, e continua sendo mantido e atualizado com frequência (Giarratano, 2002).

### 3.3 SISTEMAS ESPECIALISTAS E MÉTODOS DE DIAGNÓSTICOS DE FALHAS CORRELATOS COM ESTE TRABALHO

Sistemas Especialistas têm sido empregados, desde a década de 70, para resolver uma gama ampla de problemas, em vários domínios

do conhecimento humano. Podemos citar aplicações em funções de diagnóstico, análise de dados, planejamento, projeto, análises, monitoramento, aquisição de conhecimento, gerenciamento e programação automática, entre outras (Liebowitz, 1988). A seguir, é apresentado um sumário dos recentes trabalhos desenvolvidos sobre domínios correlatos ao desta dissertação.

Lopes (2008) apresenta um SE protótipo de apoio ao projeto de condicionadores de ar domésticos para suportar os ensaios de determinação da carga de gás refrigerante e o dimensionamento do tubo capilar de condicionadores de ar. O SE é direcionado para orientar técnicos pouco experientes e visa acelerar o processo de tomada de decisão durante os ensaios de desenvolvimento de condicionadores de ar. O projeto deste SE utilizou o modelo incremental de desenvolvimento e modelagem orientada a objetos e a representação do conhecimento foi feita com base em regras de produção, juntamente com orientação a objetos. Observa-se um estreito relacionamento entre o engenheiro do conhecimento e o especialista, nas diversas fases do desenvolvimento do protótipo, o qual contribuiu de maneira significativa pelos resultados satisfatórios de saída apresentados pelo SE.

Este SE manipula quatro parâmetros de projeto e apresenta 81 possíveis combinações de saída. Um exemplo de aplicação deste SE está na Figura 3.3, a qual mostra uma das saídas transmitidas ao usuário. Após inferência sobre os dados de entrada, o SE conclui que as temperaturas medidas não estão de acordo com as especificadas pelo projeto e recomenda realizar um novo teste com o ar condicionado protótipo, após aumentar a carga de gás refrigerante de 500 para 520 g.

**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 evaporação MEDIDA foi de: 11 °C  
 A temperatura de condensação 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 o  
 Delta SH medido 12 C está MAIOR que  
 O Delta SH de projeto 10 C.  
**Realizar novo teste com a nova carga de gás!**

Figura 3.3- Dados de saída do SE para aumento da carga de gás (Lopes, 2008).

Outro resultado comum de diagnóstico para o ensaio do condicionador de ar é a necessidade de aumentar ou reduzir a vazão de refrigerante do ar condicionado, para que a capacidade de refrigeração e as temperaturas de projeto sejam atendidas. Neste caso, o SE recomenda fazer alterações no comprimento ou no diâmetro interno do tubo capilar do sistema.

Mecabô (2007) mostra o desenvolvimento de um protótipo de SE para apoio à manutenção de turbocompressores centrífugos de gás natural. Este SE tem o objetivo de permitir a redução dos custos de operação e manutenção, através da maior precisão na identificação das causas de perdas de eficiência destas máquinas. O ponto principal é determinar de forma mais precisa quando a manutenção preventiva

deve ser realizada, com base no desempenho termodinâmico do turbocompressor. Este SE também foi desenvolvido com modelagem orientada a objetos e regras de produção e inclui uma representação da incerteza utilizando o método de Dempster-Shafer. Os arquivos de saída apresentam formato “html” para facilitar a visualização nos navegadores da internet.

Matelli (2008) relata trabalho desenvolvido em sistemas baseados em conhecimento, para serem usados nas fases preliminares de projeto de plantas de cogeração a gás natural, o qual resulta em dois protótipos de sistemas computacionais. Um sistema baseado em técnicas de SE e outro em raciocínio baseado em casos. Os resultados mostram que a integração das duas técnicas gera uma metodologia mais completa do que o uso de cada uma das técnicas isoladas, resultando em um sistema capaz de autoaprendizado. Nos protótipos computacionais, o usuário comunica-se com o sistema através de interface gráfica, que foi implementada em Delphi, e os arquivos de saída são gerados em “html”. A base de conhecimento, como nos dois trabalhos anteriormente comentados, foi implementada com modelagem orientada a objetos e regras de produção.

Massirer (2007) reporta o desenvolvimento de um protótipo de SE destinado à verificação da conformidade da lista de engenharia de materiais (bill of material-*BOM*) para motores elétricos, a qual é gerada com base nos requisitos do cliente, nos componentes padronizados disponíveis na produção e nos componentes especiais (novos). O processo de verificação da *BOM* é necessário para evitar custos de reprocesso na produção dos motores, ou ainda, quando é mais custoso para a empresa, quando os problemas chegam ao campo (cliente). Segundo o processo de desenvolvimento de produtos daquela empresa-alvo, a partir desta verificação, a *BOM* é liberada para produção do motor elétrico. No processo de verificação, o SE gera mensagens explicativas sobre os diagnósticos, alertas e mostra os erros detectados. Este SE usa encadeamento direto, regras de produção e programação orientada a objetos. O relato mostra a utilização de um banco de dados já existente na empresa como suporte para interface de entrada. O SE lê os dados do banco e grava-os em formato “xml”, os quais são convertidos em formato “txt” antes de serem carregados pelo CLIPS. Os resultados de saída do SE são apresentados em formato “html”, gravados em um arquivo “xls” e armazenados para formação de estatísticas dos problemas analisados pelo SE.

Os trabalhos de Massirer (2007), Matelli (2008), Mecabô (2007) e Lopes (2008), comentados anteriormente, foram todos desenvolvidos

no programa de pós-graduação do POSMEC. A seguir, são expostos sumários de alguns trabalhos publicados em outras instituições.

Liu *et al.* (2001) apresentam um SE construído em Microsoft Visual Basic e ambiente Windows para diagnosticar problemas em compressores de ar condicionado automotivo, que tem o objetivo de emular o conhecimento e a experiência dos mecânicos de automóveis. O SE elabora diagnóstico sobre problemas do compressor para quatro sintomas: travamento, ruído, vazamento e baixo desempenho. O compressor é dividido em cinco subsistemas: correia, válvula, cilindro, placa e núcleo. A partir destes subsistemas, o autor faz o desdobramento para os principais componentes de cada subsistema, conforme é mostrado na Figura 3.4. O SE foi construído a partir de uma árvore de diagnóstico, a qual tem correspondência com a hierarquia funcional dos principais componentes do compressor mostrados na Figura 3.4 e que podem ser os responsáveis pela falha.

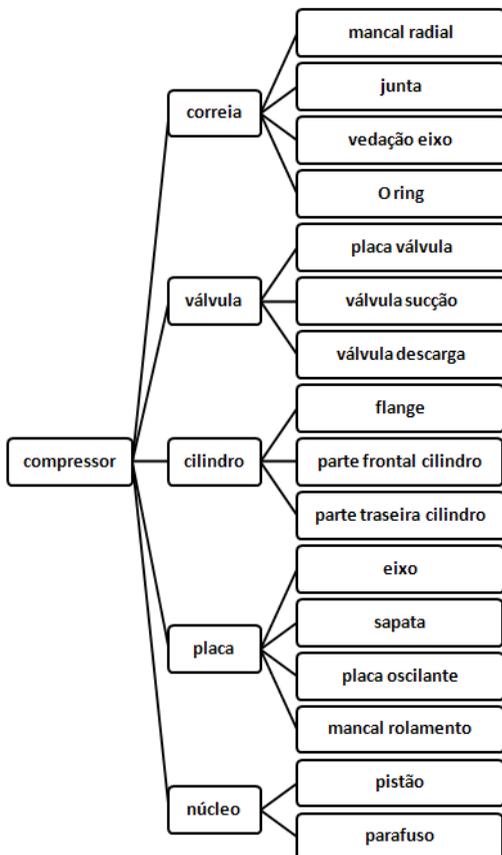


Figura 3.4- Estrutura para árvore de diagnóstico. Adaptado de Liu *et al.* (2001).

Neste SE, um método de tomada de decisão baseado em lógica “fuzzy” é usado para determinar a prioridade de diagnóstico para os componentes da árvore, com base nas informações disponíveis de probabilidade de falha, tempo de diagnóstico e complexidade do trabalho de diagnóstico, quando analisado por um especialista. O processo de inferência começa com o dispositivo que tem maior probabilidade de falhar e termina com o dispositivo com a menor probabilidade.

No trabalho desenvolvido para esta dissertação, optou-se por usar uma abordagem de desdobramento do sistema compressor hermético

para refrigeração doméstica, utilizando ferramentas e técnicas desenvolvidas pelo método da síntese funcional, conforme é exposto no capítulo 4.

Kaya *et al.* (2008) apresentam um programa convencional (não é um SE, pois a abordagem é algorítmica) para diagnóstico de problemas comuns para compressores herméticos, através da medição de ruído e vibração, sem a necessidade de desmontagem dos compressores. Ferramentas de redes neurais são aplicadas para o diagnóstico, após a alimentação de dados de ruído relacionados a diferentes tipos individuais de falhas e também com dados de compressores considerados com desempenho padrão. São estudadas falhas na câmara de sucção, tubo de descarga, mola de compressão e motor elétrico, sendo que as falhas originadas na câmara de sucção e no motor elétrico foram mais facilmente identificadas, segundo os dados obtidos. Falhas originadas no tubo de descarga e nas molas de compressão apresentaram maiores dificuldades de identificação.

Li *et al.* (2004) relatam o desenvolvimento de programa convencional (não é um SE, pois a abordagem é algorítmica) para diagnóstico de múltiplas falhas que ocorrem simultaneamente em sistemas de ar condicionados por compressor de vapor. É desenvolvida uma modelagem matemática para o tratamento das falhas, utilizando decomposição e tratamento estatístico para identificar as causas mais prováveis. Testes de sensibilidade mostram que as falhas individuais podem ser identificadas antes que elas causem queda de 5% na capacidade de refrigeração e na eficiência do sistema de refrigeração.

Na literatura, encontram-se também diversos Sistemas Especialistas destinados a dar suporte ao processo de projeto de compressores. Sung *et al.* (1994) apresentam um SE para suporte ao projeto de sistema de válvulas de compressores e outro SE para suporte ao projeto básico de compressores, ambos com foco nos aspectos termodinâmicos do projeto de compressores. Shih *et al.* (1994) relatam o desenvolvimento de um SE para suportar o projeto de cabeçotes de compressores e Qiao *et al.* (1994) reportam um SE para otimização de projeto de compressores tipo Scroll.

Os conceitos básicos de SE revistos no início deste capítulo e os resumos dos trabalhos descritos até o momento formaram as referências para o projeto e construção do SE proposto, objeto desta dissertação. Ele tem como objetivo reduzir as dificuldades encontradas por analistas no processo de diagnósticos das falhas, permitindo redução do tempo e custo destas análises, além de facilitar o compartilhamento do conhecimento e experiência dos especialistas e pesquisadores para

outras áreas da empresa e para outras plantas, as quais estão localizadas no exterior. Este sistema poderá ser usado por engenheiros e técnicos que trabalham no processo de implantação de novos compressores e que também atuam para resolver os problemas de qualidade (baixo desempenho dos compressores) na fábrica.

### 3.4 PROTÓTIPO INICIAL DESENVOLVIDO COMO ESTUDO DE VIABILIDADE

De forma a verificar a adequação da metodologia de SE proposta para abordagem do problema de diagnóstico de problema de desempenho em compressores herméticos, foi desenvolvido uma versão protótipo durante a disciplina de Sistemas Especialistas aplicados à Engenharia oferecida pelo POSMEC, no primeiro trimestre de 2010. O escopo deste protótipo foi limitado à identificação dos subsistemas do compressor que têm mais possibilidades de serem os responsáveis pelas causas de problemas de capacidade de refrigeração e consumo de potência, a partir dos dados dos resultados de testes de desempenho obtidos para um determinado compressor (EMB 40 CLC 220-240V/50Hz), produzido pela empresa-alvo.

Para este SE protótipo, escolheu-se para representação do conhecimento uma combinação de regras, modelagem por objetos e redes semânticas, e o código foi desenvolvido no sistema CLIPS (Giarratano, 2002), que se mostrou adequado e flexível para o escopo do trabalho.

Como parâmetros de entrada para o SE protótipo têm-se: capacidade de refrigeração, consumo de potência, nível de potência sonora e vazamento pelo sistema de descarga.

Neste momento da análise de desempenho, o esforço é feito no sentido de elaborar o diagnóstico para os desvios de desempenho do compressor, antes de tomar qualquer ação no sentido de desmontá-lo e, portanto, caso necessário, pode-se submetê-lo novamente aos testes de desempenho. Em alguns casos, os resultados obtidos nos testes de desempenho são inconsistentes e não podem ser explicados, naturalmente, por desvios de qualidade nos componentes do compressor. O problema está relacionado a erros de operação cometidos durante as medições de desempenho do compressor e, portanto, ao sistema de medição. Se for este o caso, o diagnóstico correto do SE deve ser para sugerir a repetição dos testes no compressor hermético.

Cada parâmetro de entrada (atributos de desempenho) foi dividido em níveis, para facilitar a entrada de dados pelo usuário do sistema (baixo, médio e alto), conforme Tabela 3.1. Para cada nível, foi apresentada uma faixa de valores, a qual é comparada pelo usuário com o resultado de desempenho obtido no teste para o compressor em análise, antes de efetuar a escolha do nível adequado.

Tabela 3.1- Dados de entrada para capacidade e consumo. Fonte: Whirlpool – Unidade de Compressores.

Opção	Capacidade de refrigeração	Nível
[1]	acima de 129 W	alto
[2]	de 127 a 129 W	médio
[3]	abaixo de 127 W	baixo

Opção	Consumo de potência	Nível
[1]	acima de 70 W	alto
[2]	de 68 a 70 W	médio
[3]	abaixo de 68 W	baixo

Opção	Potência sonora	Nível
[1]	acima de 37 dB(A)	alto
[2]	abaixo de 37 dB(A)	baixo

Opção	Vazamento pela descarga	Nível
[1]	acima de 100 mbar/s	alto
[2]	abaixo de 100 mbar/s	baixo

Após a entrada de dados, o SE verifica quais as regras que satisfazem os níveis escolhidos para os resultados dos testes de desempenho em relação aos valores especificados e, em seguida, gera o diagnóstico, indicando os subsistemas que podem estar causando o problema. Ele também faz comentários sobre os possíveis desvios de qualidade nos componentes associados com o diagnóstico efetuado. Tem-se um total de 36 possíveis combinações de entrada e o SE trabalha com 22 combinações de saída, como os exemplos apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2- Entrada X Saída para o SE.

		Resultado de desempenho X parecer do SE		
		teste (1)	teste (2)	teste (3)
capacidade de refrigeração	W	baixa	média	alta
consumo de potência	W	médio	alto	baixo
nível de potência sonora	dB(A)	baixo	alto	baixo
vazamento	mbar/s	alto	baixo	alto
Saída: sub-sistema com mais possibilidade de ser responsável pelo baixo desempenho		sistema de descarga (capacidade baixa)	kit mecânico motor elétrico (alto consumo)	sistema de medição (repetir testes)

No teste (1), os resultados de baixa capacidade, consumo médio, vazamento alto e ruído baixo, levam o SE a concluir que a causa da baixa capacidade está ligada ao funcionamento inadequado do sistema de descarga, principalmente, devido ao vazamento alto. A baixa capacidade de refrigeração associada com vazamento alto no sistema de descarga pode ser causada, principalmente, pela baixa qualidade de acabamento do anel de descarga, pelo empenamento excessivo da válvula de descarga ou torque dos parafusos do cabeçote abaixo do especificado.

Para o teste (2), o kit mecânico e o motor elétrico são os subsistemas responsáveis, principalmente, devido à combinação com ruído alto. No motor, o alto consumo pode ser causado, principalmente, por folga radial abaixo do especificado. Outras causas no motor podem ser: aço elétrico com perdas acima do especificado, diâmetro do fio de cobre/Al abaixo do valor especificado, resistência ôhmica do estator fora do especificado, excesso de bolhas ou gaiola interrompida no rotor, anel de Al do rotor com altura abaixo do valor especificado, rotor em contato com bloco e, finalmente, pacote do estator/rotor com altura abaixo do especificado (falta de lâminas).

E no teste (3), a conclusão do SE é que, provavelmente, houve erro de medição, pois esta combinação de dados é altamente improvável.

A validação deste SE foi realizada através de análises comparativas do histórico de investigações de diagnóstico de causas de baixo desempenho deste modelo de compressor com as saídas disponibilizadas pelo SE, as quais se mostraram satisfatórias e alinhadas. Também foi realizada uma validação das respostas por dois especialistas de produtos que trabalham no desenvolvimento de

compressores para refrigeração doméstica, os quais confirmaram a assertividade dos diagnósticos do SE, assim como confirmaram a validade de se ter um SE como suporte para o processo de desenvolvimento de compressores.

As análises realizadas e os resultados obtidos com o SE demonstram que o sistema tem potencial para ser usado como ferramenta de suporte por engenheiros e técnicos que trabalham no processo de implantação de novos compressores e na busca de solução dos problemas de qualidade (baixo desempenho dos compressores) na fábrica, assim como para treinamento dos novos entrantes. Ademais, ficou demonstrado que o sistema poderia ser expandido para elaboração de diagnósticos relacionados a outros atributos de desempenho, como mínima tensão de partida e nível de potência sonora. Pelos resultados obtidos e pela real possibilidade de sua expansão, a empresa-alvo considerou adequada a continuidade do trabalho como tema desta dissertação de mestrado.

Este capítulo mostrou um resumo dos principais conceitos relacionados a SEs e como eles foram aplicados no desenvolvimento do SE para diagnóstico de problemas em compressores herméticos. Também foi apresentada uma revisão da literatura disponível sobre SEs com domínios correlatos a esta dissertação. No próximo capítulo, o desenvolvimento do SE é exposto, juntamente com a metodologia adotada e os resultados obtidos com a conclusão do mesmo.

## 4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA ESPECIALISTA

O objetivo deste capítulo é apresentar o desenvolvimento do SE, a metodologia adotada, as ferramentas e técnicas utilizadas para aquisição e representação do conhecimento, as informações pertinentes ao código computacional desenvolvido e, finalmente, uma discussão dos resultados obtidos.

A metodologia de pesquisa adotada para solução do problema apresentado, cujo objetivo é obter uma ferramenta de suporte ao diagnóstico de problemas de baixo desempenho em compressores herméticos, é a de desenvolvimento de um SE.

Para implantação do SE, foi aplicado o modelo de ciclo de vida incremental (Giarratano; Riley, 1998), e seu processo de implantação foi dividido em dois ciclos.

O primeiro ciclo mapeou diagnósticos para problemas de desempenho relativos aos atributos de capacidade de refrigeração e consumo de potência, porque estes atributos são os mais comumente encontrados durante o processo de desenvolvimento e implantação de compressores para refrigeração doméstica.

O segundo ciclo adicionou diagnósticos de problemas relacionados ao nível de potência sonora (ruído) e mínima tensão de partida, os quais também são comuns, porém, aparecem com menor frequência que os problemas de capacidade de refrigeração e consumo de potência. Acrescenta-se que os diagnósticos relativos aos problemas de ruído são considerados mais complexos para implantação, devido à necessidade de interpretação, pelo SE, dos resultados do nível de potência sonora, para cada uma das bandas de 1/3 de oitava do espectro de frequência e, portanto, as lições aprendidas na implantação do primeiro ciclo de funções foram usadas para reduzir o tempo de implantação do segundo ciclo. Observa-se ainda que o SE desenvolvido aplica a metodologia de inferência por encadeamento reverso.

### 4.1 ESCOPO, ENTRADAS E SAÍDAS DO SE

Este SE foi desenvolvido para dar suporte ao diagnóstico de problemas que surgem, principalmente, durante as fases de desenvolvimento e implantação de novos modelos de compressores

herméticos e que afetam os atributos de desempenho. Neste período do ciclo de desenvolvimento de produto do compressor, as especificações para os atributos de desempenho já são conhecidas, de forma definitiva ou preliminar, em função dos ensaios de desempenho realizados nas fases anteriores do projeto. Estes problemas estão diretamente relacionados aos desvios de qualidade mais comumente encontrados nos componentes do compressor e ou em seu processo de montagem. Este SE não foi desenvolvido para suportar os processos relacionados à especificação incorreta dos componentes ou problemas relativos ao projeto inadequado do compressor.

A primeira restrição de escopo está relacionada ao tipo do compressor e este SE foi desenvolvido para elaborar diagnósticos de desempenho para compressores herméticos de refrigeração doméstica que estão de acordo com as características a seguir:

- compressor alternativo com pistão de simples efeito;
- mecanismo de acionamento: biela-manivela;
- sistema de lubrificação: mancal hidrodinâmico nos mancais radiais e rolamento no mancal axial;
- refrigerante: R600a;
- faixa de capacidade de refrigeração: de 40 a 220 W (medido de acordo com as condições de teste CECOMAF ou ASHRAE);
- faixa de eficiência: de 1,20 a 2,10 W/W (medido de acordo com as condições de teste CECOMAF ou ASHRAE);
- tipo de motor elétrico: de indução, assíncrono, monofásico e com 2 polos;
- rotação do motor: fixa;
- alimentação da rede elétrica: 220-240V e 50 Hz.

A faixa de capacidade de refrigeração descrita anteriormente (40 a 220 W) enquadra-se nos compressores denominados, no mercado de

refrigeração, como “minis”, e, em conjunto com a aplicação de R600a, representam uma fatia significativa do volume de compressores para refrigeração doméstica comercializados na Europa, Ásia e Austrália, devido a este ser o refrigerante mais comumente usado nestes mercados.

Com relação à abrangência do diagnóstico, limitou-se o escopo deste trabalho ao seguinte conjunto de atributos de desempenho:

- capacidade de refrigeração;
- consumo de potência;
- nível de potência sonora e
- mínima tensão de partida.

Como é apresentado adiante, o SE pode ser expandido para análise e elaboração de diagnósticos para outros atributos de desempenho do compressor hermético, como nível de vibração (ver capítulo 2, item 2.3 para as definições dos atributos de desempenho para o compressor hermético). Conforme já comentado na introdução deste capítulo, o SE foi implementado em dois ciclos, sendo que o primeiro ciclo pertence ao grupo de funções para diagnóstico relativo aos problemas de capacidade de refrigeração e consumo de potência e o segundo ciclo ao grupo de funções correspondente aos problemas de ruído e mínima tensão de partida.

Os dados de entrada solicitados pelo SE exigem dois conjuntos de atributos de desempenho de compressor. O primeiro conjunto de entradas representa os valores especificados de desempenho do compressor, os quais foram obtidos nas fases anteriores de desenvolvimento do produto. O segundo conjunto de atributos é composto pelos resultados obtidos nos testes de desempenho do compressor, objeto da análise e que motiva o usuário do SE a consultar um especialista.

Para fazer o diagnóstico de problemas relacionados aos atributos de capacidade de refrigeração e consumo de potência, os dados de entrada necessários são os mais comumente usados para avaliar o desempenho de compressores herméticos, os quais são obtidos em testes específicos, a saber:

- capacidade de refrigeração, em ASHRAE ou CECOMAF;
- consumo de potência, em ASHRAE ou CECOMAF e
- nível de potência sonora total, em ASHRAE ou CECOMAF.

De forma a melhorar a qualidade de diagnóstico para os resultados de calorímetro (capacidade de refrigeração e consumo de potência), o SE também solicita que o usuário entre com os dados do teste de vazamento pelo sistema de descarga, que é um teste comumente utilizado para avaliar a qualidade da estanqueidade do sistema de descarga do compressor. A Tabela 4.1 mostra um exemplo dos dados de entrada para o compressor EMC 40 CLC 220-240V/50Hz, produzido pela empresa-alvo e fornecido para o mercado Europeu. Pode ser observado que o valor medido de capacidade de refrigeração está 4,4% abaixo do valor especificado para este modelo, o que gera a necessidade de consulta a um especialista sobre as possíveis causas desta variabilidade. Para os demais resultados de desempenho deste exemplo mostrados na Tabela 4.1, os valores medidos estão dentro da faixa de variabilidade considerada adequada ou dentro do especificado.

Tabela 4.1- Exemplo de dados de entrada para avaliação de capacidade e consumo. Fonte: Whirlpool - Unidade de Compressores.

Atributo	Unidade	Condição teste	Especificado	Medido	Variação
Capacidade de refrigeração	W	CECOMAF	91	87	-4,4%
Consumo de potência	W	CECOMAF	65	65	0,0%
Nível de potência sonora	dB(A)	CECOMAF	34	34,5	+0,5 dB(A)
Vazamento - sistema de descarga	mbar/s	Whirlpool	100	80	-20,0%

Conforme comentado na descrição do escopo deste trabalho, o SE permite uma avaliação específica para diagnóstico das possíveis causas de problemas relacionadas ao nível de potência sonora.

Este SE não elabora diagnósticos para testes de ruído com resultados abaixo do valor especificado, em virtude dos problemas mais comumente presentes durante o desenvolvimento e implantação de novos compressores estarem relacionados a resultados com nível de potência sonora acima do especificado. Esta funcionalidade pode ser implementada no futuro, sem comprometer o presente trabalho, tornando o SE mais completo.

De forma a permitir que o SE faça inferência sobre os subsistemas e componentes responsáveis pelo alto nível de ruído, é necessário alimentá-lo com os resultados de medição do nível de potência sonora por banda de frequência de 1/3 de oitava, em dB(A), conforme indicado pela Figura 4.1. Para cada banda, tem-se os resultados de ruído especificados e medidos e no final do espectro é mostrado o cálculo do ruído total irradiado pelo compressor. Este é o resultado da soma das pressões sonoras de cada banda de 1/3 de oitava e da conversão deste resultado em dB(A) (ver capítulo 2, item 2.3.2, para cálculo do ruído total).

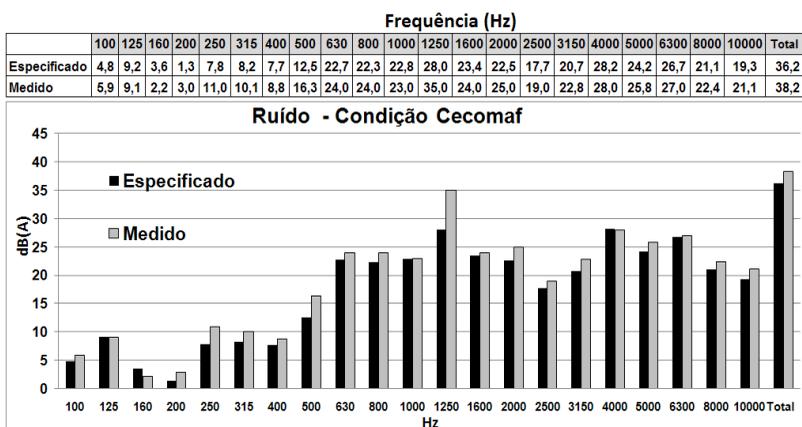


Figura 4.1- Espectro de frequência - dados de entrada de ruído.

Na maioria dos diagnósticos relacionados a problemas de ruído, o usuário está interessado em apenas uma região do espectro de frequência e não em analisar o espectro inteiro. Assim, de forma a aprimorar o processo de entrada de dados e análise do SE, o espectro de frequência foi dividido em 3 regiões, a saber:

- baixa frequência: de 100 a 400 Hz;
- média frequência: de 500 a 2000 Hz e
- alta frequência: de 2500 a 10000 Hz.

Para os dados de entrada mostrados no exemplo da Figura 4.1, o usuário, normalmente, está interessado na análise de ruído de média frequência, especialmente devido ao pico no nível de potência sonora em 1250 Hz e espera que o SE elabore um diagnóstico sobre este nível de ruído (similar, alto, mais baixo que o especificado) e que contenha os subsistemas e componentes responsáveis pelo nível alto de ruído, caso este seja confirmado.

A entrada de dados para diagnóstico de problema de mínima tensão de partida tem duas opções, a saber: (1) entrada de dados somente com dados de mínima tensão de partida ou (2) com dados de partida e calorímetro. Na segunda opção, o usuário precisa conhecer os resultados de mínima tensão de partida, capacidade de refrigeração e consumo de potência.

O número de cenários previstos para o SE considera todas as possíveis combinações para os dados de entrada em função dos atributos de desempenho, conforme apresentado na Tabela 4.2. O usuário entra com os valores especificados e medidos nos testes de desempenho e o SE estabelece o nível do atributo (baixo, similar, alto).

Tabela 4.2- Número de cenários de entrada para o SE.

Atributos	Entradas do SE	Cenários
capacidade de refrigeração consumo de potência	capacidade (alta, similar, baixa) consumo (alto, similar, baixo) ruído total (alto, similar, baixo) vazamento (alto, similar, baixo)	81
ruído por região do espectro	ruído em baixa frequência (alto, similar/baixo) ruído em média frequência (alto, similar/baixo) ruído em alta frequência (alto, similar/baixo)	39
mínima tensão de partida	consumo (alto, similar, baixo, desconhecido) partida (alto, similar, baixo, não gira)	16
<b>Total</b>		<b>136</b>

Para cada diagnóstico solicitado pelo usuário ou conjunto de dados de entrada alimentados, o SE apresenta as seguintes saídas:

- identificação, na forma textual, dos subsistemas do compressor que têm maiores possibilidades, segundo os especialistas consultados, de serem os responsáveis pelo problema de baixo desempenho dos compressores;

- identificação dos componentes do compressor que podem estar com desvios de qualidade e que causaram os resultados indesejáveis;
- geração de um arquivo em formato “html” que contém: sumário com os dados de entrada, análise comparativa entre os dados de desempenho da especificação dos atributos e os resultados obtidos nos testes específicos de desempenho, o diagnóstico sobre as principais causas do problema de desempenho, um diagrama causa-efeito para cada atributo em análise e informações adicionais na forma de esquemas gráficos para suportar a identificação dos componentes em discussão.

## 4.2 AQUISIÇÃO DO CONHECIMENTO

De acordo com Liebowitz (1988), aquisição do conhecimento é o processo onde o engenheiro do conhecimento extrai do especialista os fatos e as heurísticas associadas com a tarefa a ser resolvida. Neste trabalho, a aquisição de conhecimento foi embasada na experiência profissional do autor na empresa-alvo, que foi adquirida no processo de desenvolvimento de vários novos modelos de compressores para refrigeração doméstica, além da realização de consultas a outros especialistas no processo de análise de baixo desempenho de compressores, assim como na pesquisa de relatórios técnicos disponíveis nos arquivos da empresa-alvo.

De forma a estruturar melhor o processo de aquisição do conhecimento, empregou-se uma metodologia de abordagem conforme indicado no esquema da Figura 4.2.

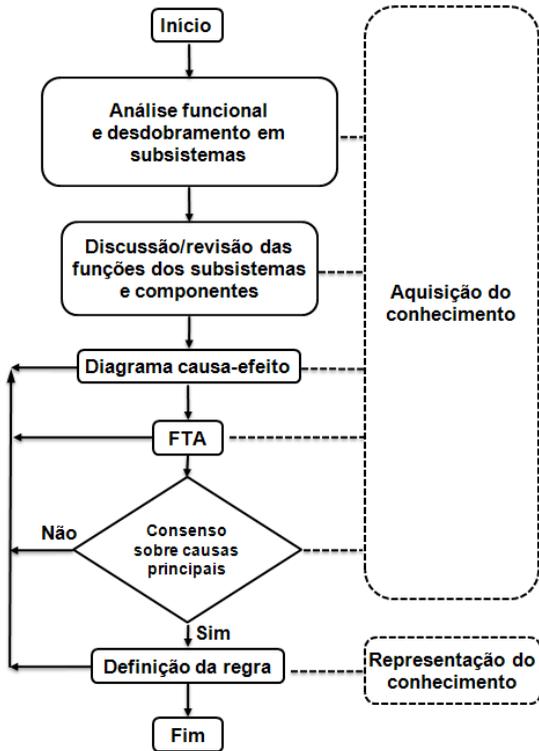


Figura 4.2- Esquema para o processo de aquisição do conhecimento.

A metodologia mostra que o problema de baixo desempenho foi abordado com suporte da análise funcional do compressor hermético, a qual representa graficamente as funções do produto e o desdobramento de seus subsistemas. A análise funcional foi usada como ferramenta para discussão sobre as funções principais dos subsistemas e seus principais componentes, conforme descrito no item 2.4. O sistema compressor foi desdobrado nos seguintes subsistemas: componentes elétricos (dispositivos de partida e proteção térmica), kit mecânico, câmara de compressão, sistema de sucção, sistema de descarga e, finalmente, subsistema para carcaça e suspensão.

A seguir, o diagnóstico das causas principais dos problemas de desempenho foi analisado com a utilização das técnicas de diagrama causa-efeito (ou diagrama de Ishikawa) e FTA (Failure Tree Analysis).

No diagrama causa-efeito são registradas as principais causas para o baixo desempenho do compressor, as quais são estruturadas em uma árvore de falhas (FTA).

A aplicação das três ferramentas mencionadas tem o objetivo de melhorar a visualização das principais causas do problema e contribuir para fomentar as discussões sobre as relações de causas e seus efeitos com os especialistas, ajudando no processo de construção da modelagem mais adequada para o baixo desempenho, associado a cada subsistema. Elas também foram usadas como guia para evitar discussões fora do escopo do trabalho e auxílio na manutenção do foco para as discussões específicas sobre os problemas de baixo desempenho.

Os diagramas de causa-efeito e FTA também foram utilizados como ferramentas de registro e documentação dos resultados das análises e discussões com os especialistas e podem ser reutilizadas em novas discussões sempre que necessário.

Com as causas mapeadas e dispostas, o processo de aquisição do conhecimento entra em um momento de decisão, que identifica para os dados de entrada em questão, qual a causa ou causas mais prováveis para o baixo desempenho e, conseqüentemente, qual o subsistema ou subsistemas responsáveis. Estabelecido o consenso, a regra de produção associada aos dados de desempenho de entrada é definida.

A Figura 4.2 também mostra que a abordagem adotada prevê um retorno ou revisão dos diagramas causa-efeito e ou FTA, caso não haja consenso entre os especialistas sobre as causas principais do problema, e uma nova rodada de análise é iniciada. No final do processo, caso haja consenso, o processo é concluído com a proposta final do diagnóstico e regra para representação deste conhecimento.

Os diagramas causa-efeito e as FTAs foram construídos com a contribuição de vários especialistas que atuam no processo de desenvolvimento de novos compressores e o resultado final foi o resumo de várias reuniões de “brainstorming” e discussões técnicas.

O diagrama causa-efeito geral (Figura 4.3) foi idealizado a partir do problema a ser investigado, que, neste caso, é o baixo desempenho nos resultados dos testes para avaliação dos atributos do compressor e apresentado no lado direito do diagrama. As causas mais prováveis são classificadas pelos subsistemas do compressor e seu sistema de medição e dispostas no lado esquerdo do diagrama.

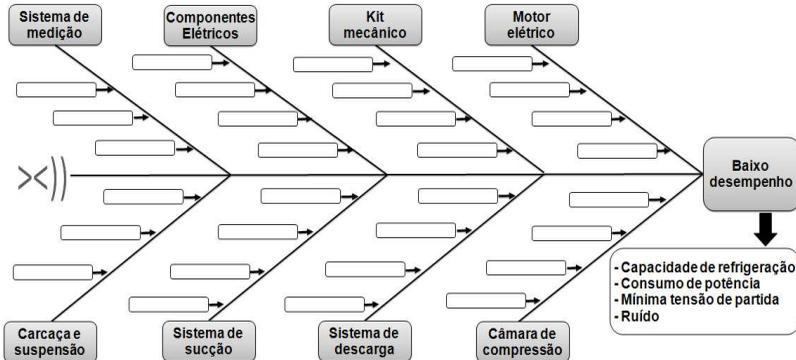


Figura 4.3- Diagrama causa-efeito geral para baixo desempenho.

A partir do diagrama causa-efeito geral, o problema foi desmembrado em outros diagramas específicos, de acordo com o atributo a ser analisado, ou seja, para capacidade de refrigeração, consumo de potência, ruído e mínima tensão de partida. O sistema de medição depende do atributo que está sendo avaliado, conforme mostrado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3- Atributos de desempenho x Sistemas de medição.

Atributo	Unidade	Sistema de medição
Capacidade de refrigeração e Consumo de potência	W	painel calorimétrico
Nível de potência sonora	dB(A)	câmara reverberante
Mínima tensão de partida	V	painel de teste de partida
Vazamento pelo sistema de descarga	mbar/s	painel de teste de vazamento

A Figura 4.4 mostra um exemplo de diagrama causa-efeito para a baixa capacidade que foi desmembrado para o sistema de descarga e contém as causas mais comuns relacionadas a este subsistema.

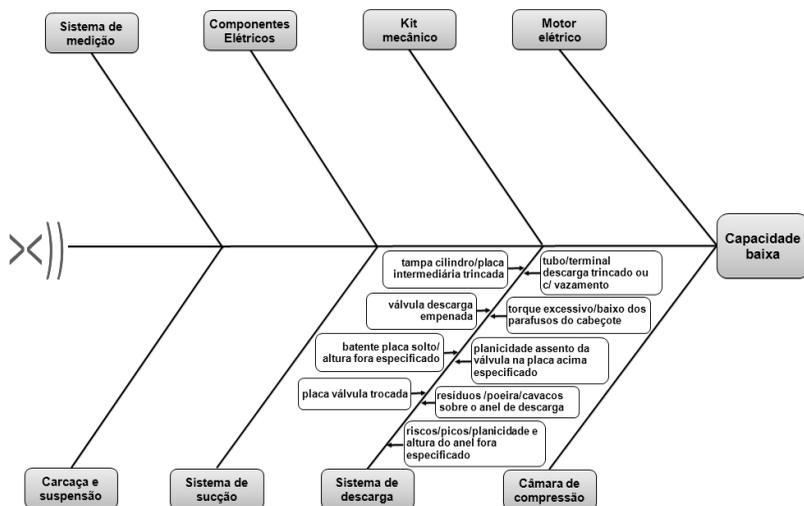


Figura 4.4- Diagrama causa-efeito para baixa capacidade referente ao sistema de descarga.

Para a construção dos diagramas de causa-efeito associados aos demais atributos de desempenho, ou seja, relacionados aos problemas de consumo de potência, nível de potência sonora e mínima tensão de partida, aplicou-se uma abordagem semelhante à descrita anteriormente para o problema de capacidade, sendo que, as causas relativas ao problema de alto consumo para o kit mecânico, necessitaram ser desmembradas em mais de um nível de detalhamento, em função dos vários componentes móveis deste subsistema. Os diagramas causa-efeito completos desenvolvidos na fase de aquisição do conhecimento deste SE estão dispostos nos Apêndices A a D.

De maneira similar ao realizado para o diagrama causa-efeito, elaborou-se uma FTA geral para suportar as análises de baixo desempenho do compressor, conforme mostrado na Figura 4.5. Para tanto, considerou-se como modo de falha o baixo desempenho do compressor, o qual pode ser originado em qualquer dos seus subsistemas.

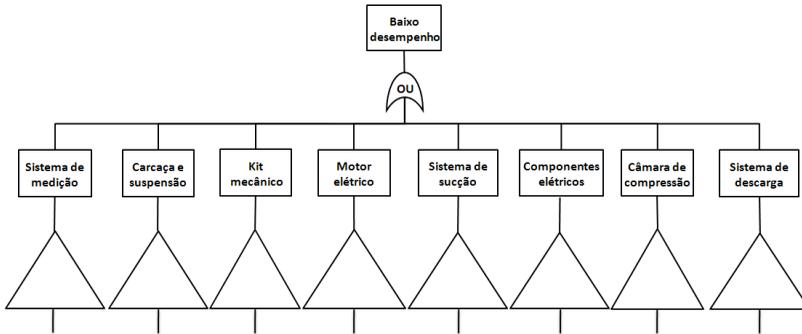


Figura 4.5- FTA geral para o baixo desempenho do compressor hermético.

Então, a partir da FTA geral do compressor, o problema também foi desdobrado em outras FTAs específicas para identificação das causas que afetam diretamente cada um dos atributos do escopo deste SE. A Figura 4.6 mostra o resultado deste processo na FTA construída para análise do problema de alto consumo, proveniente do subsistema motor elétrico. No desdobramento da FTA aparecem os componentes estator, rotor e o processo de montagem estator x rotor, assim como os desvios de qualidade associados a estes componentes.

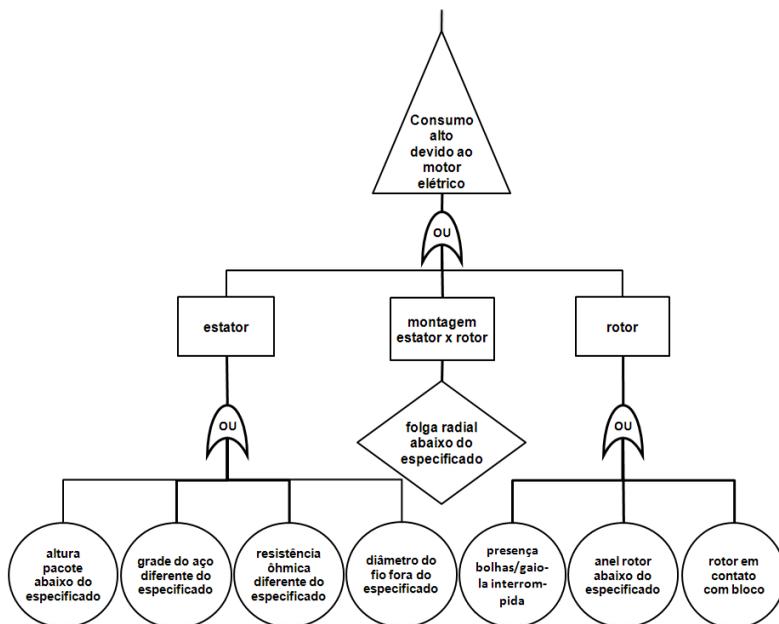


Figura 4.6- Desdobramento da FTA de alto consumo para o motor elétrico.

As FTAs completas que foram desenvolvidas na fase de aquisição do conhecimento para os atributos de desempenho do escopo deste SE podem ser consultadas nos Apêndices E a H.

Durante este processo de aquisição do conhecimento, ficou evidente a necessidade de definição de um limite específico para a razão entre o valor especificado e o valor medido e que é o valor de corte entre um resultado de atributo considerado como normal, ou um problema a ser resolvido. Os catálogos dos maiores fabricantes de compressores herméticos para refrigeração, normalmente, declaram que os atributos de capacidade de refrigeração e consumo de potência podem variar em torno de  $\pm 5\%$  em relação ao valor nominal declarado, porém estes limites são considerados exagerados durante o processo de desenvolvimento e implantação dos compressores.

A discussão consiste em estabelecer um limite entre o que pode ser considerado uma variação normal de desempenho devido às variabilidades do processo de fabricação e um problema real de desempenho. Para diferenças entre o valor especificado e o medido acima de  $5\%$ , normalmente, os especialistas que trabalham no processo

de desenvolvimento de compressores consideram que há desvios de qualidade nos componentes. Estes desvios afetam o desempenho do compressor e esta abordagem está em conformidade com os valores publicados nos catálogos. Porém, quando esta diferença é menor que 5 %, não há um consenso entre os especialistas sobre o valor de corte.

Neste trabalho, o valor de corte para capacidade de refrigeração e consumo de potência é de 3 %, enquanto que para o atributo de mínima tensão de partida é de 5 %.

Para o atributo de ruído, o valor de corte não é único, segundo os especialistas consultados e depende do nível de ruído especificado em cada banda de 1/3 de oitava. Neste trabalho, o valor de corte adotado varia de 4 a 30 % ao longo da faixa de valores aceitáveis para análise de ruído deste SE e foi definido como sendo de 5 a 45 dB(A). Esta faixa de variação está de acordo com o histórico apresentado pelos compressores do tipo “minis”, conforme comentado no item 4.1.

#### 4.3 REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO

A representação do conhecimento para este SE foi elaborada a partir de uma combinação de regras, modelagem por objetos e redes semânticas, as quais quando combinadas formam uma estrutura sólida para o desenvolvimento incremental de um SE (Silva, 1998). Neste trabalho, foram desenvolvidas duas estruturas em forma de objetos, uma para processar as informações referentes aos atributos de desempenho e outra para manipular as informações relativas aos diagnósticos emitidos para o usuário do SE, as quais são discutidas a seguir.

A Figura 4.7 apresenta uma estrutura em forma de objetos que foi desenvolvida para representar os principais atributos de desempenho de compressores herméticos para refrigeração doméstica, a saber: capacidade de refrigeração, consumo de potência, nível de potência sonora, mínima tensão de partida e vibração. Para cada atributo de desempenho, foi desenvolvido um procedimento para analisar se os valores de desempenho medidos nos testes específicos estão de acordo (similar), mais baixo, ou mais alto que a especificação. Os valores medidos e especificados, assim como os resultados das análises do nível do atributo medido (alto, similar, baixo) são as “slots” de cada atributo da classe “Resultados de Desempenho”.

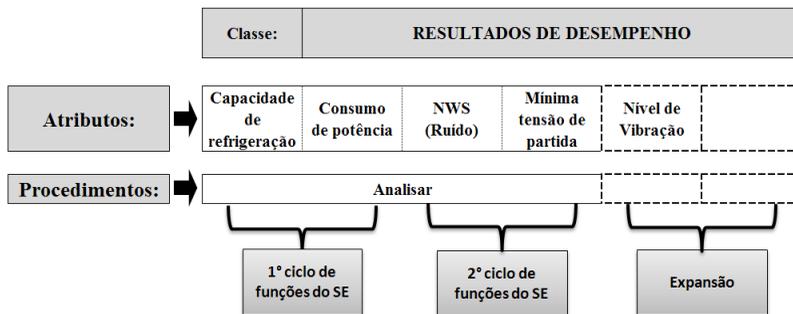


Figura 4.7- Diagrama de atributos para a classe "Resultados de Desempenho".

A estrutura da Figura 4.7 também representa a possibilidade de expansão do sistema, através da agregação de novos atributos, como nível de vibração, além de mostrar que no SE foi aplicada a metodologia incremental. O desenvolvimento do primeiro ciclo de funções do sistema foi implementado para os atributos de capacidade de refrigeração e consumo de potência e o segundo ciclo para ruído e mínima tensão de partida. Para esta classe foi desenvolvida a instância "Modelo", que representa o tipo de compressor para o qual este SE foi destinado, conforme definição de escopo comentado no item 4.1.

A segunda estrutura em forma de objetos foi desenvolvida para manipular os diagnósticos conclusivos mais importantes do SE e que se repetem para vários cenários de entrada de dados. O procedimento desenvolvido para estes atributos da classe "Diagnóstico" envia os comentários para o relatório final do SE.

Para concluir a representação do conhecimento, foi utilizado a técnica de regras de produção, as quais, segundo Liebowitz (1988), são extensivamente usadas no desenvolvimento de SEs para diagnóstico e planejamento. Em muitas situações, as regras de produção exercem a função de emular o raciocínio do especialista e, neste trabalho, com base nas análises conclusivas sobre os atributos de desempenho (baixo, similar, alto) em relação à especificação, as regras precisam encaminhar a emissão dos diagnósticos para as causas de baixo desempenho dos compressores.

A Figura 4.8 mostra um exemplo de aplicação da regra para este SE. A partir da identificação pelo SE do problema de baixa capacidade de refrigeração em relação ao especificado e com os demais dados de entrada para os outros atributos de desempenho analisados, ou seja, similar ao especificado para o consumo de potência, similar ou mais

baixo que o especificado para o nível de potência sonora e mais alto que o especificado no vazamento do sistema de descarga, é gerado o diagnóstico. Este informa quais são os subsistemas do compressor com maiores possibilidades de serem os responsáveis pela baixa capacidade, assim como identifica os componentes que podem conter os desvios de qualidade, segundo o parecer dos especialistas consultados.

É importante ressaltar que este SE não faz análise probabilística para os diagnósticos emitidos, pois não existe na empresa-alvo um banco de dados com os registros de problemas de desempenho e suas causas principais. Este banco de dados poderia ser implementado como um módulo de expansão para este SE.

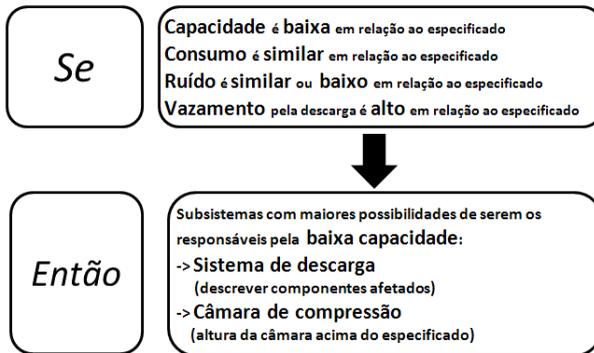


Figura 4.8- Diagrama funcional de regra sobre capacidade de refrigeração baixa.

#### 4.4 IMPLEMENTAÇÃO

A implementação de um SE consiste na criação do código computacional pelo engenheiro de conhecimento, o qual precisa traduzir a base de conhecimento desenvolvida pelo especialista e registrada na fase anterior de desenvolvimento do SE.

Neste trabalho, para implantação do SE, foi escolhido o ambiente de programação (Shell) CLIPS, versão 6.24, desenvolvido pelo Centro Espacial Johnson da NASA, devido as vantagens listadas a seguir:

- **Confiabilidade:** o sistema foi criado por uma instituição reconhecida internacionalmente e é mantido e atualizado

frequentemente. Vários trabalhos já foram implantados com o CLIPS com resultados satisfatórios.

- O programa contém todas as funcionalidades consideradas necessárias para implantação do presente SE, tais como: manipulação de regras, objetos, fatos e interface com o usuário.
- Não existe custo de aquisição para o programa, pois ele é disponibilizado gratuitamente pela internet.

Como desvantagem em utilizar o CLIPS, tem-se a restrição da interface com o usuário ser limitada a troca de informações através de textos, deixando de aproveitar as potencialidades que a interação gráfica disponibiliza nos programas modernos. Conforme comentado no item 4.1, esta desvantagem foi reduzida neste trabalho, através da geração de um arquivo para o usuário em formato “html”, que permitiu a inclusão de saídas em forma de figuras e esquemas gráficos, como forma de complementar o diagnóstico final do SE. Esta abordagem foi utilizada nos trabalhos anteriores de Matelli (2008), Mecabô (2007) e Massirer (2007).

O código computacional deste SE tem seu processo de funcionamento geral esquematicamente mostrado no fluxograma da Figura 4.9. Um diagrama funcional mais detalhado é encontrado no Apêndice J.

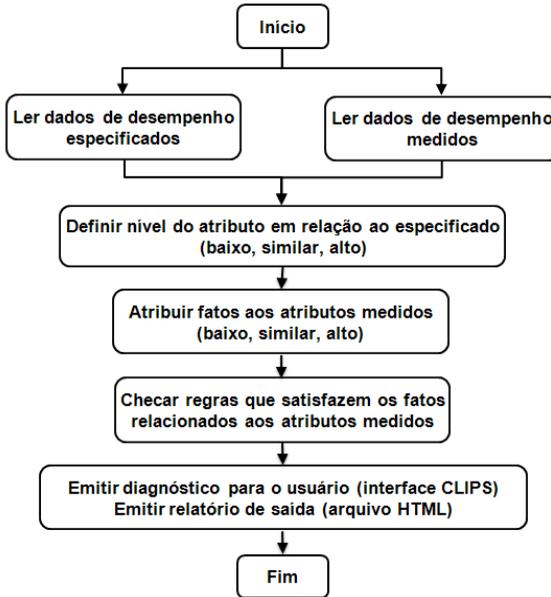


Figura 4.9- Fluxograma de processo para o SE.

O sistema começa coletando do usuário os dados de entrada, que são os dados de desempenho especificados e medidos. A seguir, é calculada a razão entre os valores especificados e medidos. Ao resultado, é atribuído à variável “Delta” e comparado com um delta limite ou delta de corte, conforme discutido no item 4.2, para então definir o nível do atributo em relação ao especificado (alto, similar, baixo) e as correspondentes atribuições dos fatos. Então, o sistema começa a examinar as regras que satisfazem os fatos atribuídos para caracterizar o nível dos atributos de desempenho (encadeamento reverso). A seguir, para as regras satisfeitas, o SE emite um diagnóstico das principais causas dos problemas de desempenho do compressor para o usuário. Neste momento, o SE tem todas as informações para gravar o relatório de saída em “html” e, finalmente, concluir o processo.

Conforme já comentado na introdução deste capítulo, o código computacional do SE foi implementado em dois ciclos, sendo que o primeiro ciclo pertence ao grupo de funções para o diagnóstico relativo aos problemas de capacidade de refrigeração e consumo de potência e o segundo ciclo ao grupo de funções correspondente aos problemas de ruído e mínima tensão de partida.

## 4.5 RESULTADOS OBTIDOS

Para ilustrar os resultados obtidos com o SE, a seguir, são apresentados dois exemplos de diagnóstico, mostrando os processos de entrada de dados, troca de informações entre o SE e o usuário, assim como o parecer final com o diagnóstico sobre o problema emitido e o relatório final em formato “html”.

O primeiro exemplo trata-se da análise de um problema de baixa capacidade de refrigeração, cuja funcionalidade foi implementada no primeiro ciclo de desenvolvimento do SE. A Tabela 4.4 contém os principais dados de entrada, mostrando os valores de desempenho especificados e medidos para um modelo específico de compressor (EMX 32 CLC 220-240V/50Hz).

O usuário entra com os valores especificados e medidos nos testes de desempenho e o SE estabelece o nível do atributo (baixo, similar, alto).

A faixa de aceitação para os atributos especificados de capacidade de refrigeração e consumo de potência estão conforme definição de escopo do SE, apresentada no item 4.1. Para os atributos medidos, a faixa de aceitação estabelecida é de 10% acima e abaixo dos valores especificados.

Portanto, na tabela 4.4 são mostrados os dados para capacidade de refrigeração, consumo de potência, nível de potência sonora e vazamento pelo sistema de descarga, assim como as análises iniciais do SE, que considerou a capacidade de refrigeração baixa em relação ao especificado. O consumo e o nível de ruído foram considerados similares e o vazamento pela descarga alto, em relação ao especificado.

Tabela 4.4- Entrada de dados para o problema de capacidade baixa.

Atributo		Unidade	Faixa de aceitação	Valor do atributo (entrada do usuário)	Nível do atributo (estabelecido pelo SE)
Capacidade de refrigeração	especificado	W	40 a 200	90	baixa
	medido		81 a 99	85	
Consumo de potência	especificado	W	40 a 71	50	similar
	medido		45 a 55	51	
Ruído total	especificado	dB(A)	25 a 45	35	similar
	medido		25 a 45	36	
Vazamento pela descarga	especificado	mbar/s	-	100	alto
	medido		20 to 900	250	

Com base nos dados de entrada apresentados na Tabela 4.4, o SE emite um diagnóstico, indicando os subsistemas do compressor que têm as maiores possibilidades de serem os responsáveis pela baixa capacidade de refrigeração, que são o sistema de descarga e a câmara de compressão, assim como comentários sobre os componentes destes subsistemas que podem estar com desvios de qualidade. Este diagnóstico, retirado do arquivo de saída, é mostrado na Figura 4.10.

Diagnóstico do SE para os dados de entrada
<p>A combinação de resultados obtidos nos testes de desempenho tem correlação com o funcionamento inadequado do(s) seguinte(s) subsistema(s):</p> <p>Subsistemas com maiores possibilidades de serem os responsáveis pela capacidade baixa:</p> <p>-&gt; Sistema de descarga:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- A baixa capacidade de refrigeração associada com vazamento alto no sistema de descarga pode ser causada principalmente pela baixa qualidade de acabamento do anel de descarga, a qual é caracterizada pela planicidade e ou altura do anel de descarga fora do especificado, ou pela presença de riscos profundos, degraus, excesso de poros, resíduos ou poeira no anel.</li> </ul> <p>Outras causas podem ser citadas como:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- empenamento excessivo da válvula de descarga;</li> <li>- planicidade do acento da válvula de descarga na placa acima do especificado;</li> <li>- torque dos parafusos do cabeçote abaixo do especificado;</li> <li>- por outro lado, o torque excessivo nos parafusos do cabeçote, pode causar empenamento da placa de válvulas, que por sua vez pode reduzir a vedação do anel de descarga x válvula, provocando vazamento excessivo;</li> <li>- a redução na capacidade pode ser provocada também pela planicidade da tampa do cilindro acima do especificado ou pela presença de trincas na mesma.</li> </ul> <p>-&gt; Câmara de compressão:</p> <p>A combinação de capacidade baixa com ruído similar ou mais baixo que o especificado tem correlação com altura da câmara de compressão acima do especificado.</p> <p>Os valores de consumo estão similares ao especificado.</p> <p>Recomenda-se iniciar o processo de análise com ações para redução do nível de vazamento pelo sistema de descarga, analisando os componentes do cabeçote listados acima, e medindo a altura da câmara de compressão.</p>

Figura 4.10- Parecer do SE para os dados de entrada da Tabela 4.4.

Conforme comentado no item 4.4, o SE gera um relatório de saída em formato “html” que contém: um sumário dos dados de entrada, o diagnóstico emitido, o diagrama causa-efeito e informações adicionais com esquemas gráficos para enriquecer o diagnóstico (Apêndice K mostra um exemplo do relatório completo).

Para os dados de entrada analisados neste exemplo, na Figura 4.11, é apresentado o diagrama causa-efeito para o baixo desempenho analisado, mostrando os subsistemas e as causas para o mesmo. As causas que aparecem em destaque (caixas hachuradas no diagrama causa-efeito da Figura 4.11) são classificadas como mais prováveis e devem ser priorizadas para investigação. As demais causas aparecem com menor frequência nos compressores analisados.

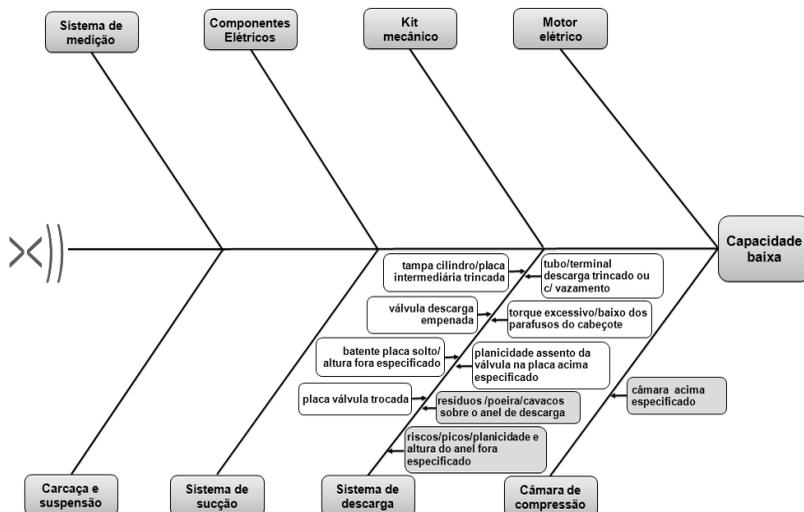


Figura 4.11- Diagrama causa-efeito para o diagnóstico da Figura 4.10.

Finalmente, o relatório de saída apresenta um esquema gráfico para auxiliar na identificação das causas consideradas mais prováveis. Para o diagrama causa-efeito da Figura 4.11, o esquema gráfico é mostrado na Figura 4.12.

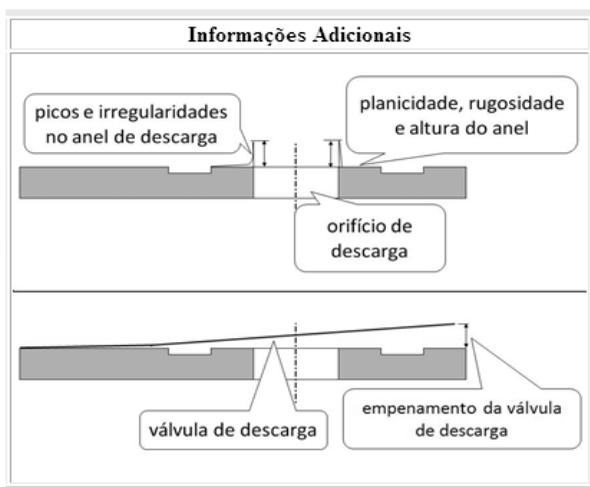


Figura 4.12- Informações adicionais para o diagrama da Figura 4.11.



fase de preparação do compressor para medição e o problema pode estar associado à utilização de um acoplamento inadequado nos passadores do compressor com o sistema de medição. Esta conexão inadequada gera um sistema resultante com massa e rigidez capaz de excitar a frequência natural lateral do compressor e gerar o alto ruído. Este diagnóstico é mostrado na Figura 4.14.

Diagnóstico do SE para os dados de entrada
<p>À combinação de resultados obtidos nos testes de desempenho tem correlação com o funcionamento inadequado do(s) seguinte(s) subsistema(s):</p> <p>-&gt; Sistema de medição:</p> <p>O ruído alto na banda de 1250 Hz está normalmente associado com a utilização de um acoplamento não adequado dos passadores do compressor com a mangueira do sistema de medição, o qual gera um sistema com massa e rigidez que excita umas das frequências naturais laterais do compressor. Recomenda-se verificar a adequação do tipo de engate utilizado com o compressor testado, assim como se o acoplamento nos passadores está montado na posição correta.</p>

Figura 4.14- Parecer do SE para o problema de ruído.

Os exemplos de diagnósticos descritos neste capítulo mostraram como o SE troca informações com o usuário e apresenta de forma estruturada os resultados das análises para os problemas de baixo desempenho de compressores. Desta forma, contribui para a orientação de engenheiros e técnicos pouco familiarizados com o processo de análise de baixo desempenho de compressores, melhorando a qualidade dos diagnósticos e proporcionando redução de tempo e custos destas análises. Outra contribuição do SE é armazenar de maneira segura e estruturada o conhecimento sobre diagnóstico de problemas de desempenho, tornando a empresa-alvo menos vulnerável ao processo de saída de especialistas mais experientes.

O processo de verificação e validação do SE é apresentado no Capítulo 5.



## 5. VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO SE

Este capítulo tem como objetivo mostrar os resultados do processo de verificação e validação do SE de diagnóstico de problemas de desempenho em compressores herméticos. Também são apresentados alguns fundamentos do processo de verificação e validação de SE e como foram empregados no desenvolvimento do SE.

### 5.1 ALGUNS CONCEITOS DE VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO

Os processos de verificação e validação são contemplados no desenvolvimento de todos os SEs e fazem parte dos procedimentos que asseguram a qualidade do mesmo. Estes processos têm os objetivos de garantir que o sistema apresente resultados corretos e esteja de acordo com às necessidades dos usuários (Gonzalez; Dankel, 1993).

A verificação confirma se o SE foi construído corretamente, ou seja, se existe consistência e coerência nas regras implementadas, em relação à base de conhecimento adquirida. Na verificação, são comumente checados os erros sintáticos (“bugs”) e a coerência lógica da programação, assegurando que a base de conhecimento está consistente com o modelo do problema proposto (Kendal; Creen, 2007). A maior parcela do processo de verificação, geralmente, é realizada durante a fase de implementação do código, através da correção dos erros, impedindo que os mesmos sejam propagados até a conclusão do desenvolvimento do SE.

O processo de validação examina o desempenho do SE, comparando a saída apresentada pelo sistema com a fornecida pelo especialista e analisa se os resultados apresentados estão de acordo com os níveis de precisão adequados (Kendal; Creen, 2007). Na validação é confirmada se a representação do domínio do conhecimento foi feita de maneira adequada e se o SE gera soluções corretas que precisam ser confirmadas por especialistas deste domínio. Além disso, na validação é analisado se o SE pode ser compreendido por um não especialista do domínio e se a interface com o usuário é amigável.

Verificação e validação possuem objetivos diferentes e bem específicos que podem ser representados conforme esquema da Figura 5.1.

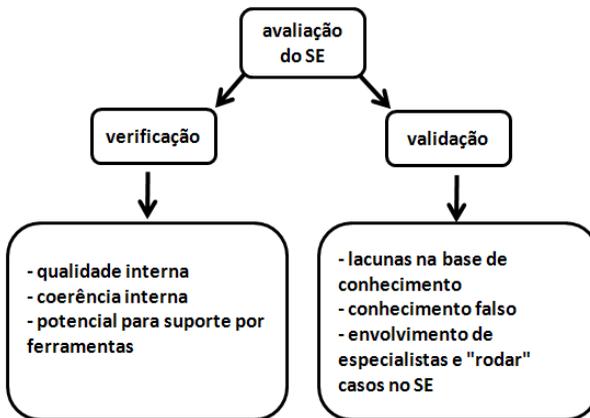


Figura 5.1- Avaliação da base de conhecimento. Adaptado de Kendal e Creen (2007).

A verificação pode ser agilizada com utilização de ferramentas automáticas de suporte que examinam as regras programadas e identificam inconsistências na base de conhecimento, como regras redundantes, regras que são conflitantes e os erros de sintaxe (Gonzalez; Dankel, 1993). Na validação, procuram-se lacunas na base de conhecimento e a participação do especialista é inevitável.

Conforme apresentado no capítulo 3, o desenvolvimento deste SE utilizou o modelo incremental, que exige para cada ciclo de funcionalidade implementado um processo de avaliação, que por sua vez, contempla as atividades de verificação e validação. A principal vantagem do modelo incremental é que os incrementos de funcionalidade podem ser testados, verificados e validados, imediatamente com o especialista, ao final de cada ciclo, ao invés de fazer a validação do sistema completo no final do desenvolvimento (Giarratano; Riley, 1998).

Pode ser considerado que os processos de verificação e validação começaram com as observações sobre as saídas obtidas pelo SE protótipo desenvolvido na disciplina de Sistemas Especialistas do POSMEC, conforme comentado no capítulo 2. Apesar de ter sido uma validação informal, os resultados apresentados confirmaram que a ferramenta de SE é adequada para ser aplicada no diagnóstico de problemas de desempenho de compressores herméticos. Nestas

análises, também observaram-se necessidades de melhorias na interface com o usuário, nos menus dos dados de entrada e, principalmente, criação de um relatório de saída.

## 5.2 VERIFICAÇÃO DO SE

O processo de verificação do SE dedicou atenção especial para avaliação da adequação da implementação da base de conhecimento, certificação da codificação das regras e geração do relatório de saída. Para alcançar este objetivo, foram gerados casos hipotéticos, com diferentes níveis para os atributos de capacidade de refrigeração, consumo de potência, ruído e mínima tensão de partida e, a seguir, verificado se o SE disponibilizava os diagnósticos planejados, assim como os relatórios de saída. Para estes, foram verificados para cada entrada de dados em questão se os diagnósticos, os diagramas de causa-efeito e o diagrama de informações adicionais foram emitidos.

A Tabela 5.1 mostra um sumário do número de entradas em função do nível do atributo de desempenho do compressor medido em relação ao especificado. A tabela está dividida em duas partes, a saber: a primeira parte corresponde ao sumário de entradas implementadas no primeiro ciclo de funcionalidades do SE, que gera diagnósticos para os atributos de capacidade de refrigeração e consumo de potência; a segunda parte corresponde ao segundo ciclo de funcionalidades e mostra o sumário de entradas para os atributos de ruído e mínima tensão de partida.

Tabela 5.1- Atributos X número de entradas para verificação do SE.

Ciclo de funções	Atributos	Entrada dados X nível do atributo	Número de picos de ruído alto	Intervalo entre picos de ruído alto	Número de entradas para verificação
1º ciclo	capacidade de refrigeração consumo de potência	capacidade (alta, similar, baixa) consumo (alto, similar, baixo) ruído total (alto, similar, baixo) vazamento (alto, similar, baixo)			81
2º ciclo	ruído em baixa frequência ruído em média frequência ruído em alta frequência	ruído em baixa frequência (alto, similar/baixo) ruído em média frequência (alto, similar/baixo) ruído em alta frequência (alto, similar/baixo)	0/1/2/3/4/5/6/7	0/1/2/3/4/5	39
	mínima tensão de partida	consumo (alto, similar, baixo, desconhecido) partida (alto, similar, baixo, não gira)			16
<b>Total</b>					<b>136</b>

A elaboração do diagnóstico adequado para os problemas de ruído para cada região do espectro de frequência (baixa, média, alta) requer uma avaliação deste espectro medido em relação ao especificado. Esta avaliação utiliza como base a contagem do número de bandas de 1/3 de oitava em que o ruído medido é maior que o especificado (número de picos de ruído alto). Para os casos em que existem somente dois picos de ruído alto na região do espectro de frequência, também é necessário contar o número de bandas de 1/3 de oitava entre os dois picos de ruído (intervalo entre picos de ruído alto), para que o SE consiga emitir o diagnóstico adequado. Como para cada região de frequência tem-se sete bandas de 1/3 de oitava, o número de picos de ruído alto pode variar de 1 a 7 e o intervalo mínimo entre picos pode variar de 0 a 5.

Ainda com relação à Tabela 5.1, acrescenta-se que os módulos de diagnóstico para os resultados de calorímetro (capacidade de refrigeração e consumo de potência), ruído e mínima tensão de partida foram desenvolvidos com suas respectivas entrada de dados de maneira independente, de forma que o número total de cenários de entrada do SE é a soma dos três módulos.

O processo de verificação descrito no parágrafo anterior foi aplicado primeiramente para as regras programadas para os diagnósticos dos problemas de calorímetro, que foi implementado no primeiro ciclo de funcionalidades do SE. No segundo ciclo de desenvolvimento do SE, este processo de verificação foi aplicado para as regras programadas para elaborar diagnósticos dos problemas de mínima tensão de partida e ruído. As tabelas completas utilizadas na verificação estão expostas no apêndice I.

É importante relatar a dificuldade encontrada na verificação da codificação das regras criadas para interpretar os dados do espectro de ruído medido em relação ao especificado e definir se o espectro medido pode ser considerado como acima ou se é similar ao especificado. Por exemplo, se o valor especificado de ruído para a banda de 400 Hz é 10 dB(A) e o valor medido em uma amostra de compressor for 14 dB(A), esta diferença de 4 dB(A) não é considerada um problema pelo SE. Porém, se a mesma diferença de 4 dB(A) for encontrada na banda de 1250 Hz e o valor especificado de ruído da amostra for de 25 dB(A), tem-se caracterizado um problema de ruído alto. A verificação para os dados de entrada de ruído mostrou que a codificação não estava adequada para vários cenários, resultando em diagnósticos errados. A revisão da codificação mostrou a necessidade de redefinir os pontos de corte para o atributo de ruído, conforme comentado no item 4.2.

A verificação também foi importante para mostrar quatro casos de entrada de dados que não apresentavam nenhum diagnóstico emitido, após a entrada de dados, devido a erros na programação das regras de produção.

Ademais, as anomalias referentes aos erros de sintaxe e “bugs” observados pelo CLIPS foram corrigidos e implementados no SE.

### 5.3 VALIDAÇÃO DO SE

O método adotado para validação do SE foi através da análise de sua operação completa, ou seja, começa com o processo de entrada de dados e termina com a emissão do relatório de saída. Não houve preocupação em se validar os componentes do SE, individualmente, como as regras de produção ou a programação da estrutura orientada a objetos. Os testes visam assegurar que os resultados obtidos pelo SE estejam de acordo com os resultados previstos pelo especialista.

#### 5.3.1 Testes de Validação do SE

Para participar do processo de validação do SE foram convidados quatro especialistas, todos com experiência na análise de problemas de baixo desempenho em compressores herméticos na empresa-alvo, a saber: Eduardo Luiz Rosário (Especialista de Produtos há 6 anos),

Luciano Muller (Especialista de Produtos há 4 anos ), Laerte Campestrini (Especialista de Produtos, trabalha há 11 anos com análise de compressores) e Xu Jianwen (Especialista em Acústica e Vibrações há 6 anos). Os três primeiros especialistas trabalham na unidade do Brasil e a última na unidade da China.

Os usuários finais também participaram do processo de testes e avaliação do SE e um sumário destes resultados é apresentado no item 5.4. Conforme comentado no capítulo 1, os principais usuários finais do SE são os engenheiros e técnicos de produtos que não possuem experiência no processo de análise de problemas de baixo desempenho em compressores. Os retornos obtidos pelo autor durante a divulgação informal do SE na empresa-alvo confirmaram que o SE será utilizado como ferramenta de suporte também por especialistas experientes.

Com base nas lições aprendidas na implantação do SE READ, Liebowietz (1988) recomenda assegurar que os especialistas aprendam como usar o SE, antes de iniciar o processo de validação. Assim, com o objetivo de eliminar possíveis barreiras e animosidades no processo de validação, foram realizadas sessões de apresentação do SE para todos os especialistas envolvidos, onde foram discutidos os principais objetivos da validação e eliminadas as dúvidas deste processo, além de fornecimento de documentação adequada para consulta. Também ficou assegurada a disponibilidade do autor para discussão dos resultados das avaliações e esclarecimento de dúvidas, quando necessário.

Os especialistas envolvidos no processo de validação geraram casos hipotéticos de problemas de desempenho, cujos atributos estão dentro do escopo deste SE, submetendo-os ao mesmo. Assim, a partir das saídas emitidas pelo SE, os especialistas elaboraram comentários e observações em relação à qualidade dos diagnósticos. Nos casos em que a saída gerada pelo SE foi divergente do diagnóstico recomendado pelo especialista, a mesma foi discutida e, quando necessário, corrigida pelo autor, atualizando o código computacional.

Para os casos em que são gerados dados de desempenho fora do escopo do SE, o mesmo emite, imediatamente, uma mensagem informando ao usuário que o atributo de entrada está fora da faixa da aceitação do SE e solicita uma nova entrada de dados, mostrando a faixa de aceitação.

A Tabela 5.2 apresenta um exemplo do processo de validação para os resultados do teste de calorímetro e contém os níveis dos atributos referentes aos dados de entrada e o diagnóstico emitido pelo SE para a capacidade de refrigeração abaixo do valor especificado.

Tabela 5.2- Exemplo de caso para validação do SE.

Tipo de análise	Atributos de entrada do SE	Nível do atributo	Diagnóstico emitido pelo SE
calorímetro (capacidade de refrigeração e consumo de potência)	capacidade de refrigeração	baixa	Subsistemas com maiores possibilidades de serem os responsáveis pela capacidade baixa: 1) Sistema de sucção: - vazamento excessivo na região de conexão câmara de sucção x placa; - danificação do filtro do tubo da câmara de sucção; - presença de resíduos no filtro da câmara de sucção; - vazamento na região da sobre-moldagem da câmara de sucção (corpo x tampa). 2) Câmara de compressão com altura acima do especificado. 3) Sistema de sucção: - qualidade do anel de sucção: planicidade, riscos, picos e altura anel fora especificado; - juntas do cabeçote danificadas; - válvula de sucção empenada; - planicidade do acento da válvula acima especificado.
	consumo de potência	similar	
	ruído total	alto	
	vazamento na descarga	similar	

No exemplo da Tabela 5.2, o especialista avaliou a resposta do SE para o problema de desempenho no teste de calorímetro, entrando com os resultados dos testes de desempenho que geraram os atributos mostrados na terceira coluna desta tabela. A saída mostrada pelo SE foi considerada satisfatória pelo especialista, porém, ficou acordado entre o especialista e o autor a inclusão de mais causas associadas ao sistema de sucção para a baixa capacidade de refrigeração, para que o diagnóstico ficasse completo. E assim, para este cenário, foi incluído no SE o item (3) da Tabela 5.2, que corresponde à inclusão de desvios relativos à qualidade do anel de sucção, juntas do cabeçote, válvula de sucção e assento da válvula de sucção na placa. Estas causas adicionais também são, normalmente, associadas aos problemas de baixa capacidade no sistema de sucção dos compressores herméticos.

Assim como descrito no exemplo anteriormente comentado, outros casos similares foram objeto de discussão entre o especialista e o autor, com o objetivo de se obter consenso sobre a atualização ou não dos pareceres registrados no SE.

O processo de geração de casos hipotéticos de problemas de desempenho em compressores e a correspondente análise realizada pelo especialista, descrito no parágrafo anterior para os resultados de teste de calorímetro, foi repetido para os problemas de mínima tensão de partida e ruído, conforme previsto no escopo deste SE.

Para os problemas de ruído, a validação resultou na inclusão de duas causas adicionais importantes, as quais merecem destaque. Uma

causa relacionada ao ruído em média frequência (mola da câmara de sucção com altura ou rigidez fora do especificado, que resulta em vazamento na região do bocal de câmara e, conseqüentemente, ruído alto) e outra causa para ruído alto em baixa frequência (posição de montagem do contrapeso do eixo e ou sua massa diferente do especificado).

Com relação à análise da validação para os problemas de mínima tensão de partida, houve uma inclusão importante para o diagnóstico de partida acima do valor especificado (montagem do rotor deslocado axialmente em relação ao estator).

Ademais, as discussões sempre foram enriquecidas com os comentários dos especialistas, sobre os resultados das análises realizadas no passado de problemas reais e o alinhamento das saídas emitidas pelo SE para estes casos.

No final do processo de validação, o SE já estava atualizado com as sugestões e observações realizadas pelos especialistas, que foram consideradas adequadas para este SE, ou seja, que estão de acordo com o escopo definido para o mesmo, conforme apresentado no item 4.1. Esta decisão foi de comum acordo entre os especialistas e o autor. As sugestões consideradas fora do escopo deste trabalho, porém adequadas para implementação no SE, foram listadas como oportunidades para atualizações futuras do sistema e são apresentadas resumidamente no capítulo 6.

### **5.3.2 Utilidade e Potencialidade do SE**

O item anterior descreveu como foram realizados os testes de validação do SE pelos especialistas e os resultados obtidos. De forma a avaliar de maneira mais ampla a utilidade e a potencialidade do SE, os especialistas foram solicitados a responder a um questionário com seis perguntas sobre o SE validado. Este método foi utilizado no trabalho de Silva (1998) e suas perguntas foram adaptadas para avaliação deste SE. O questionário e as respostas dos especialistas são apresentadas a seguir. Para as respostas da especialista Xu Jianwen, a tradução é nossa. Também, são expostos os comentários do autor deste trabalho, para as observações mais pertinentes.

1. Você considera este sistema útil para a sua organização ?

Rosário: *Sim, por serem comuns problemas na confecção de amostras nos projetos, o sistema é um ponto de partida para a análise das causas dos problemas.*

Muller: *Sim, apesar de abranger somente compressores EM (minis), visto que em função do range de capacidade (40 – 200 W), exclui-se praticamente todos os EG's R600a e R134a.*

Campestrini: *Sim. Considero um sistema bastante útil, principalmente, para os especialistas com pouco tempo de empresa e, conseqüentemente, com pouca experiência.*

Xu Jianwen: *Este sistema de diagnóstico é um sistema de instrução ou banco de dados de engenharia com foco na análise da causa raiz do desempenho do compressor (ruído, COP, partida, consumo) para modelos R600a (platforma EM). Vários benefícios virão com a implantação:*

- *É um sistema que compartilha conhecimento e experiência.*
- *As pessoas podem aprender com o sistema de diagnóstico.*
- *É uma instrução para atividades de TDA (tear down analysis)<sup>3</sup>, nas atividades de controle de qualidade diário.*
- *É uma referência que instrui engenheiros a resolver problemas encontrados no desenvolvimento.*
- *Ajuda engenheiros, especialmente aqueles sem experiência em desenvolvimento de produtos, como os novos contratatos.*

**Comentário:** Conforme discutido no item 4.1, o escopo definido para este SE foi para diagnósticos relativos aos compressores “minis”, os quais tem a denominação de “EM” na empresa-alvo. Este SE pode ser expandido para analisar problemas de compressores do tipo “midis”, que possui o limite superior da faixa de capacidade de refrigeração mais alto que o dos compressores “minis”, situando-se entre 140 e 245 W, na condição ASHRAE.

2. Como você descreve o SE em termos de interface com o usuário ? (entrada de dados, saídas, explicações).

Rosário: *A interface é simples, mas suficiente para atender a necessidade para análise do problema.*

---

<sup>3</sup> TDA (tear down analysis) – atividade de desmontagem do compressor e análise de seus componentes, para encontrar a causa raiz de problemas, realizada pela área da Garantia da Qualidade, na empresa-alvo.

Muller: *Boa.*

Campestrini: *A interface é muito boa, o programa é bastante amigável, a programação foi realizada de uma forma lógica que direciona o especialista de produtos a encontrar a melhor solução/caracterização do problema no menor tempo possível.*

Xu Jianwen: *Conclusão geral após uso é que o sistema é realmente fácil de operar, mesmo para pessoas com diferentes níveis educacionais.*

3. Em sua opinião, qual o ponto mais forte do sistema ?

Rosário: *A saída gráfica da solução do problema, com uma explicação das causas.*

Muller: *O relatório de possíveis diagnósticos de falhas, ajudando em muito as pessoas pouco experientes.*

Campestrini: *A solução/caracterização de problemas relacionados ao desempenho de compressores herméticos é composta por uma série de variáveis. O conhecimento adquirido neste assunto vem da experiência de especialistas com maior tempo de empresa, que por algum motivo ou outro já vivenciaram determinado tipo de ocorrência. Em minha opinião, o ponto forte do sistema será o direcionamento na caracterização e solução de problemas para os especialistas com pouca experiência e conhecimento do produto. Durante a caracterização de um problema, algumas análises devem ser realizadas antes da abertura dos compressores, e o SE irá indicar quais análises realizar antes da abertura, evitando-se a perda de informações valiosas para caracterização do problema.*

Xu Jianwen: *O diagrama causa-efeito é muito útil e conveniente para obter as causas principais, as quais são usados para identificar a causa raiz. Os esquemas gráficos das partes do compressor facilitam a localização das causas principais.*

**Comentário:** As observações de que a saída gráfica e o relatório de saída são pontos fortes do sistema confirma que a discussão feita a partir dos resultados obtidos no protótipo desenvolvido na disciplina de Sistema Especialista do POSMEC foi adequada e as soluções implantadas no SE foram satisfatórias.

4. Qual o ponto mais fraco do sistema ?

Rosário: *A interface de entrada de dados.*

Muller: *A restrição de análise de compressores com capacidades diferentes (como já informado).*

Campestrini: *A saída do CLIPS é somente em forma de texto, portanto, para a geração de relatórios mais elaborados, as saídas precisam ser geradas em “html” (que atende perfeitamente as necessidades), porém, os usuários devem ter disciplina e sempre salvar os relatórios logo após a análise, para que informações não sejam perdidas.*

Xu Jianwen: *A entrada de dados deveria ser mais operacional e flexível, se possível. Por exemplo, para análise de ruído, é necessário entrar com diferentes frequências, uma por uma (especificado e medido). Se pudesse entrar com uma tabela ou todos os dados de uma só vez, seria muito mais conveniente e evitaria erros.*

**Comentário:** A proposta de entrada de dados do tipo “escolha em um banco de dados”, inicialmente, foi considerada para este SE. Porém, a situação atual é que o número de modelos de compressores do tipo “minis” implantados na empresa-alvo que poderiam ser incluídos no banco de dados, é realmente grande, totalizando mais de 70 modelos. Este fato implicaria em investir um tempo generoso para coleta e introdução dos dados de desempenho especificados no SE que teria necessariamente um formato diferente do disponível na empresa-alvo.

Contudo, a questão central que resultou na mudança da forma de entrada dos dados especificados de desempenho, do tipo “escolha em um banco de dados” para “livre dentro de uma faixa de aceitação”, é que o SE correria o risco de ficar obsoleto em pouco tempo, principalmente, em função do número significativo de modelos que são implantados a cada trimestre na empresa-alvo.

De qualquer forma, o SE permite que a entrada de dados para os dados de desempenho especificados seja adaptada para o tipo “escolha em um banco de dados”, sem que haja necessidade de revisão da base de conhecimento, bastando para tanto alocação de recursos específicos.

Sobre a observação de expansão do SE para compressores do tipo “EG”, vale o mesmo comentário emitido para a primeira pergunta do questionário, ou seja, este SE pode ser expandido para emitir diagnósticos de problemas de compressores do tipo “midis”.

5. Você estaria interessado em participar do aprimoramento do SE ? Se sim, como?

Rosário: *Sim. Na atualização do sistema para novos casos de problemas de baixo desempenho, quando necessário.*

Muller: *Sim, divulgando no time de PM (Projetos Médios da empresa-alvo) e verificando resultados das análises baseados no diagnóstico indicado pelo software e comparando-o com as conclusões finais, após as análises indicadas.*

Campestrini: *Sim, tenho interesse em participar do aprimoramento do sistema. Acredito que a melhor forma de contribuir será utilizando o sistema dentro dos projetos que estou atuando. Outra forma de auxílio será na disseminação do sistema para outros especialistas, pois este só irá obter êxito caso seja utilizado de forma adequada pelo maior número de especialistas possível.*

Xu Jianwen: *Certamente. Se a empresa-alvo puder implementar este sistema, vai ser muito útil para os engenheiros. Após a validação e implementação desta versão, se necessário, ajudar a desenvolver diagnósticos para outros modelos de compressores, como para R134a e compressores de velocidade variável. Podem ser adicionadas mais ilustrações detalhadas das dimensões chaves dos componentes (placa válvula, câmara de sucção, rotor, etc.), os quais podem afetar o desempenho (ruído, COP, mínima tensão de partida, consumo de potência).*

**Comentário:** O interesse dos especialistas na participação do processo de validação ficou notório em vários momentos do desenvolvimento deste SE, demonstrando também a potencialidade de implantação e utilização do mesmo na empresa-alvo, assim como a sua expansão.

6. Comentários gerais sobre o sistema.

Rosário: *Sem comentários.*

Muller: *O sistema atende a que se propõe, em meus testes tudo estava de acordo com o meu conhecimento sobre o assunto. Proponho que seja colocado na tela inicial o range de produtos abrangidos neste primeiro momento, como por exemplo compressor EM com capacidade entre X e Y, ou algo do gênero. Apesar de que acredito que poderíamos estender ao EG em alguns pontos, mas não tenho conhecimento para dizer no que deveríamos mudar.*

*Campestrini: O sistema foi desenvolvido com algumas premissas e restrições, acredito que após os testes iniciais, este sistema poderá abranger toda a família de produtos da empresa, a experiência que será trocada entre os especialistas durante a utilização do sistema tornará o tempo de resposta na caracterização/solução dos problemas muito menor, conseqüentemente, trazendo benefícios mensuráveis e imensuráveis para organização.*

*Xu Jianwen: Este é um sistema que compartilha conhecimento e experiência. Se puder ser implementado, será muito útil e poderoso nas análises de problemas de engenharia. Sugiro totalmente implantar, em breve. O autor do sistema de diagnóstico é experiente e profissional.*

**Comentário:** Vide comentários feitos para a pergunta número 4.

#### 5.4 AVALIAÇÃO DO SE PELOS USUÁRIOS FINAIS

Com o objetivo de avaliar a adequação da interface com o usuário, a linguagem utilizada e a utilidade do SE, o presente foi apresentado a um grupo de onze potenciais usuários finais. O grupo escolhido foi composto de técnicos que trabalham no processo de montagem e análise de protótipos de compressores, engenheiros de produtos com pouco tempo na empresa-alvo e também especialistas com experiência na análise de problemas de baixo desempenho.

Após uma explicação sobre os objetivos e funcionamento do sistema, os usuários ficaram aptos a utilizar o SE, gerar casos hipotéticos de baixo desempenho em compressores e obter o respectivo relatório para o diagnóstico.

Aos usuários, foi solicitado responder uma avaliação composta por sete questões sobre vários aspectos observáveis durante a utilização do SE. Para cada questão, foi requisitada uma resposta, de acordo com a seguinte escala: (4) concorda fortemente; (3) concorda; (2) aceita; (1) discorda; (0) discorda fortemente. Este método foi utilizado no trabalho de Silva (1998) e suas perguntas foram adaptadas para avaliação deste SE. Cópias do SE foram disponibilizadas nos computadores dos usuários por sete dias, de forma que os mesmos puderam gerar vários casos para analisar o SE. Um sumário das avaliações é apresentado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3- Sumário da avaliação do SE pelos usuários finais.

Critérios para avaliação do SE		Pontuação média (usuários finais)
1	O objetivo do sistema está entendido	93%
2	As perguntas do sistema estão claras	91%
3	É fácil entrar com os dados para a análise	82%
4	A sequência de perguntas do sistema fazem sentido	93%
5	O relatório de saída tem as informações necessárias	86%
6	As explicações presentes nos diagnósticos são claras	82%
7	A velocidade de resposta é satisfatória	91%

Conforme pode ser observado na Tabela 5.3, os resultados da avaliação foram positivos, em todos os critérios avaliados na pesquisa, com pontuação mínima de 82 % para os critérios de facilidade de entrada de dados e clareza nas explicações dos diagnósticos.

Para melhorar o processo de entrada de dados, pode-se alterar o tipo de entrada para “escolha em um banco de dados” no lugar de “livre dentro de uma faixa de aceitação”, conforme comentado no item 5.3.2. Também pode-se aprimorar a qualidade dos diagnósticos, adicionando-se mais detalhes nas explicações e informações técnicas dos esquemas gráficos presentes nos relatórios de desempenho.

Com os resultados obtidos nos processos de verificação e validação descritos anteriormente, o autor considera que o ciclo de desenvolvimento deste SE foi concluído satisfatoriamente, conforme planejado. A expansão deste SE pode ser objeto de outro trabalho acadêmico ou de um projeto específico da empresa-alvo, com alocações de especialistas dedicados. As conclusões deste trabalho e as sugestões sobre os próximos passos para expansão do SE são discutidas no próximo capítulo.

## 6. CONCLUSÕES

Os capítulos anteriores apresentaram uma revisão dos conceitos básicos relativos a compressores herméticos para refrigeração doméstica, sua análise funcional, um resumo dos conceitos fundamentais de SEs, o desenvolvimento do SE e, concluindo o desenvolvimento, o processo de verificação e validação. O capítulo de conclusões expõe as principais contribuições e conclusões obtidas com o desenvolvimento do SE e as sugestões para continuidade do trabalho, seja no campo acadêmico ou em um projeto específico da empresa-alvo.

Segundo Silva (2001), o objetivo da pesquisa aplicada é gerar conhecimentos para aplicação prática e dirigidos à solução de problemas específicos. Portanto, do exposto nos capítulos anteriores, verifica-se que este trabalho tem características de um projeto de pesquisa aplicada, pois foi empregada a metodologia de SE para o desenvolvimento de uma ferramenta que aprimora o processo de desenvolvimento de compressores herméticos e permitirá reduzir o tempo e o custo deste processo, quando for introduzido na empresa-alvo.

Salienta-se que os objetivos estabelecidos para este trabalho foram atingidos satisfatoriamente, com o desenvolvimento do SE e a elaboração desta dissertação. Os resultados mostram que é possível utilizar a metodologia de SE no domínio de conhecimento de desenvolvimento e implantação de compressores herméticos para diagnóstico de problemas de desempenho. O SE também abre caminho para futuras expansões e melhorias, que são apresentadas como recomendações para trabalhos futuros.

### 6.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES

As principais conclusões e contribuições deste trabalho são listadas a seguir.

- A metodologia de SE foi aplicada com resultados satisfatórios no desenvolvimento de uma ferramenta de suporte ao processo de desenvolvimento e implantação de novos compressores herméticos.

- O resultado positivo do processo de validação confirma que os diagnósticos elaborados pelo SE estão atualizados e alinhados com as recomendações dos especialistas para os atributos de capacidade de refrigeração, consumo de potência, mínima tensão de partida e ruído.
- O SE desenvolvido contribui para melhoria na qualidade dos diagnósticos dos problemas de baixo desempenho dos compressores herméticos, reduzindo tempo e custo das análises. Este SE pode ser usado nas atividades diárias dos engenheiros e técnicos envolvidos no desenvolvimento de novos modelos de compressores ou pelos responsáveis pelo controle de qualidade dos produtos já implantados.
- O SE permite compartilhar conhecimento e informações, dos especialistas mais experientes no processo de diagnóstico de problemas de desempenho com os engenheiros e técnicos mais jovens ou com pouca vivência neste processo, assim como para outras áreas da empresa-alvo.
- O novo sistema pode ser usado como ferramenta para treinamento de novos especialistas e técnicos na análise dos problemas de desempenho de compressores
- A estrutura implementada no SE permite que o mesmo possa ser expandido, conforme foi demonstrado pelo desenvolvimento do segundo ciclo de funções, que disponibilizou diagnósticos relacionados aos atributos de mínima tensão de partida e nível de potência sonora, em adição ao módulo já implementado de diagnósticos para problemas de capacidade de refrigeração e consumo de potência.
- Um dos pontos fortes do SE, destacado no processo de validação, é a interface gráfica codificada em “html” e disponibilizada no arquivo do relatório de saída. O relatório apresenta, além do diagnóstico na forma textual, o diagrama causa-efeito associado com o baixo desempenho e um

esquema gráfico para auxiliar na identificação das causas consideradas mais prováveis.

## 6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O processo de validação do SE teve a participação de vários especialistas com experiência no processo de diagnóstico de problemas de baixo desempenho em compressores, conforme apresentado no capítulo 5. Este processo foi interativo e iterativo e fomentou várias discussões sobre como o SE poderia ser implantado na empresa-alvo e como o mesmo poderia ser expandido, seja agregando mais funcionalidades ou tornando-se mais amigável para o usuário. Algumas das recomendações listadas abaixo são frutos destas discussões.

A seguir, é apresentado um sumário das principais recomendações para trabalhos futuros.

- Expandir o SE para elaboração de diagnósticos envolvendo outros atributos de desempenho, como para problemas relacionados à vibração do compressor em base elástica ou resultados de testes de tribologia. O diagnóstico das causas principais envolvendo problemas tribológicos nos componentes do compressor hermético exige conhecimento multidisciplinar e muita experiência de campo. São necessários vários anos de dedicação e estudo para que o especialista elabore diagnósticos adequados que suportem o caminho para a solução dos problemas. Estas circunstâncias justificam o esforço de um trabalho acadêmico para desenvolver um SE para diagnóstico de problemas tribológicos.
- Implementar entrada de dados do tipo “escolha em um banco de dados”, na empresa-alvo, para os valores especificados dos atributos de desempenho dos compressores herméticos. Esta alteração torna o SE mais amigável e reduz o tempo para entrada de dados.
- Incluir no relatório de saída do SE, um procedimento para a correta desmontagem do compressor. Este roteiro deve conter

coleta de dados e informações técnicas para auxiliar no diagnóstico dos problemas do desempenho, como medição adequada dos torques do cabeçote e do estator.

- Adicionar na lista de atributos dos dados de entrada, a medição de vazamento para o sistema sucção do compressor. Esta medição adicional melhora a qualidade do diagnóstico, reduzindo o número de subsistemas e componentes com maiores possibilidades de serem os responsáveis pelos problemas de desempenho. Esta sugestão não foi introduzida neste SE, porque o ensaio ainda não foi padronizado como rotina nos laboratórios da empresa-alvo.
- Desenvolver um módulo no SE para elaboração de roteiro de testes de desempenho obrigatórios, na introdução de novos componentes no compressor hermético. Este roteiro informaria quais os testes de desempenho e ou tribológicos necessários, a quantidade de amostras recomendadas e as condições de testes específicas, para aprovação do novo componente.

### 6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na experiência adquirida no desenvolvimento do SE, objeto deste trabalho, o autor recomenda que a expansão do SE, na empresa-alvo, seja realizada através de um projeto específico da sua área de R&D (Research and Development), no Brasil. Este projeto precisa ter, necessariamente, recursos oficialmente alocados de especialistas com experiência na análise de problemas de baixo desempenho em compressores, engenheiro de conhecimento e suporte técnico da área de IT (Information Technology). Também recomenda-se, para este projeto de expansão, a continuidade da parceria com a UFSC, seja com um projeto de pesquisa específico entre empresa-alvo e universidade ou através de desenvolvimento de novos trabalhos acadêmicos de pesquisa aplicada na área de SE.

A literatura consultada evidencia, como importantes lições aprendidas na implantação de SEs, a disponibilidade e o interesse do especialista nos processos de aquisição do conhecimento e validação do

sistema (Liebowietz, 1988). Os resultados obtidos nesta dissertação também estão alinhados com esta premissa. O autor considera que o desenvolvimento deste trabalho não poderia ser realizado de maneira satisfatória, sem o interesse da empresa-alvo e sem a experiência de um especialista no processo de análise de diagnóstico de problemas de baixo desempenho em compressores. Também ficou evidente que a parceria entre academia e indústria, posta em prática nesta dissertação, aproveitando o interesse da empresa-alvo e a disponibilidade do especialista, com a orientação dedicada fornecida pela UFSC, possibilita o desenvolvimento de trabalhos que contribuem para ampliação da pesquisa aplicada e o desenvolvimento tecnológico na indústria.

## REFERÊNCIAS

Back, N.; Dias A.; Ogliari, A.; Silva, J. C., **Projeto Integrado de Produtos**, Barueri/SP: Editora Manole, 2008, 601p.

Bertsche, B., **Reliability in Automotive and Mechanical Engineering**, Berlin, Germany: Springer, 2008, 492p.

Bezerra, E., **Princípios de Análise e Projeto de Sistemas com UML**, 1ª Edição, Editora Campus, 2002, 280p.

Dossat, R. J., **Principles of Refrigeration**, 2<sup>nd</sup> Edition, New York, USA: John Wiley and Sons, 1978, 603p.

Filippo, F. G., **Motor de Indução**, 8ª Edição, São Paulo/SP: Editora Érica, 2002, 246p.

Flesch, R. C. C., **Estudo e Projeto de Estratégias de Controle para Aplicação em uma Bancada de Ensaio que Apresenta Atraso de Transporte**, 2008, 96 f., Dissertação (Mestrado em Automação e Sistemas) – Programa de Pós-Graduação em Automação e Sistemas. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

Giarratano, J.; Riley, G., **Expert systems: Principles and Programming**, 3<sup>rd</sup> Edition, Boston: PWS Publishing Company, 1998, 597 p.

Giarratano, J., **CLIPS User's Guide** (volume 1, version 6.23), 2002, 160 p.

Gomes, A. R., **Análise Comparativa de Mecanismos de Compressão para Aplicação em Refrigeração Doméstica**, 2006, 120 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

Gosney, W.B., **Principles of Refrigeration**, Cambridge, England: Cambridge University Press, 1982, 666 p.

International Organization for Standardization, **ISO 917: 1989** Testing of Refrigerant Compressors, Switzerland, 1989, 31 p.

International Organization for Standardization, **ISO 3741:1999** Acoustics – Determination of Sound Power Levels of Noise Sources Using Sound Pressure – Precision Methods for Reverberation Rooms, Switzerland, 1999, 32 p.

Kaya, A.; Germen E., Unlu U., Toprak S., Fault Classification in Hermetic Compressor Using Self-Organizing Map – **International Compressor Engineering Conference at Purdue**, July 14-17, 2008, 5 p.

Kendal, S.; Creen, M., **An Introduction to Knowledge Engineering**, 1<sup>st</sup> Edition, London: Springer, 2007, 287 p.

Li H.; Braun J. E., A Methodology for Diagnosing Multiple-Simultaneous Faults in Rooftop Air Conditioners. – **International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue**, July 12-15, 2004, 10 p.

Liebowitz, J., **Introduction to Expert Systems**, California: Randon House, 1988. 182 p.

Liebowitz, J., Teaching an Applied Expert System Course: a Content Outline, **Journal of Information Systems Education** 9/92, volume 4, number 3.

Lilie, D. E. B.; Ferreira, R. T. S., Evaluation of the Leakage Through the Clearance Between Piston and Cylinder in Hermetic Compressors, **International Compressor Engineering Conference at Purdue**, West Lafayette, IN, USA, pp. 1-6, 1984.

Liu, S. C.; Liu S. Y.; An Efficient Expert System for Air Compressor Troubleshooting. **Expert System: The Journal of Knowledge Engineering**, September 2001, Vol. 18 (4).

Lopes, C. A., **Sistema Especialista Protótipo para Apoio a Ensaios de Condicionadores de Ar Domésticos**, 2008, 114 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em

Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

Manepatil S. S.; Ashesh T. A., Fault Diagnosis of Reciprocating Compressor Using Pressure Pulsations, **International Compressor Engineering Conference at Purdue**, July 17-20, 2006, 9 p.

Massirer, D. A., **Sistema Especialista Protótipo para Auxílio a Verificação da Estrutura de Produto de Motores Elétricos**, 2007, 115 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

Matelli, J. A., **Sistemas Baseados em Conhecimento para Projetos de Plantas de Cogeração a Gás Natural**, 2008, 135 f., Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

Mecabô, L., **Desenvolvimento de um Protótipo de Sistema Especialista para Apoio à Manutenção de Turbocompressores Centrifugos de Gás Natural**, 2007, 147 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

O'Connor, P. D. T., **Practical Reliability Engineering**, 4<sup>th</sup> Edition, John Wiley & Sons, England, 2002.

O'Keefe R. M.; O'Leary D. E., Expert System Verification and Validation: a Survey and Tutorial, **Artificial Intelligence Review 7**, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1993, pp. 3-42.

Pahl, G.; Beitz W.; Feldhusen J.; Grote K. H., **Engineering Design – A Systematic Approach**, 3<sup>a</sup> Edition, London, Springer, 2007.

Qiao, Z.; Liu, S.; Xiong, Z.; Wan, D.; Qiao, H., Development of Expert System for Design Optimization of the Compressor, **International Compressor Engineering Conference at Purdue**, West Lafayette, IN, USA, 1994.

Possamai, F. C.; Todescat, M. L. A., Review of Household Compressor Energy Performance, **International Compressor Engineering Conference at Purdue**, West Lafayette, IN, USA, 2004.

Rigola, J. ; Pérez-Segarra, C. D.; Oliva, A; Serra, J. M.; Escribá, M.; Pons, J., Parametric Study and Experimental Comparison of Small Hermetic Compressors Using an Advanced Numerical Simulation Model, **International Compressor Engineering Conference at Purdue**, West Lafayette, IN, USA, 1998.

Sangoi, R., **Estudo de Identificação de Fontes de Ruído e Vibrações em um Compressor Hermético**, 1983, 104 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1983.

Shih, Y. T.; Kim, J., Development of an Expert System for Design of Compressor Gas Manifolds, **International Compressor Engineering Conference at Purdue**, West Lafayette, IN, USA, 1994.

Shu-Chu L.; Shih-Yaug L., An Efficient Expert System for Air Compressor Troubleshooting, **Expert system – The Journal of Knowledge Engineering**, Vol. 18 (4), September 2001, pp. 203-214.

Silva, E. L.; Menezes, E. M., **Metodologia de Pesquisa e Elaboração de Dissertação**, 4ª Edição, Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005, 138p.

Silva, J. C., **Expert System Prototype for Hydraulic System Design Focusing on Concurrent Engineering Aspects**, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

Soedel, W. A., Singh, R., A Review of Compressor Lines Pulsation Analysis and Muffler Design Research/ Part I: Pulsation Effects and Muffler Criteria, **International Compressor Engineering Conference at Purdue**, West Lafayette, IN, USA, 1974.

Soedel, W. A., **Sound and Vibrations of Positive Displacement Compressors**, 1<sup>st</sup> Edition, Boca Raton, USA: CRC Press, 2007, 343 p.

Stamatis, D. H., **Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution**, 2<sup>nd</sup> Edition, American Society for Quality, Milwaukee, USA, 1995, 459 p.

Stoecker, W. F.; Jones, J. W., **Refrigeração e Ar Condicionado**, São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1985, 481 p.

Sung, K. R.; Kim, J., Design of Compressor Valve System Utilizing an Expert System, **International Compressor Engineering Conference at Purdue**, West Lafayette, IN, USA, 1994.

Sung, K. R.; Shih, Y. T.; Kim, J., Application of the Expert System for Basic Design of Compressors, **International Compressor Engineering Conference at Purdue**, West Lafayette, IN, USA, 1994.

Tallian, T. E., A Computerized Expert System for Tribological Failure Diagnosis, **Transactions of ASME 238/Vol. 111**, April 1989, 7 p.

Todescat, M. L. A., Domestic Refrigeration: Historical Aspects and Future Prospects, **International Compressor Engineering Conference at Purdue**, West Lafayette, IN, USA, 2012.

Tojo, K.; Machida S.; Saegusa S.; Hirata T., Noise Reduction of Refrigerator Compressors, **International Compressor Engineering Conference at Purdue**, West Lafayette, IN, USA, 1980.

Trott, A. R.; Hundy G. F.; Welch T. C., **Refrigeration and Air Conditioning**, 4<sup>th</sup> Edition, Oxford: Elsevier, 2008, 381 p.

Ussyk, M. S., **Simulação Numérica do Desempenho de Compressores Herméticos Alternativos**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1984.



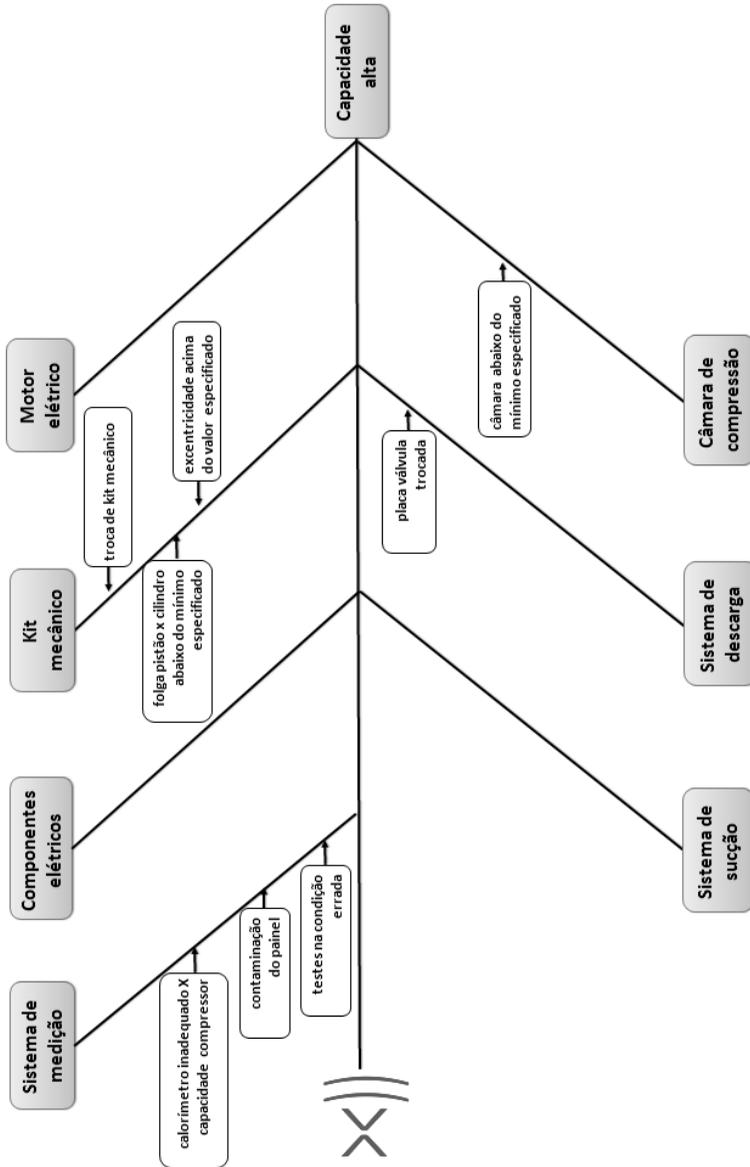


Figura A.2- Diagrama causa-efeito para capacidade acima do valor especificado.

## APÊNDICE B– Diagramas de causa-efeito para os problemas de consumo de potência

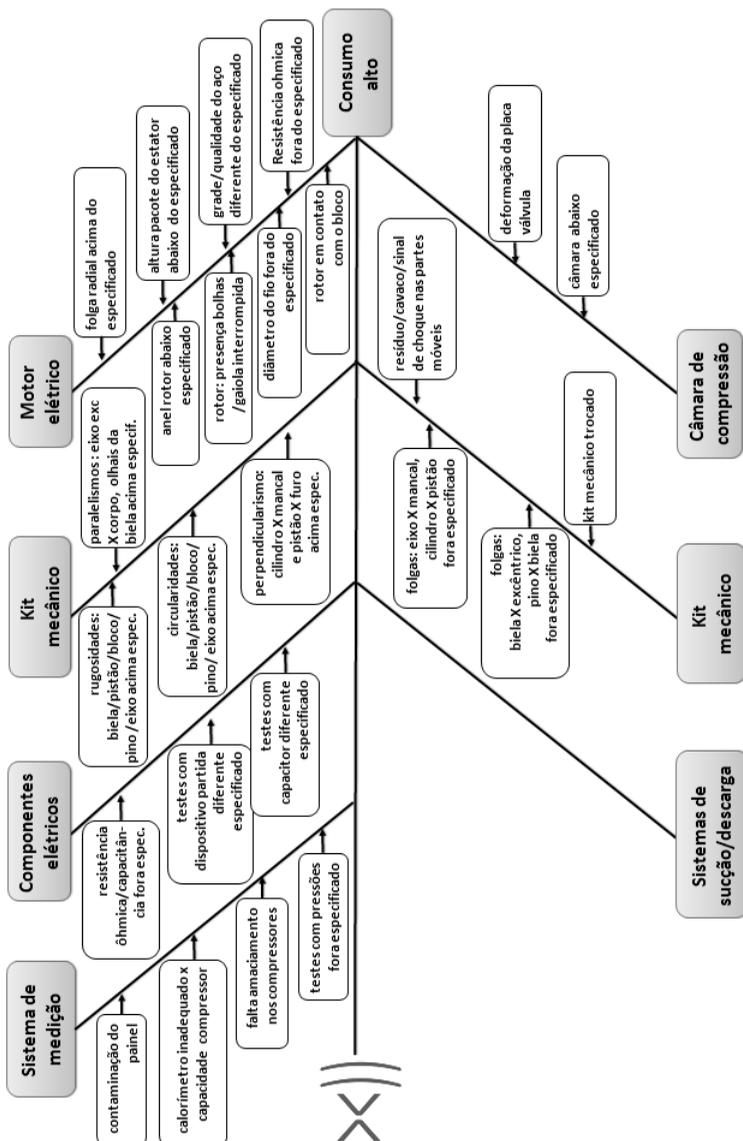


Figura B.1- Diagrama causa-efeito para consumo de potência acima do especificado.

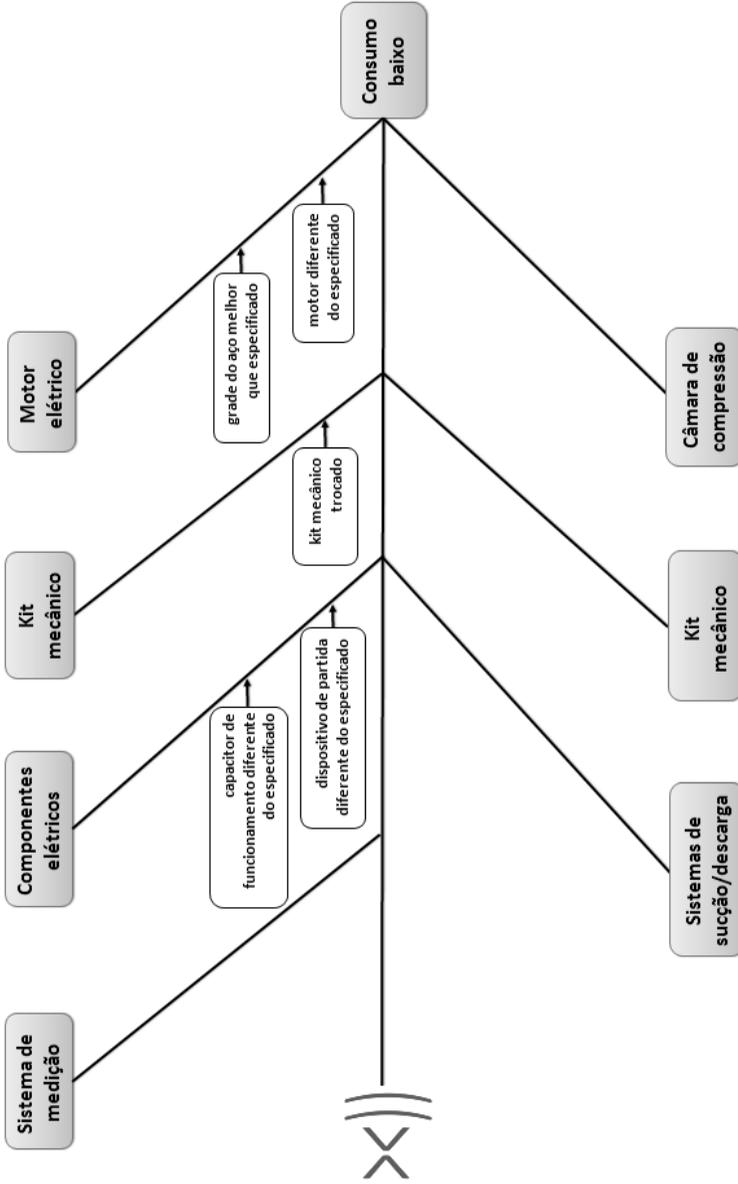


Figura B.2- Diagrama causa-efeito para consumo de potência abaixo do especificado.

## APÊNDICE C– Diagrama de causa-efeito para os problemas de potência sonora (ruído)

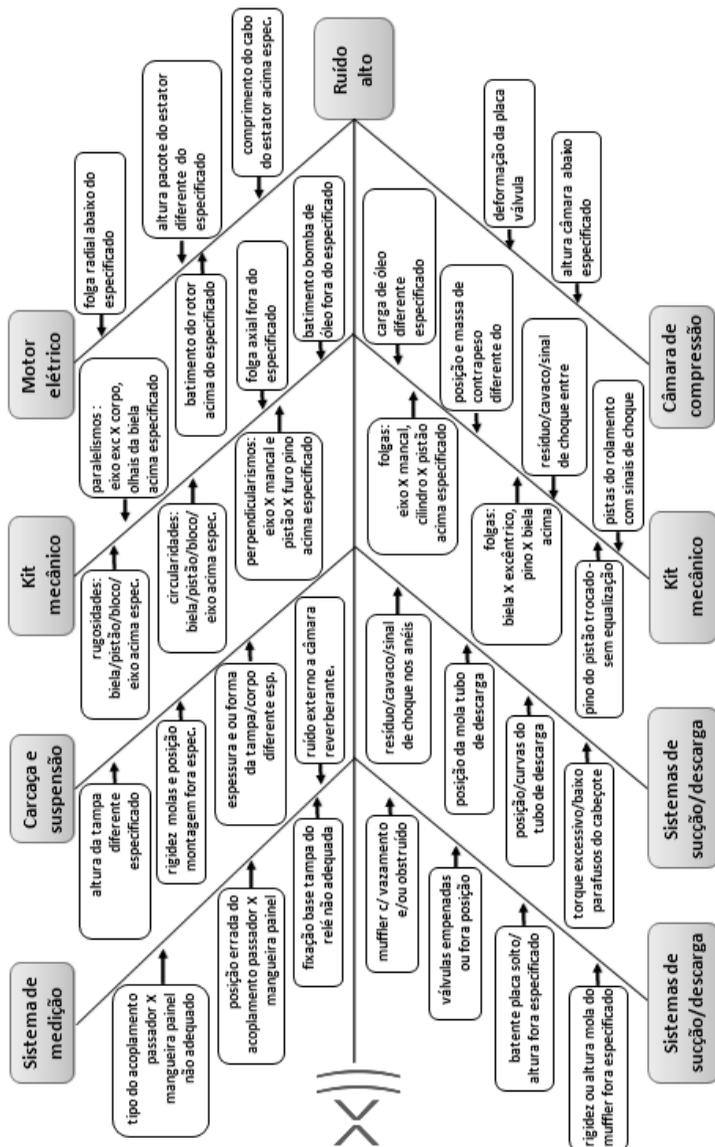


Figura C.1- Diagrama causa-efeito para ruído acima do especificado.

APÊNDICE D– Diagramas de causa-efeito para os problemas de mínima tensão de partida

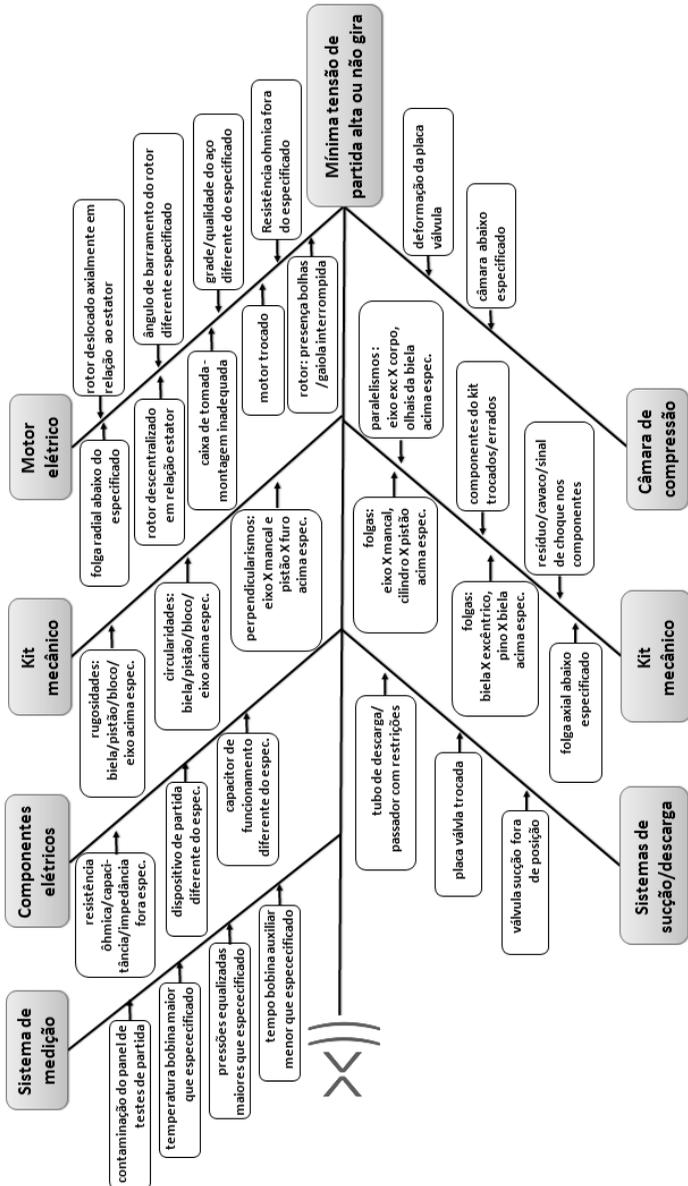


Figura D.1- Diagrama causa-efeito para partida acima do especificado.

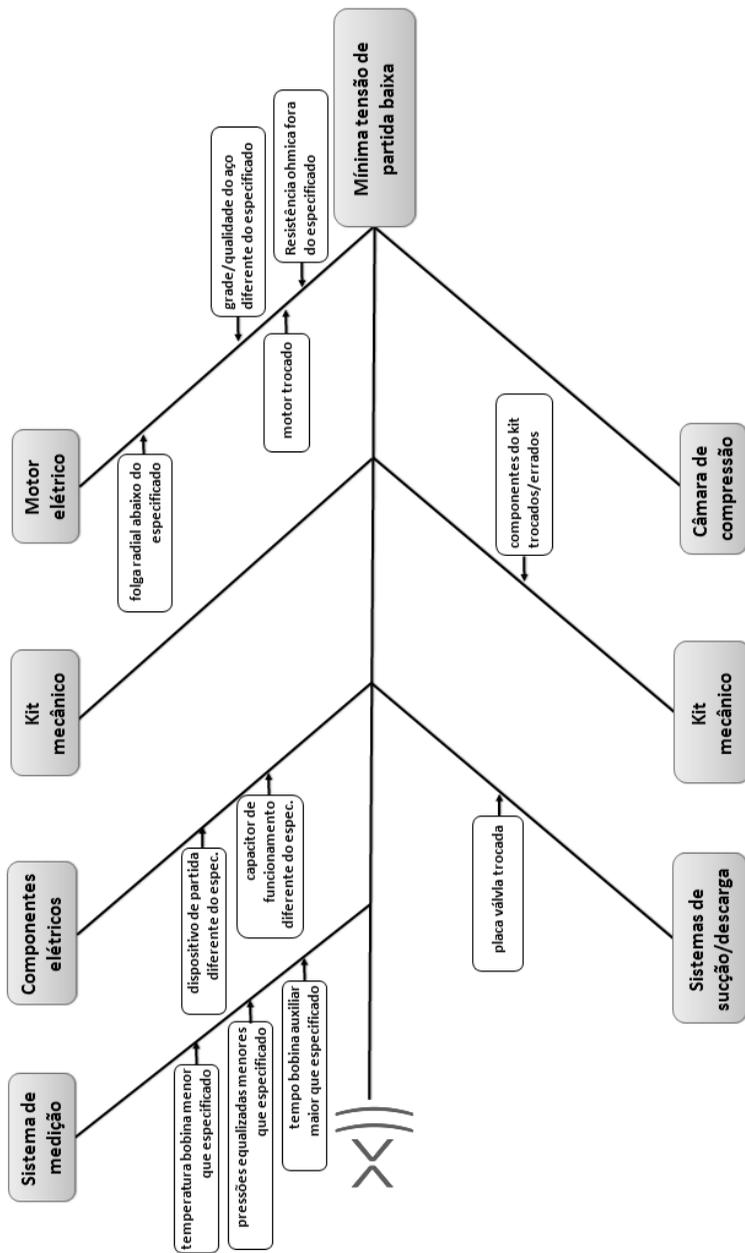


Figura D.2- Diagrama causa-efeito para partida abaixo do especificado.

## APÊNDICE E– FTAs para capacidade de refrigeração

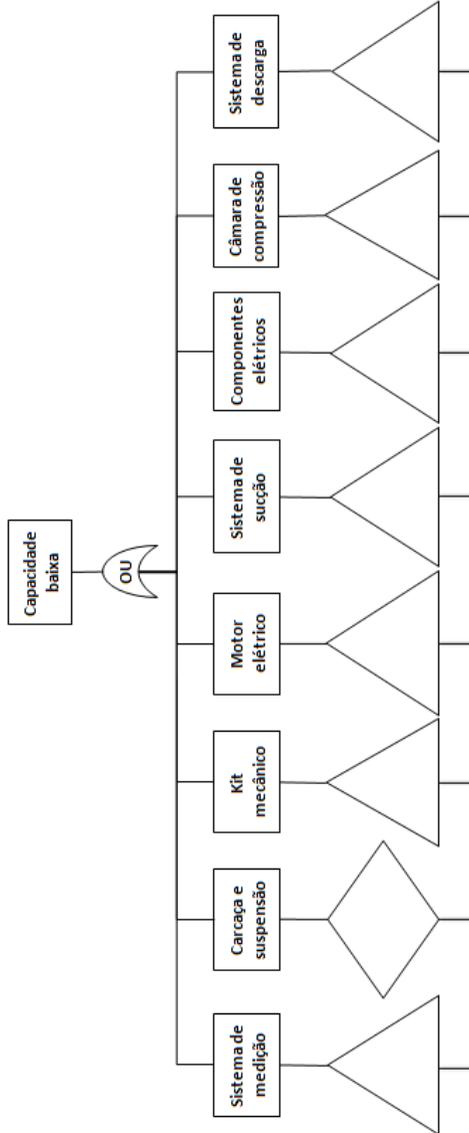
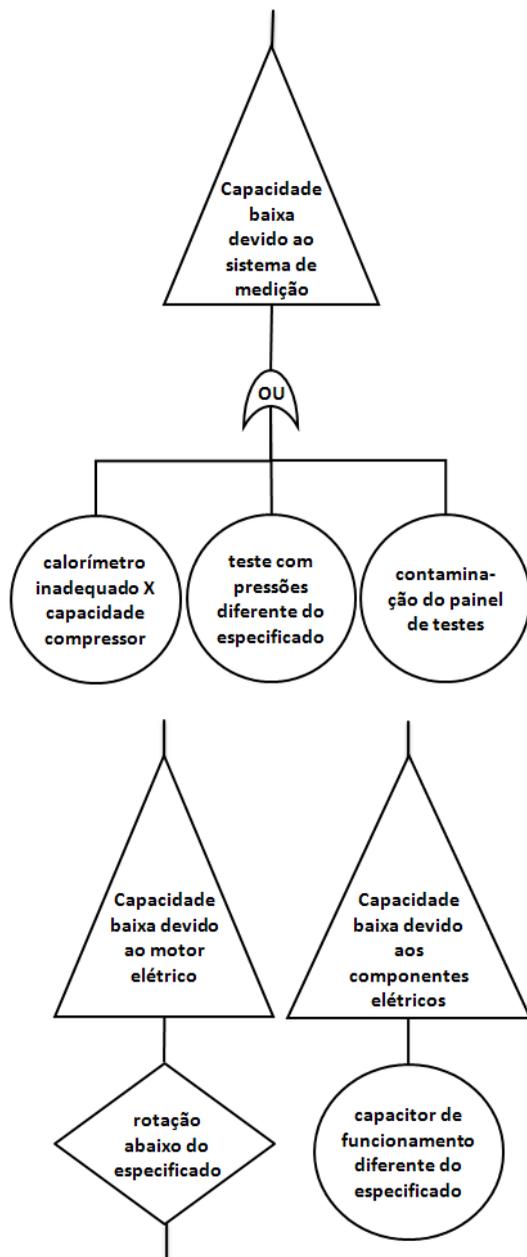


Figura E.1- Desdobramento da FTA para capacidade abaixo do valor especificado .



**Figura E.2-** Desdobramento da FTA para capacidade baixa referente aos sistemas de medição, motor elétrico e componentes elétricos.

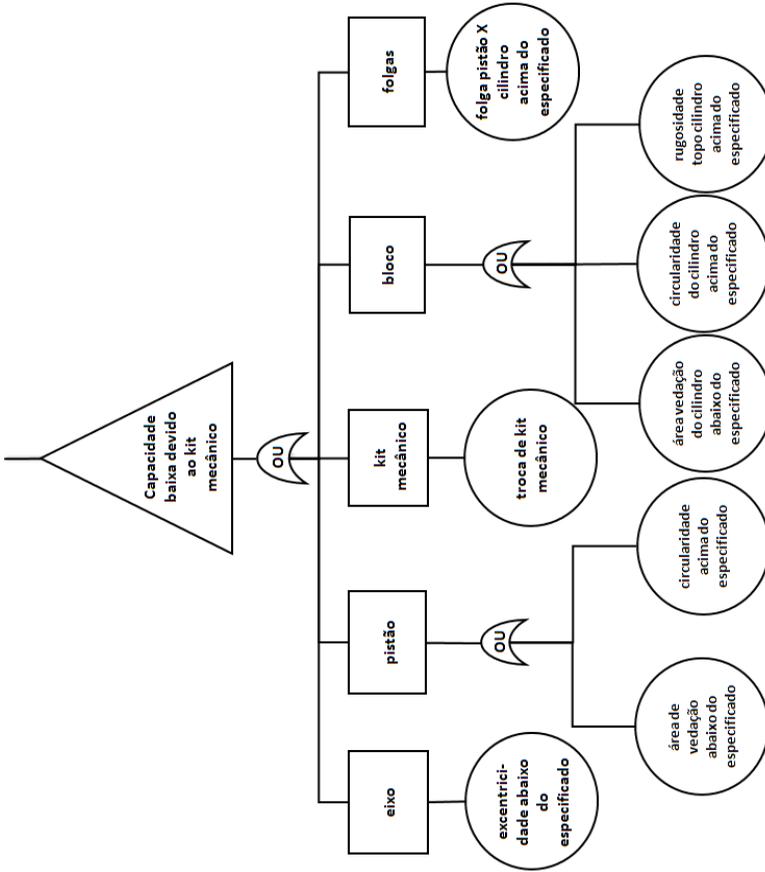


Figura E.3- Desdobramento da FTA para capacidade baixa referente ao kit mecânico.

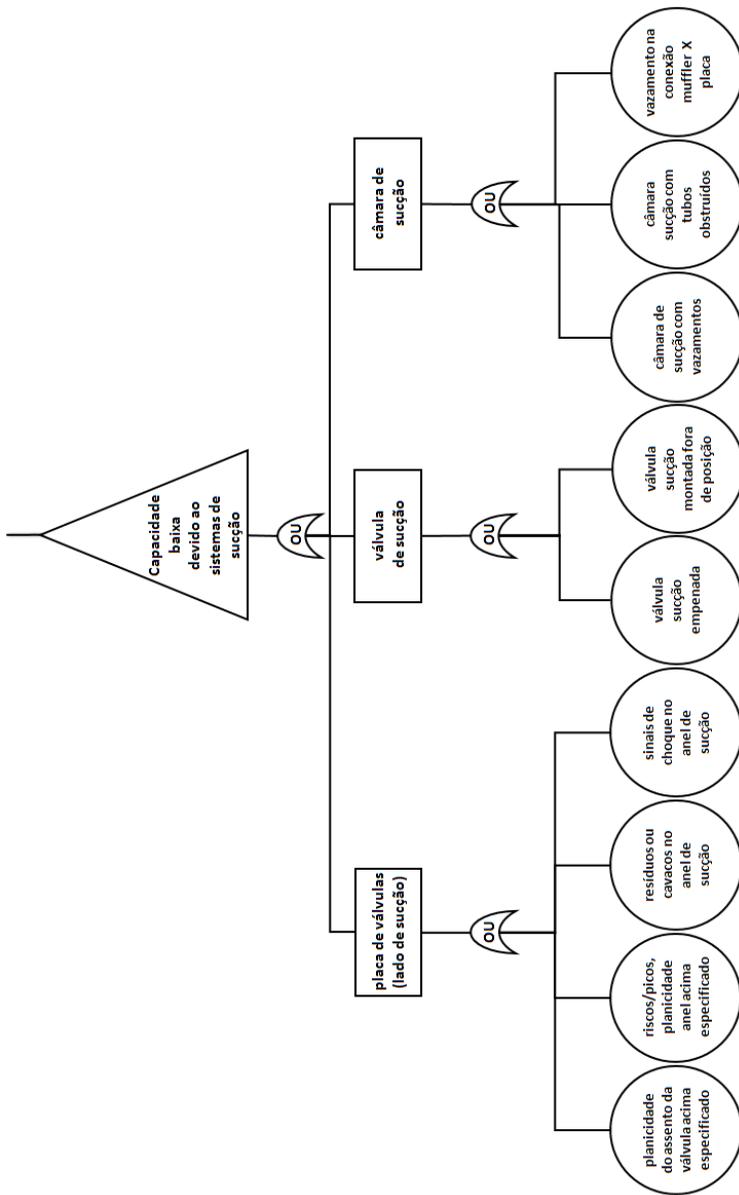


Figura E.4- Desdobramento da FTA de capacidade baixa referente ao sistema de sucção.

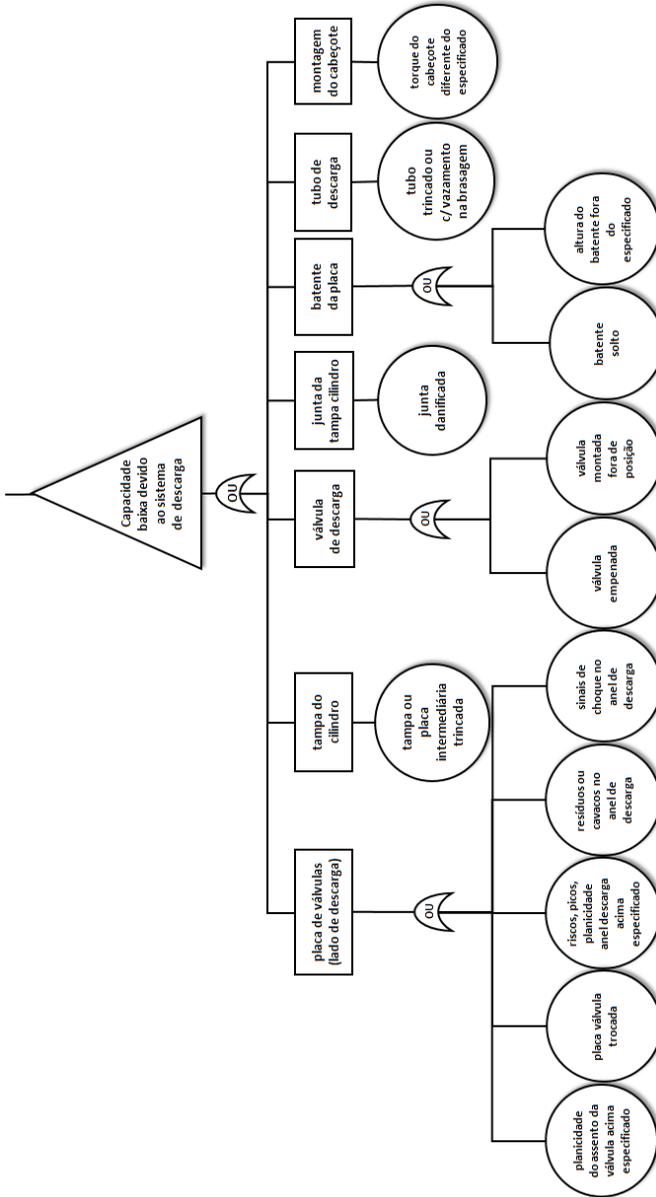
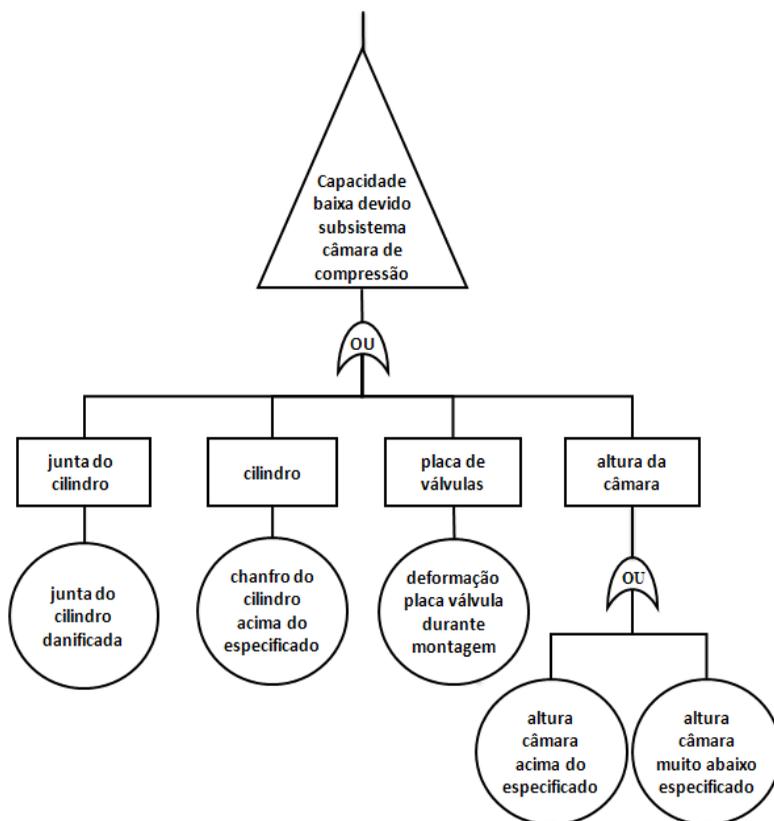


Figura E.5- Desdobramento da FTA de capacidade baixa referente ao sistema de descarga.



**Figura E.6- Desdobramento da FTA de capacidade baixa referente à câmara de compressão.**

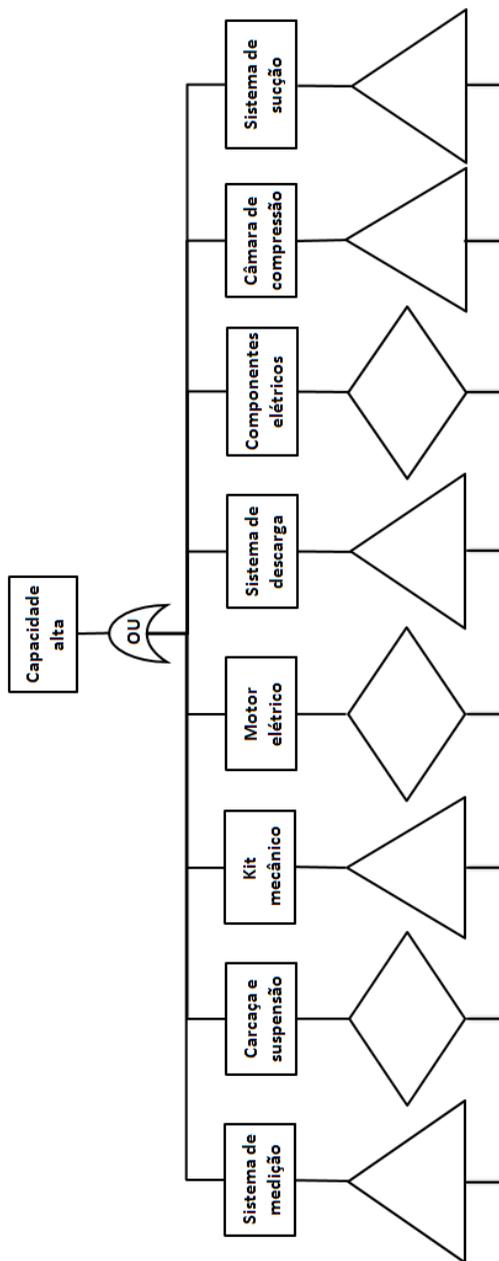
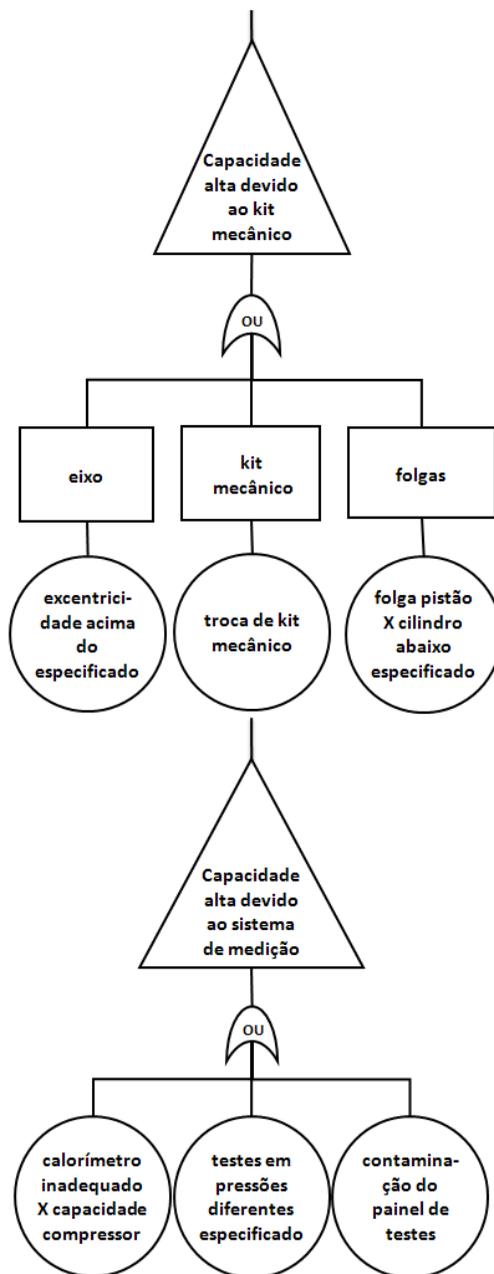
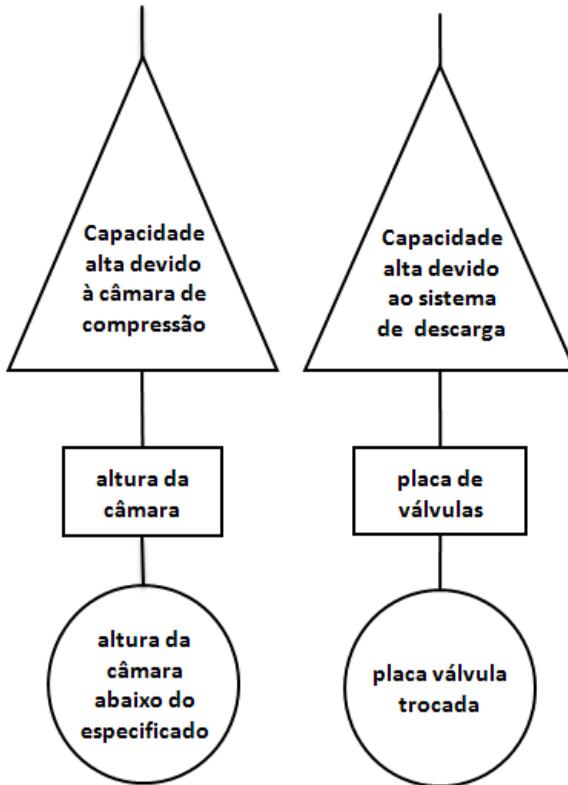


Figura E.7- Desdobramento da FTA para capacidade acima do valor especificado .



**Figura E.8- Desdobramento da FTA para capacidade alta referente aos sistemas de medição e kit mecânico.**



**Figura E.9-** Desdobramento da FTA para capacidade alta referente aos sistemas de descarga e câmara de compressão.

## APÊNDICE F – FTAs para o consumo de potência

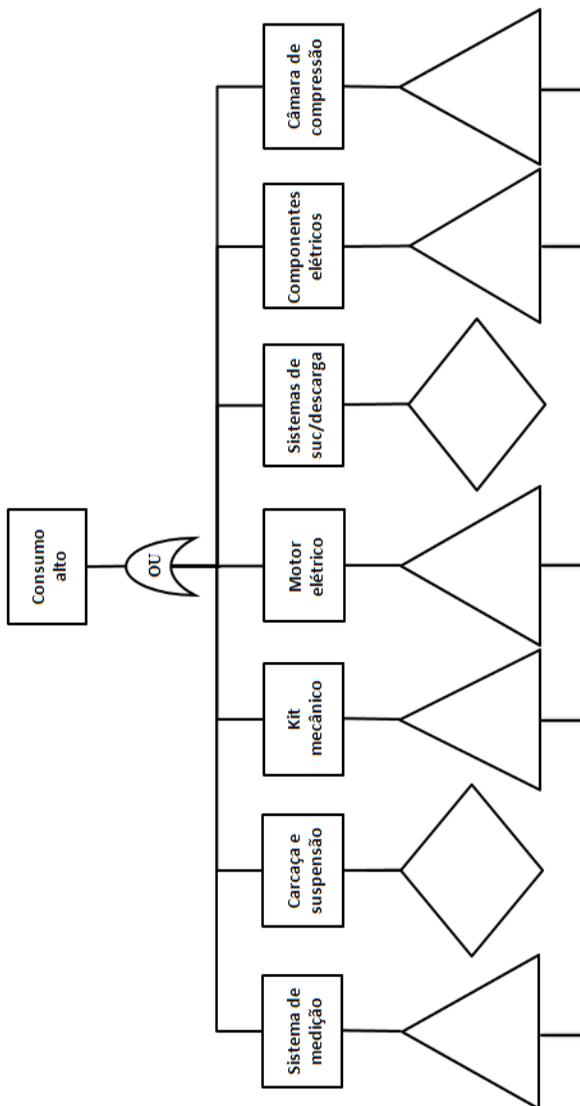
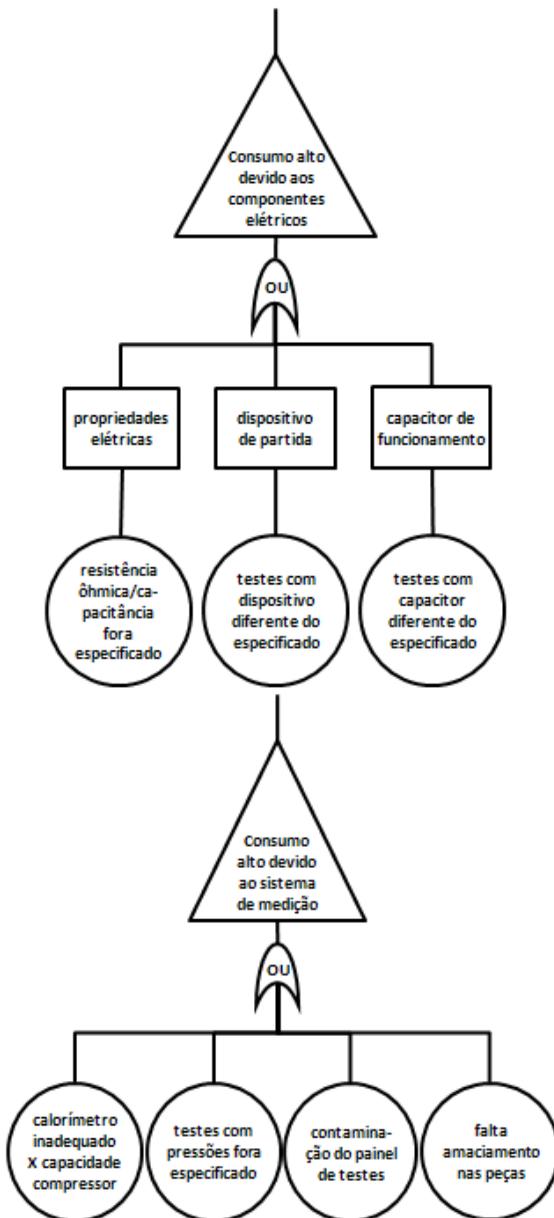


Figura F1- Desdobramento da FTA para consumo acima do valor especificado .



**Figura F.2-** Desdobramento da FTA para consumo alto referente aos sistemas de medição e componentes elétricos.

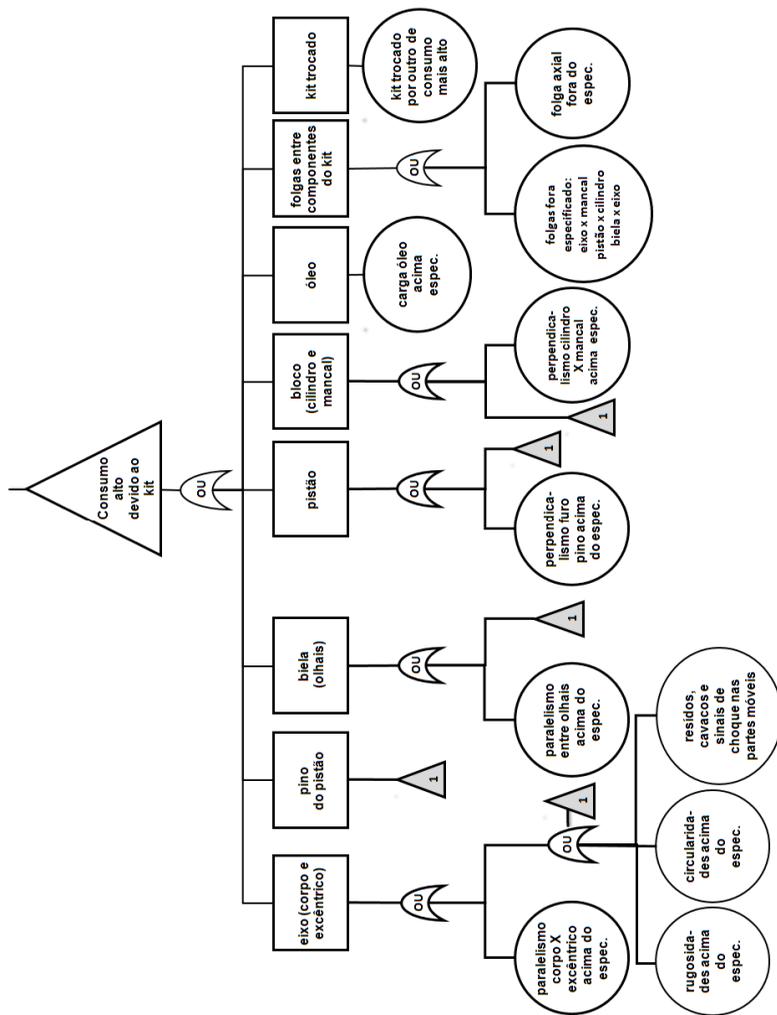


Figura F.3- Desdobramento da FTA para consumo alto referente ao kit mecânico.

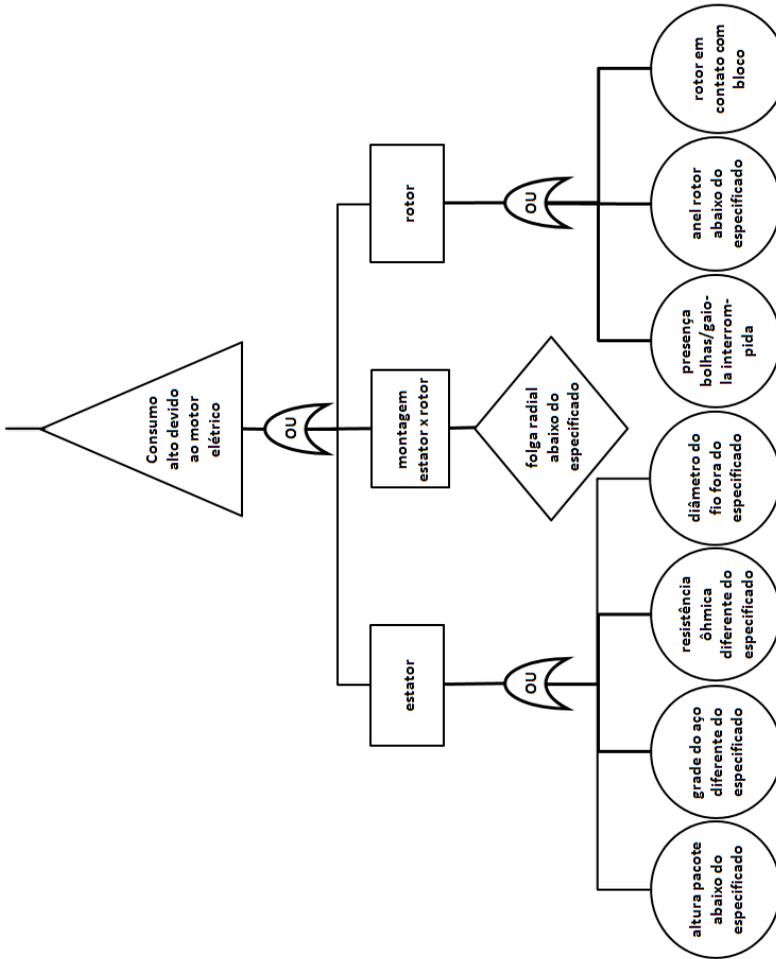
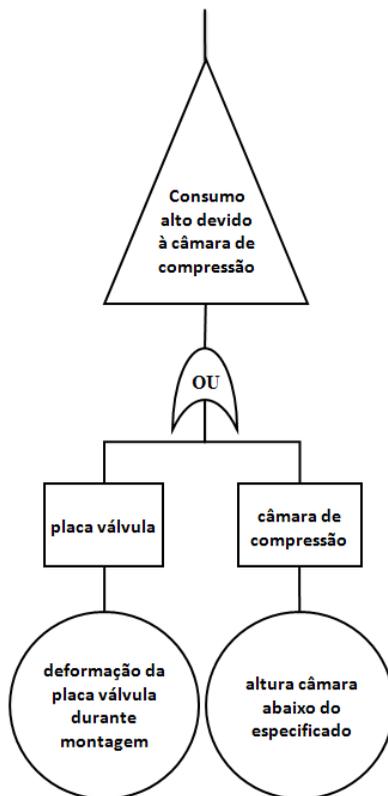


Figura F.4- Desdobramento da FTA para consumo alto referente ao motor elétrico.



**Figura F.5- Desdobramento da FTA para consumo alto referente à câmara de compressão.**

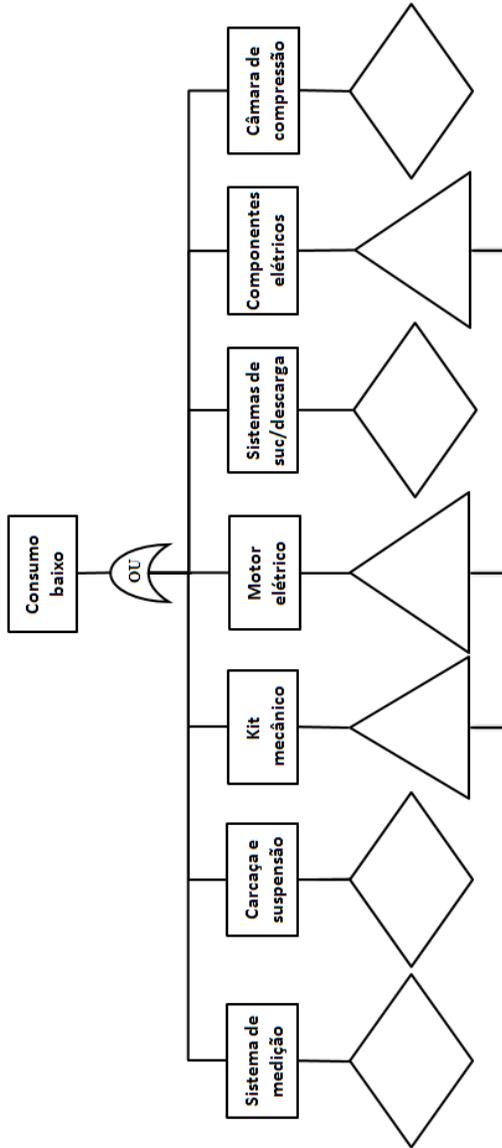
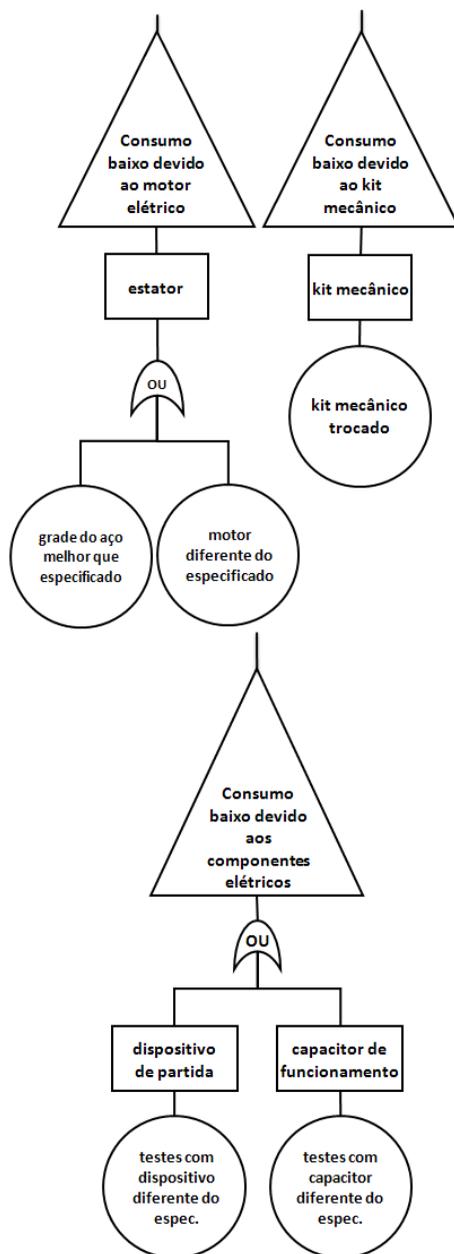


Figura F.6- Desdobramento da FTA para consumo abaixo do valor especificado.



**Figura F.7- Desdobramento da FTA para consumo abaixo do valor especificado.**

## APÊNDICE G– FTA para ruído acima do especificado

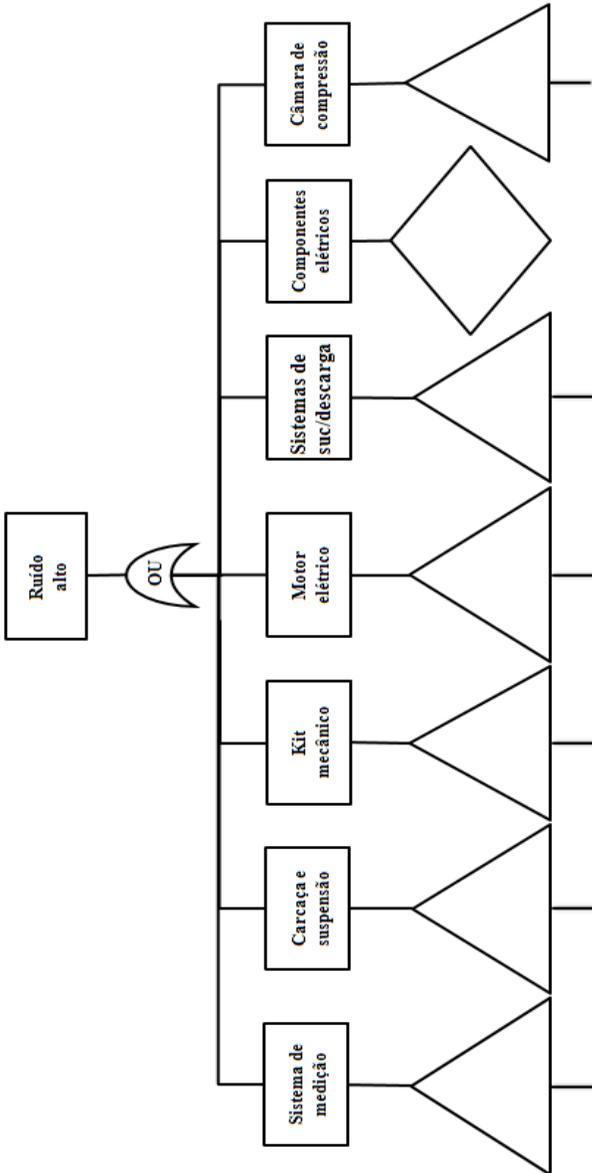


Figura G.1- Desdobramento da FTA de ruído acima do especificado.

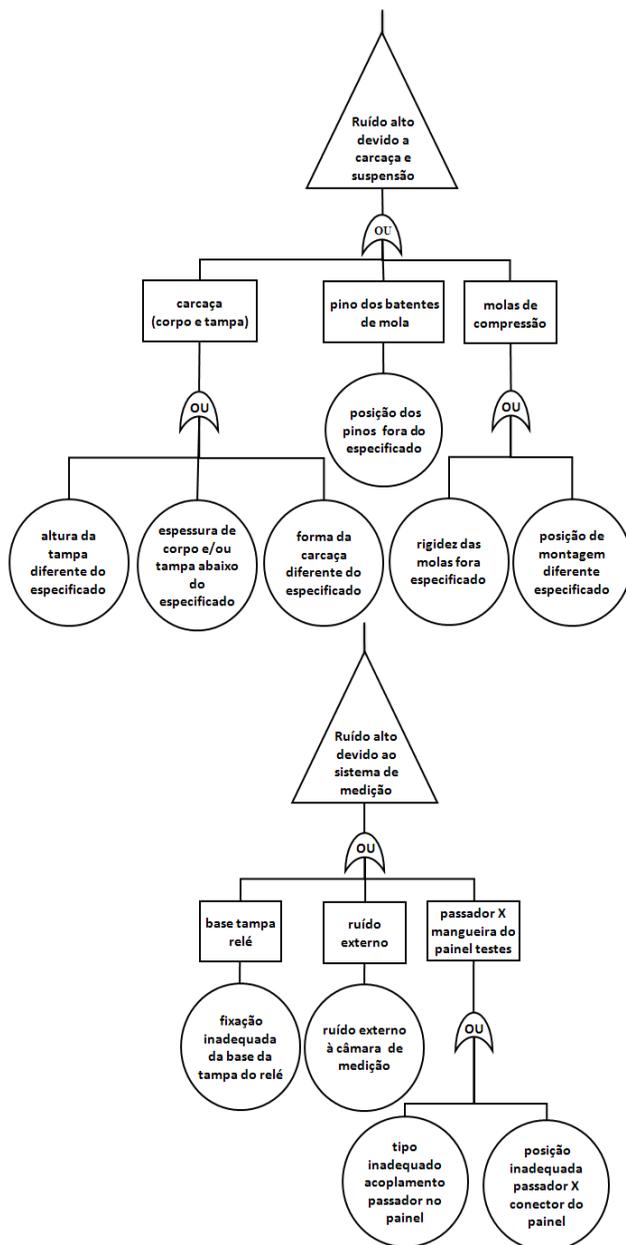


Figura G.2- Desdobramento da FTA para ruído alto referente aos sistemas de medição, carcaça e suspensão.

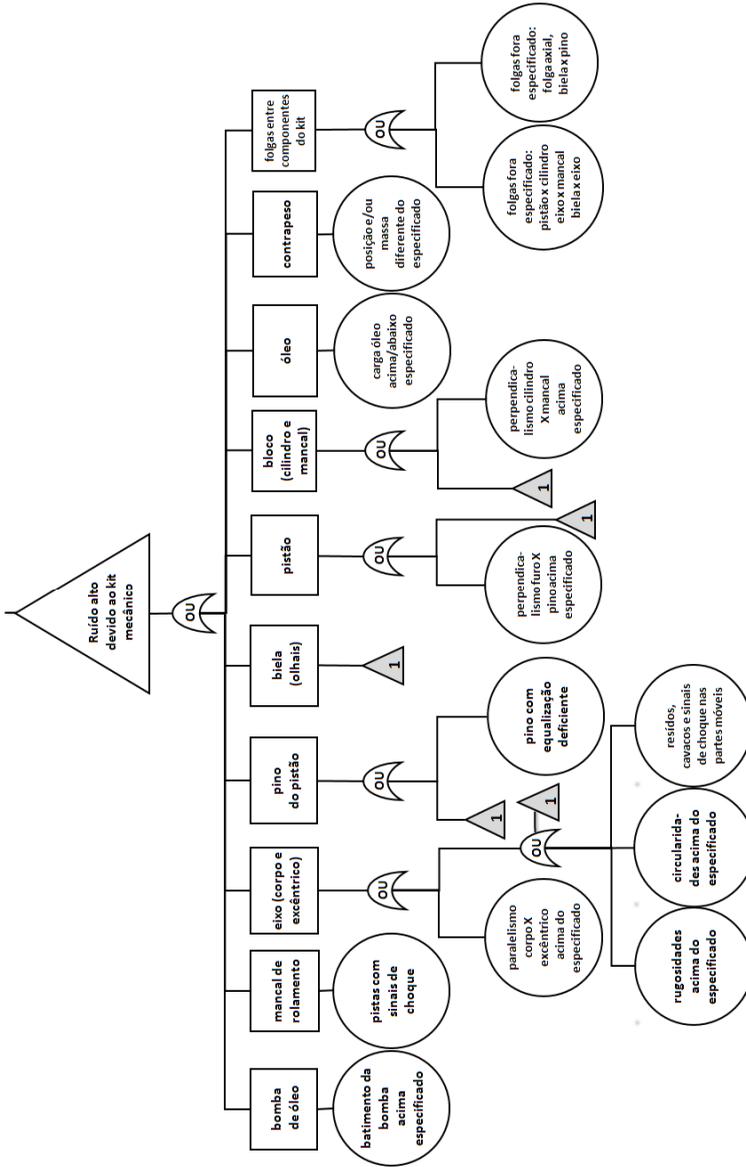
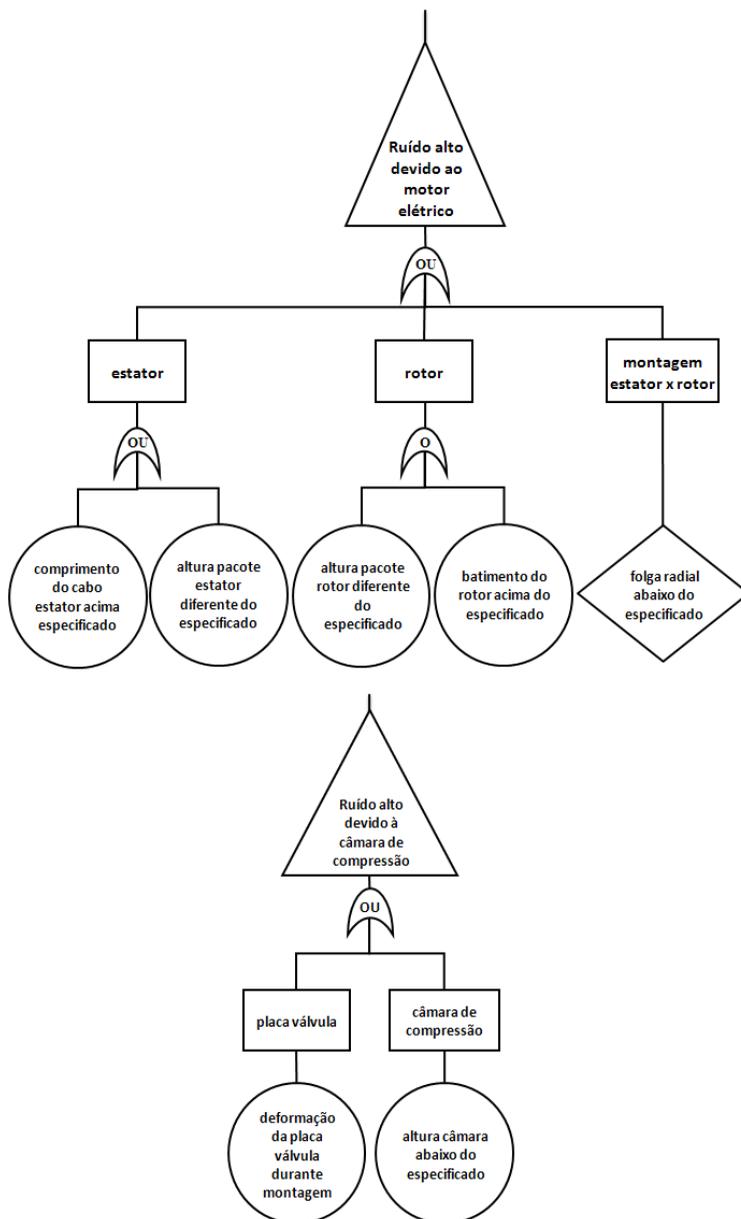
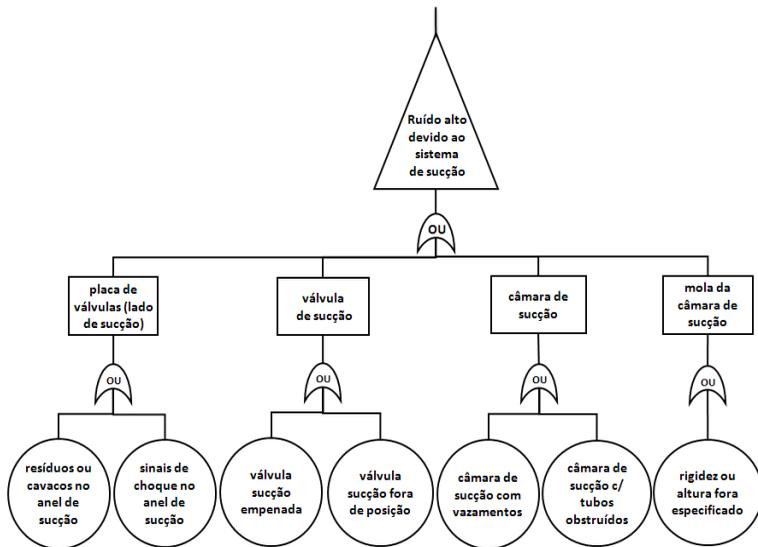


Figura G.3- Desdobramento da FTA para ruído alto referente ao kit mecânico.



**Figura G.4- Desdobramento da FTA de ruído alto referente ao motor elétrico e a câmara de compressão.**



**Figura G.5- Desdobramento da FTA para ruído alto referente ao sistema de sucção.**

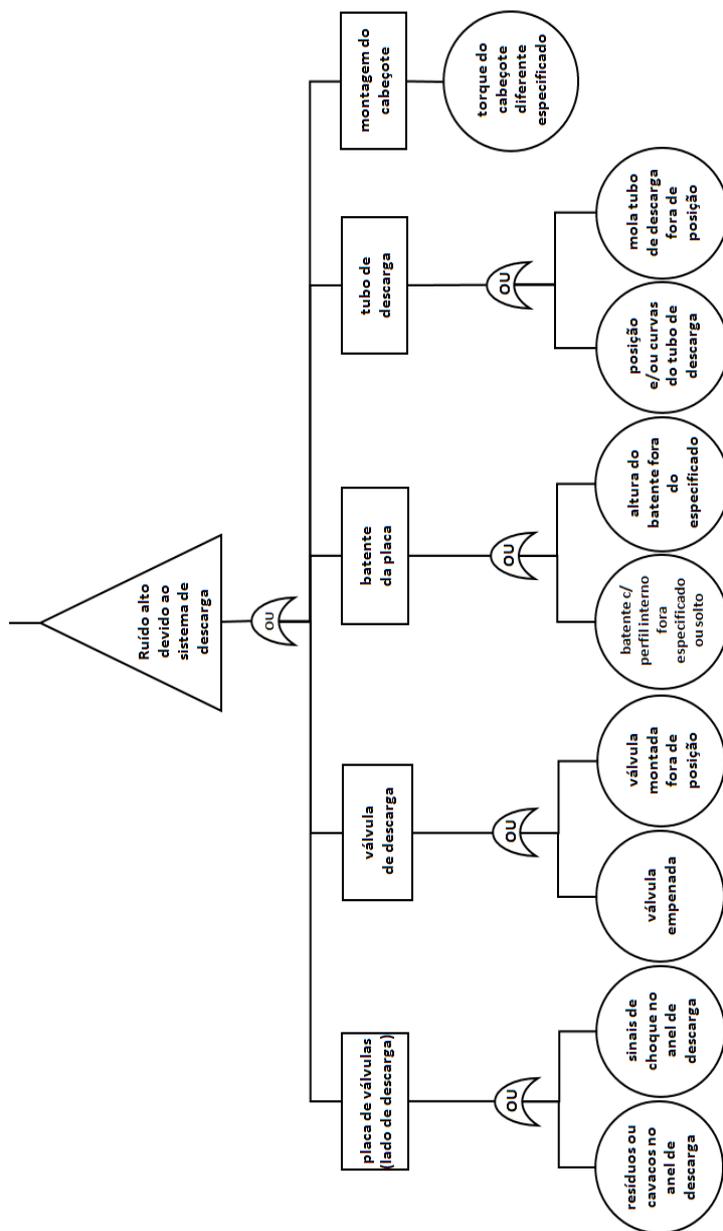


Figura G.6- Desdobramento da FTA para ruído alto referente ao sistema de descarga.

## APÊNDICE H- FTAs para mínima tensão de partida

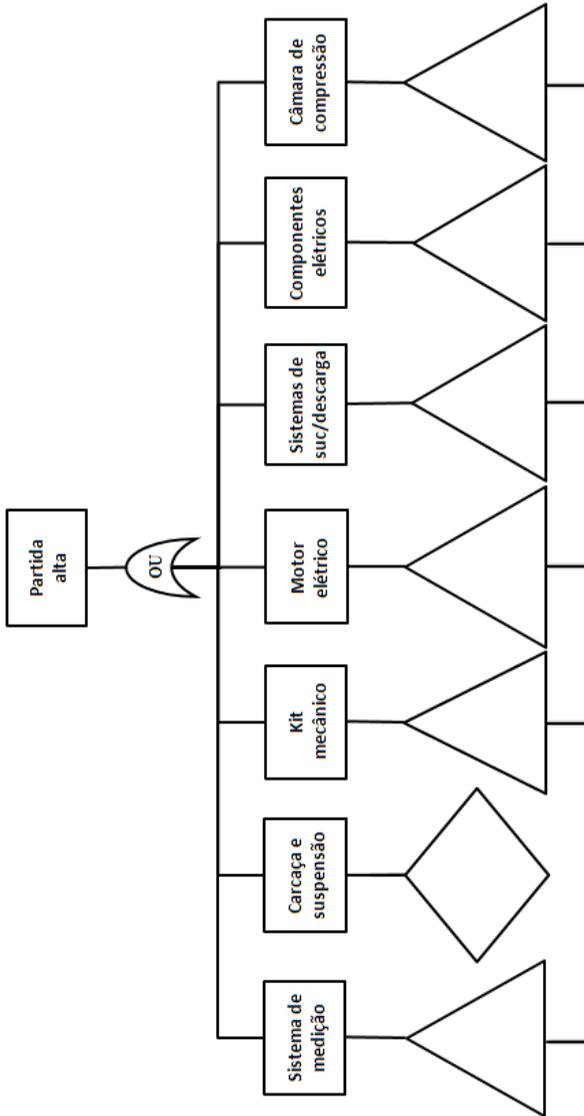
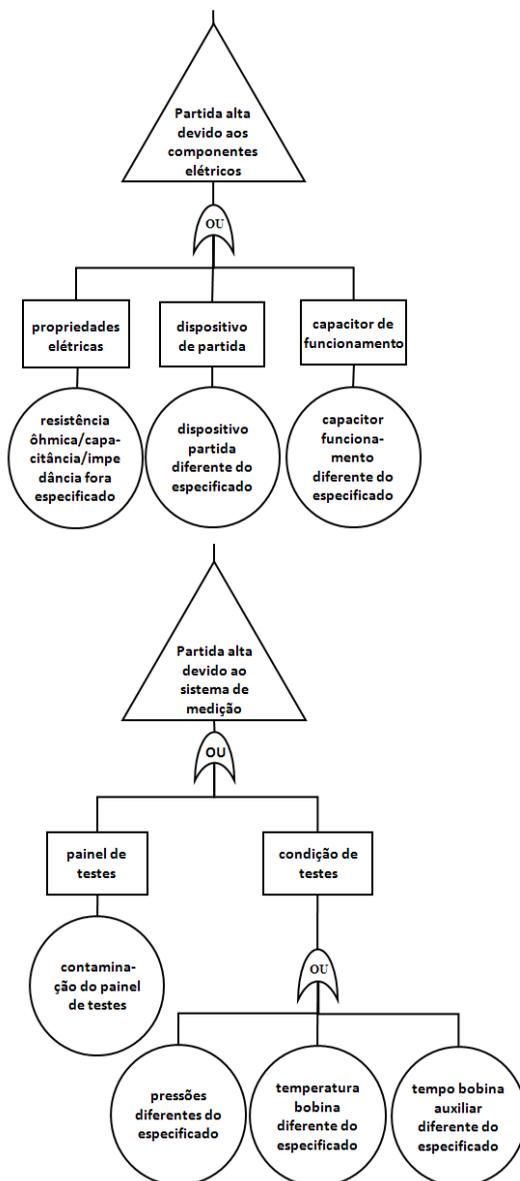


Figura H.1- Desdobramento da FTA para partida acima do valor especificado.



**Figura H.2- Desdobramento da FTA para partida alta referente aos sistemas de medição e componentes elétricos.**

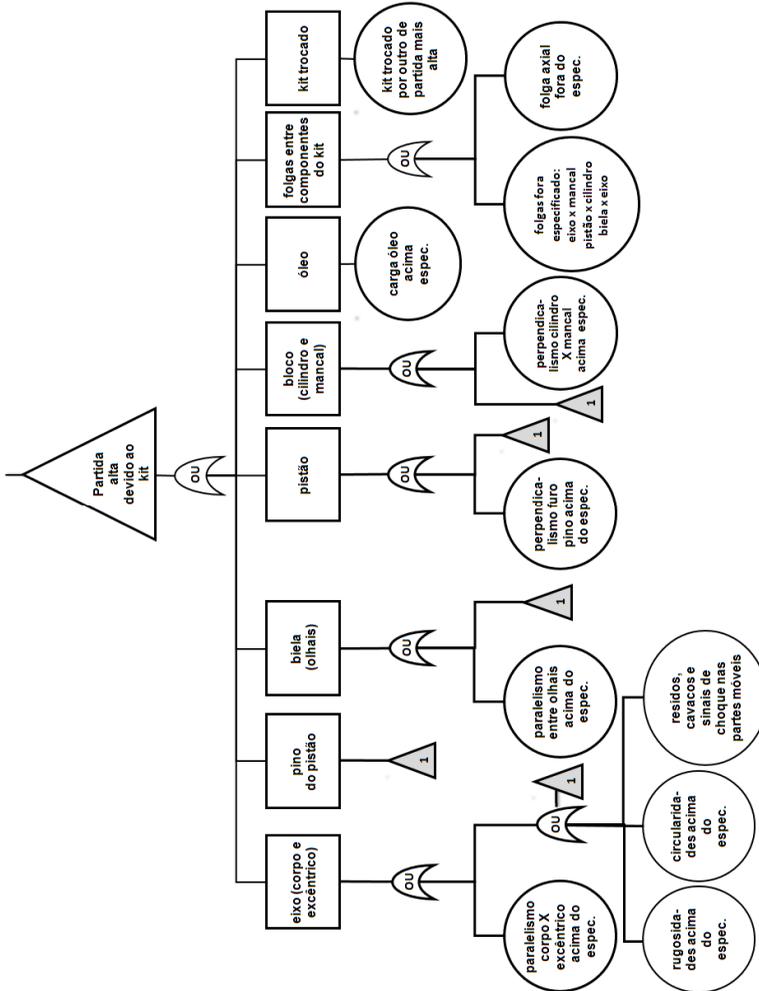


Figura H.3- Desdobramento da FTA para partida alta referente kit mecânico.

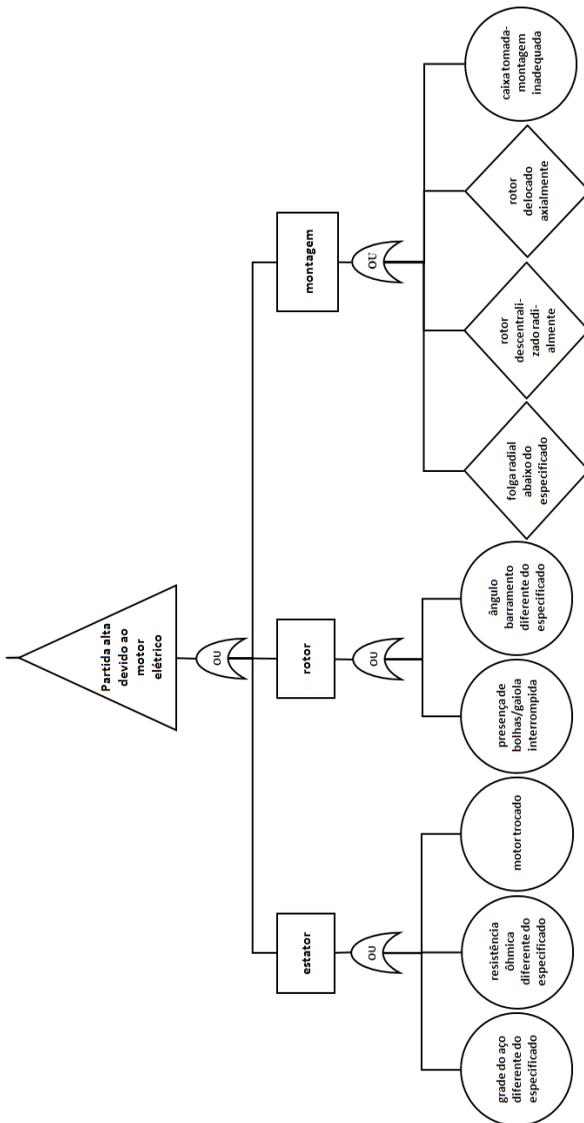
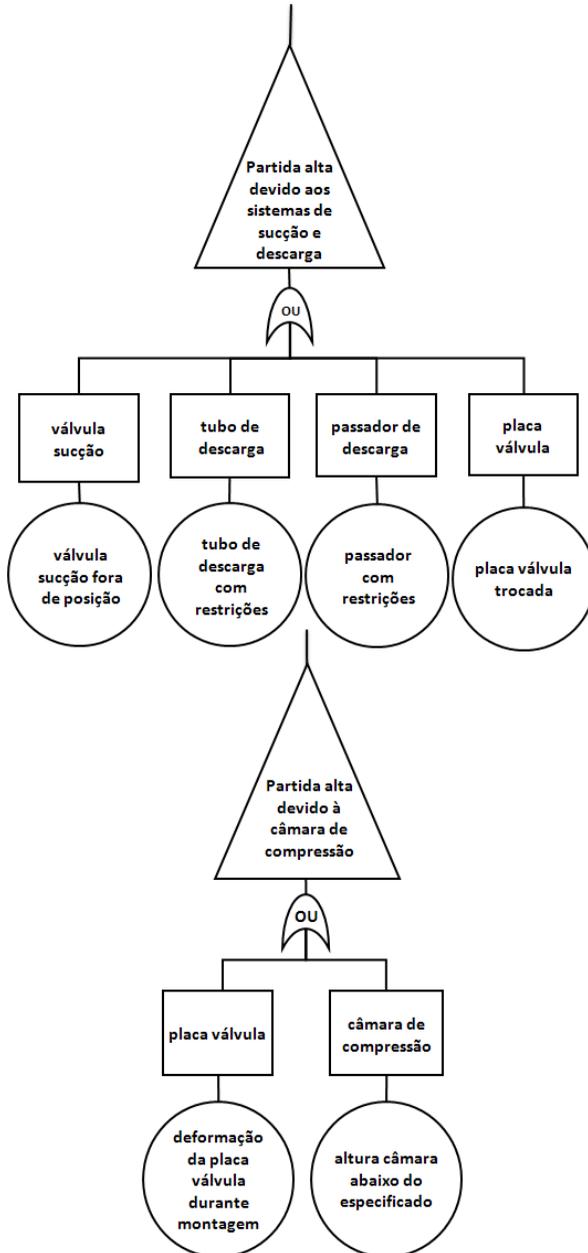


Figura H.4- Desdobramento da FTA para partida alta referentes ao motor elétrico.



**Figura H.5- Desdobramento da FTA para partida alta referente aos sistemas de sucção, descarga e câmara de compressão.**

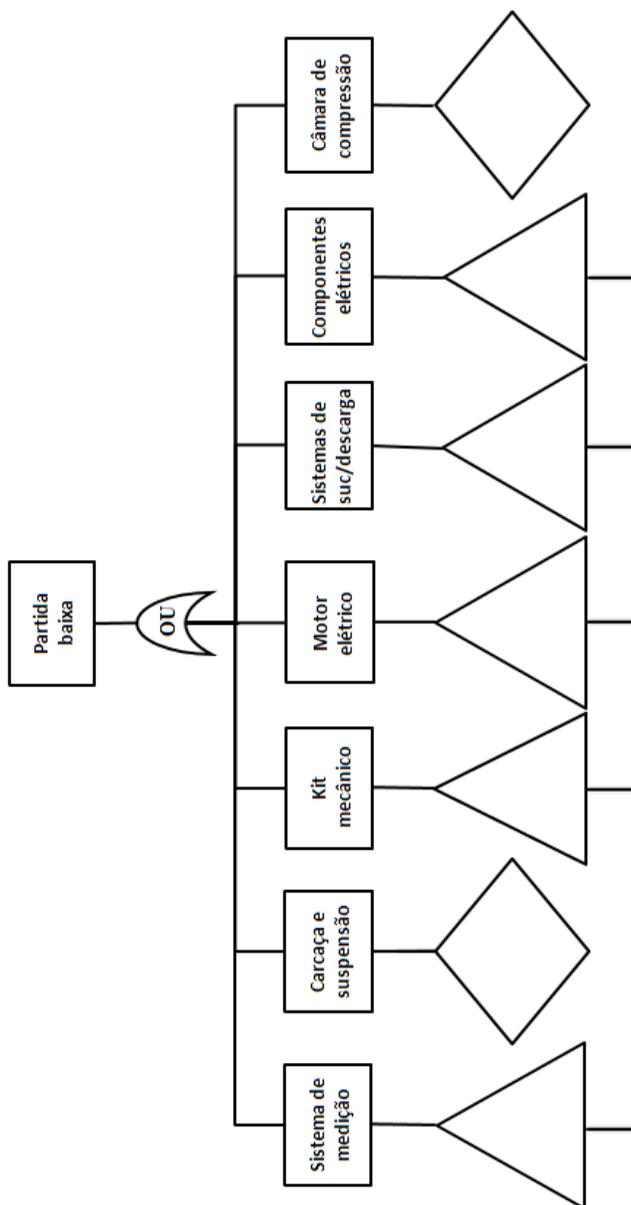
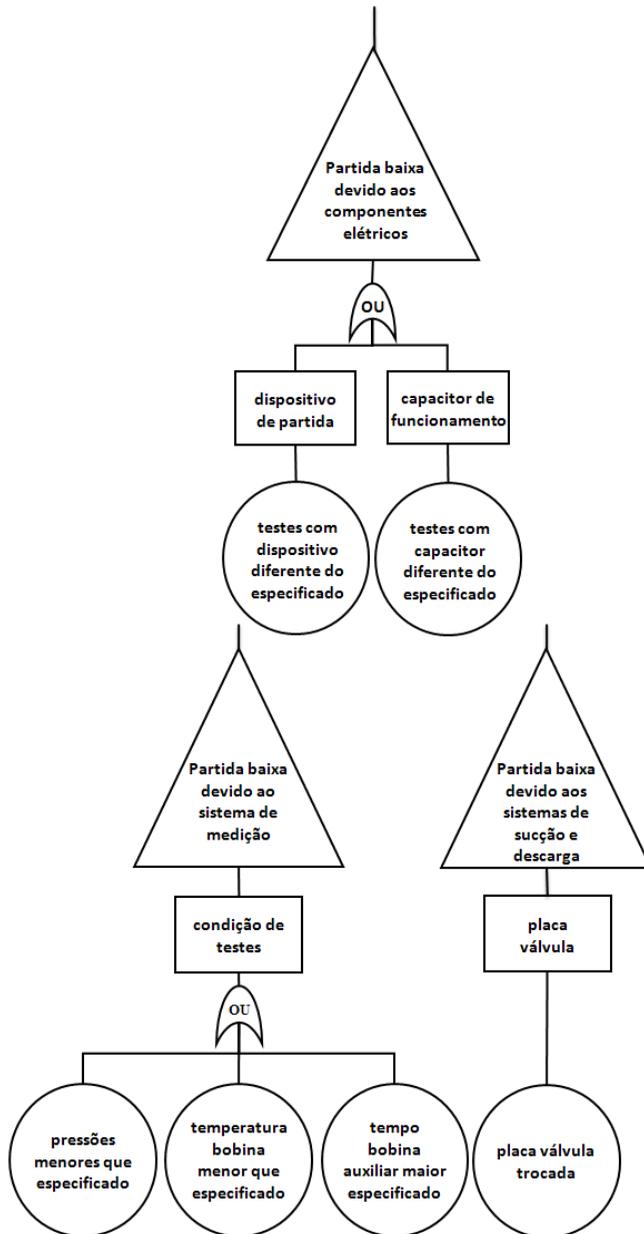
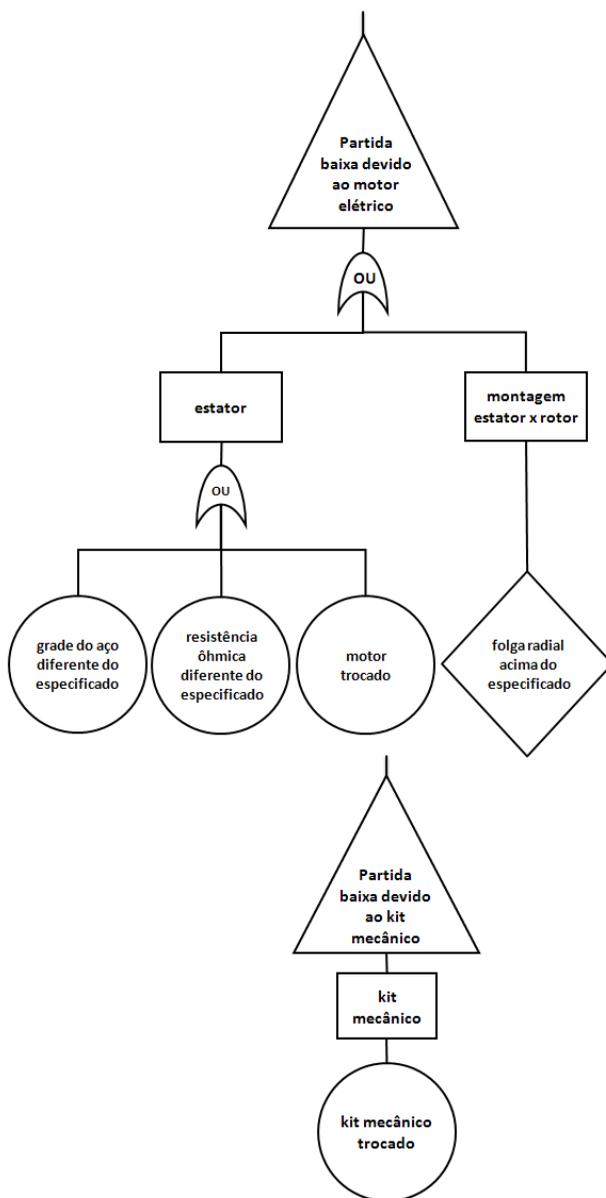


Figura H.6- Desdobramento da FTA para partida abaixo do valor especificado.



**Figura H.7- Desdobramento da FTA para partida baixa referente aos sistemas de medição, sucção, descarga e componentes elétricos.**



**Figura H.8- Desdobramento da FTA para partida alta referente ao kit mecânico e motor elétrico.**

## APÊNDICE I- Entrada de dados para verificação do SE

Tabela I.1- Entrada de dados para verificação do SE - atributos de capacidade e consumo.

entrada de dados	capacidade de refrigeração	consumo de potência	ruido total	vazamento	diagnóstico emitido	diagramas: causa-efeito e informações adicionais
1 a 9	alta	alto/similar/baixo	alto/similar/baixo	alto	sim	sim
10 a 18	alta	alto/similar/baixo	alto/similar/baixo	similar	sim	sim
19 a 27	alta	alto/similar/baixo	alto/similar/baixo	baixo	sim	sim
28 a 36	similar	alto/similar/baixo	alto/similar/baixo	alto	sim	sim
37 a 45	similar	alto/similar/baixo	alto/similar/baixo	similar	sim	sim
46 a 54	similar	alto/similar/baixo	alto/similar/baixo	baixo	sim	sim
55 a 63	baixa	alto/similar/baixo	alto/similar/baixo	alto	sim	sim
64 a 72	baixa	alto/similar/baixo	alto/similar/baixo	similar	sim	sim
73 a 81	baixa	alto/similar/baixo	alto/similar/baixo	baixo	sim	sim

Tabela I.2 - Entrada de dados para verificação do SE - atributo de ruído.

entrada de dados	faixa do espectro para análise de ruído	nível de ruído	número de picos de ruído alto	número de bandas de 1/3 oitava entre picos	diagnóstico emitido	diagramas: causa-efeito e informações adicionais
1 a 3	alta_freq/media_freq/baixa_freq	alto	1		sim	sim
4 a 6	alta_freq/media_freq/baixa_freq	alto	2	0	sim	sim
7 a 9	alta_freq/media_freq/baixa_freq	alto	2	1	sim	sim
10 a 12	alta_freq/media_freq/baixa_freq	alto	2	2	sim	sim
13 a 15	alta_freq/media_freq/baixa_freq	alto	2	3	sim	sim
16 a 18	alta_freq/media_freq/baixa_freq	alto	2	4	sim	sim
19 a 21	alta_freq/media_freq/baixa_freq	alto	2	5	sim	sim
22 a 24	alta_freq/media_freq/baixa_freq	alto	3		sim	sim
25 a 27	alta_freq/media_freq/baixa_freq	alto	4		sim	sim
28 a 30	alta_freq/media_freq/baixa_freq	alto	5		sim	sim
31 a 33	alta_freq/media_freq/baixa_freq	alto	6		sim	sim
34 a 36	alta_freq/media_freq/baixa_freq	alto	7		sim	sim
37 a 39	alta_freq/media_freq/baixa_freq	baixo/similar	0		sim	sim

**Tabela I.3- Entrada de dados para verificação do SE – atributo de mínima tensão de partida.**

entrada de dados		consumo de potência	mínima tensão de partida	diagnóstico emitido	diagramas: causa-efeito e informações adicionais
1	a	alto	alto/similar/baixo/ não gira	sim	sim
5	a	similar	alto/similar/baixo/ não gira	sim	sim
9	a	baixo	alto/similar/baixo/ não gira	sim	sim
13	a	desconhecido	alto/similar/baixo/ não gira	sim	sim

## APÊNDICE J– Diagrama Funcional do SE

