

Sérgio Perin Júnior

**SISTEMA ESPECIALISTA PROTÓTIPO PARA SUPORTE AO
DESENVOLVIMENTO DE COMPRESSORES HERMÉTICOS
DE APLICAÇÃO DOMÉSTICA**

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
2018

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

Perin Júnior, Sérgio

Sistema especialista protótipo para suporte ao desenvolvimento de compressores herméticos de aplicação doméstica / Sérgio Perin Júnior ; orientador, Jonny Carlos da Silva, 2018.

112 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Sistema Especialista. 3. Desenvolvimento de Produto. 4. Compressor Hermético. I. Carlos da Silva, Jonny. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Sérgio Perin Júnior

**SISTEMA ESPECIALISTA PROTÓTIPO PARA SUPORTE AO
DESENVOLVIMENTO DE COMPRESSORES HERMÉTICOS
DE APLICAÇÃO DOMÉSTICA**

Esta Dissertação/Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 17 de Setembro de 2018.

Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

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

Prof. Acires Dias – Dr. Eng
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Sílvia Modesto Nassar , Dra. Eng
Universidade Federal de Santa Catarina (INE)

Marco Carrilho Diniz , Dr. Eng
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico esta dissertação à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a UFSC através de seus professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pelo ensino de qualidade prestado ao longo das disciplinas cursadas.

Obrigado ao professor Jonny pela sua orientação impecável, sempre com clareza em suas explicações, pela oportunidade de poder aliar conhecimento à prática através do tema de Sistema Especialista.

A empresa Embraco na qual este estudo foi elaborado, por disponibilizar os recursos e informações necessárias.

Aos amigos de empresa que participaram de forma direta ou indireta da minha caminhada para a realização deste trabalho.

Em especial aos colegas Sérgio Lohn, Diego Sacomori, Luis Jovita, Aleandro Espíndola, Marcelo Zanelato, Claudio Soares, Otávio Santini que contribuíram na criação da base de conhecimento desta dissertação. E aos especialistas Carlos Mafra, Laerte Campestrini e Zhu Jianchao que participaram do processo de validação do Sistema Especialista.

Aos meus pais, Sérgio e Nádia, por todo suporte para fazer com que este dia se tornasse realidade.

A minha esposa Fernanda, pela compreensão nos momentos de ausência e pelo incentivo ao longo desses anos.

RESUMO

A proposta principal deste trabalho é a criação de um Sistema Especialista para dar suporte ao desenvolvimento de compressores herméticos de aplicação doméstica de velocidade variável. No projeto de produto existe a necessidade de caracterizar os requisitos técnicos do compressor que são base para o planejamento de testes do mesmo. O levantamento destes requisitos é feito em conjunto por especialistas de diferentes áreas. No entanto, nem sempre todos os requisitos são avaliados, ou então, estes são avaliados de forma incompleta. Basicamente isto pode ocorrer pela: falta de experiência do especialista; pela documentação incompleta de projetos anteriores (quando os mesmos podem servir de base); pela não existência de um banco de dados completo. Inicialmente é feita revisão técnica relativa a compressores herméticos (funcionamento e definições; subsistemas; principais requisitos), bem como, acerca dos conceitos e etapas no desenvolvimento de Sistemas Especialistas. A seguir é detalhada a metodologia do Sistema Especialista Protótipo passando pelas etapas de aquisição e representação do conhecimento, implementação do código e por fim, sua verificação e validação. O resultado final mostra o potencial do Sistema Especialista Protótipo na etapa de análise crítica do desenvolvimento de produto na qual, foram mapeados mais de 30 tipos de alterações típicas de produto e seus impactos em 7 requisitos funcionais. O Sistema Especialista está no idioma inglês para poder ser utilizado pelos outros centros de engenharia da empresa-alvo (como México e China). O mesmo é hoje um dos principais materiais que reúne o conhecimento tácito adquirido nos últimos desenvolvimentos de produto, que pode ser utilizado por especialistas de produto para facilitar o processo de caracterização dos requisitos técnicos, evitando *looping*, bem como, robustecer a análise independente do nível de conhecimento do especialista.

Palavras-chave: Compressor hermético. Desenvolvimento de produto. Sistema Especialista.

ABSTRACT

The main proposal of this work is to design an Expert System Prototype to support the variable speed hermetic compressors development for household appliances. In the product project there is the need to characterize the compressor technical requirements which are the basis for the test planning. The acquirement of these requirements is done among specialists from different areas. But the requirements are not always evaluated, or then, they are evaluated in an incomplete way. Basically this can occur due to: lack of experience from the specialist; by incomplete documentation from previous projects (when those may be used as basis reference); by nonexistence of a complete data basis. Initially will be done a hermetic compressors technical review (operation and definitions; subsystems; main requirements), as well, presented the concepts and phases in the Expert System development. Next, it describes the Prototype Expert System methodology going through the phases of knowledge acquisition and representation, code implementation and by the end, its verification and validation. The final results shows the potential of this Prototype Expert System in the stage of product development critical analysis, in which it was mapped more the 30 typical product changes and its impacts in 7 functional requirements. The Expert System user-interface is written in English in order to be able to use by others engineering centers (as Mexico and China). Currently, this Expert System is one of the main tools that gathers the tacit knowledge acquired in the last product developments, in which can be used by product specialists to facilitate the process of technical requirements characterization, avoiding looping, as well, to strengthen the analysis independently of specialist level knowledge.

Keywords: Hermetic compressor. Product development. Expert System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Plano de Desenvolvimento Macro de Projetos na empresa-alvo.....	20
Figura 2.1 - (a) Ciclo de refrigeração por compressão de vapor (b) diagrama pressão entalpia.	25
Figura 2.2 – Tipos de compressores de deslocamento positivo.	27
Figura 2.3 - Vista externa de um compressor hermético com velocidade variável Embraco.	27
Figura 2.4 -Vista externa de um compressor semi-hermético Bitzer. ...	28
Figura 2.5 - Compressor alternativo.	28
Figura 2.6 - Exemplo de perda volumétrica no processo de compressão.	29
Figura 2.7 - Detalhe interno do compressor da empresa-alvo.....	30
Figura 2.8 - Representação esquemática do mecanismo em um compressor alternativo.	32
Figura 2.9 - Representação esquemática pistão/cilindro.	33
Figura 2.10 - Representação esquemática da carcaça.	34
Figura 2.11 - Modelagem do conjunto mola-batentes.....	34
Figura 2.12 - Exemplo de projeto de batente lateral.	35
Figura 2.13. Exemplo dos componentes do subsistema de sucção.	35
Figura 2.14. Conjunto de descarga. (a) válvula (b) tampa (c) tubo e câmaras.	36
Figura 2.15. Dinâmica da válvula de descarga.	37
Figura 2.16. Componentes do motor: (a) rotor, (b) estator e (c) cabo de conexão.	38
Figura 2.17. Representação das tensões induzidas nos motores a) BLAC e b) BLDC.....	39
Figura 2.18. Inversor trifásico e seus principais componentes	40
Figura 2.19. Diagrama pressão-volume (p-V). Posições inferior (PMI) e superior (PMS) do pistão. Pontos de abertura (A, C) e fechamento (B, D) das válvulas de sucção e descarga, respectivamente.....	45
Figura 2.20. Exemplo de teste de partida não equalizada na empresa-alvo.....	47
Figura 2.21. Curva Característica e Tombamento genéricas.	47
Figura 2.22. Envelopes principais de aplicação doméstica.	50
Figura 2.23. Transmissão da energia vibratória.	51
Figura 2.24. Dinâmica da válvula de sucção.....	51
Figura 2.25. Dinâmica da válvula de descarga.	52
Figura 3.1. Elementos de um Sistema Especialista.....	59
Figura 3.2. Processo de desenvolvimento de Sistema Especialista.....	60

Figura 4.1. Estrutura de classe do SE protótipo.	73
Figura 4.2. Esquema da regra do requisito funcional tombamento.	75
Figura 4.3. Estrutural funcional do SE protótipo.	76
Figura 4.4. Questionário de entrada do exemplo 1.....	79
Figura 4.5. Exemplo 1 do relatório de saída.....	85
Figura 4.6. Questionário de entrada do exemplo 2.....	90
Figura 4.7. Exemplo 2 do relatório de saída – parte 1.....	91
Figura 4.8. Exemplo 2 do relatório de saída - parte 2.	93
Figura 4.9. Exemplo 2 do relatório de saída – parte 3.....	97

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1. Quadro descritivo com temperaturas de controle em teste de calorímetro.	43
Quadro 3.1 – Definições das etapas de desenvolvimento do SE.....	60
Quadro 3.2 - Lista de entrada do SE protótipo.....	63
Quadro 3.3 - Lista de verificação do SE protótipo.....	65
Quadro 4.1 – Etapas do Modelo Incremental.....	67
Quadro 4.2 - Especialistas por subsistema e tempo de experiência.	69
Quadro 4.3 - Exemplo da Quadro resumo para aquisição do conhecimento: requisito funcional Mínima Tensão de Partida.	70
Quadro 4.4 - Classe Mecanismo: seus atributos e procedimentos.	74
Quadro 4.5 – Classe Explicação: seus atributos e procedimentos.	74
Quadro 4.6. Quadro resumo de possibilidades de entrada para o SE..	100
Quadro 4.7 – Validação do SE protótipo – grupo 1.....	101
Quadro 4.8 - Validação do SE protótipo – time de projeto planta Brasil.	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Alternating Current
ARM	Acorn RISC Machine
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
BLAC	Brushless Alternating Current Motor
BLDC	Brushless Direct Current Motor
BOM	Bill of material
CAD	Computer-aided-design
CECOMAF	European des Constructeurs de Materiel Frigorifique
CLIPS	C Language Integrated Production System
CLT	Concept lockdown tollgate
COP	Coeficiente de performance (W/W)
CPA	Change Point Analysis
CPV	Certification Planning Validation
C2C	Customer to Customer
DC	Direct Current
DSP	Digital Signal Processor
EC	Engenheiro de Conhecimento
EH	Especialista Humano
EMI	Electromagnetic Interference
ES	Engenharia Simultânea
HBP	High Back Pressure
HST	High Starting Torque
IDT	Investment decision tollgate
ISO	International Organization for Standardization
LCT	Launch Contract tollgate
LBP	Low Back Pressure
MBP	Medium Back Pressure
MSIP	Motores Síncronos de Imã Permanentes
PLM	Product Lifecycle Management
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
PRT	Project release tollgate
RBC	Raciocínio Baseado em Casos
R&D	Research and development

R134a
R600a
SE
SWL
TPV
WDT

Tetrafluoroetano (CH_2FCF_3)
Isobutano (C_4H_{10})
Sistema especialista
Sound Power Level
Testes de Produto Vendável
Winning definition tollgate

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto latino:

h	[J/kg]	Entalpia específica do fluido refrigerante
\dot{m}	[kg/s]	Vazão fornecida pelo compressor
Q	[W]	Capacidade de refrigeração
W	[W]	Consumo de potência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	17
1.2	OBJETIVOS	22
1.3	Objetivos específicos	22
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2	COMPRESSOR, SUBSISTEMAS E REQUISITOS	
FUNCIONAIS		25
2.1	COMPRESSOR.....	25
2.2	TIPOS DE COMPRESSORES	26
2.3	SUBSISTEMAS	31
2.3.1	Mecanismo.....	31
2.3.2	Carcaça e Suspensão.....	33
2.3.3	Sucção	35
2.3.4	Descarga.....	36
2.3.5	Motor	38
2.3.6	Inversor.....	39
2.4	REQUISITOS FUNCIONAIS	41
2.4.1	Requisitos Termodinâmicos.....	42
2.4.2	Requisitos de Aplicação.....	45
2.4.2.1	Mínima Tensão de Partida	46
2.4.2.2	Partida Não Equalizada.....	46
2.4.2.3	Tombamento	47
2.4.2.4	Circulação Externa de Óleo	48
2.4.2.5	Ruído em Partida e Parada.....	49
2.4.2.6	Temperatura de Bobina em Condições Extremas	49
2.4.3	Requisitos Acústicos	50
2.4.4	Requisitos de Confiabilidade	53

2.4.5	Requisitos de Manuseio e Transporte	53
3	INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E SISTEMA ESPECIALISTA	55
3.1	INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.....	55
3.2	SISTEMAS ESPECIALISTAS.....	56
3.3	SISTEMAS ESPECIALISTAS CORRELATOS COM ESTE TRABALHO	61
3.4	ANÁLISE DE VIABILIDADE DO SE PROTÓTIPO	62
4	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA ESPECIALISTA PROTÓTIPO.....	67
4.1	ESCOPO	68
4.2	AQUISIÇÃO DE CONHECIMENTO.....	68
4.3	REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO	71
4.4	ESTRUTURA DO SISTEMA ESPECIALISTA	76
4.5	UTILIZAÇÃO DO SE E CASOS IMPLEMENTADOS	77
4.6	VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO.....	99
5	CONCLUSÃO	104
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS E COMENTÁRIOS GERAIS.....	105
	APÊNDICE A – Acesso ao SE.....	111
	APÊNDICE B – Especialistas.....	112

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Na empresa em questão: Embraco, fabricante de compressores herméticos para aplicação doméstica e comercial, a área de pesquisa e desenvolvimento (*Research & Development- R&D*) é responsável pelo desenvolvimento e implantação de projetos de engenharia desde a criação de uma nova família de compressores até à alteração em produtos já implantados.

Os dois tipos de projetos de engenharia na empresa-alvo são – Projeto Médio ou *Medium Project* e Projeto Grande ou *Large Project*. Os Projetos Médios se baseiam nas alterações em produtos já implantados. Estes projetos podem ser classificados de acordo com o tipo de alteração/necessidade:

- Projetos de Compressor: são projetos relacionados com a demanda de um cliente atual, constituindo uma estratégia interna da empresa para conseguir clientes que a gama de produtos atual não cobre por completo.

- Projetos de Componentes: são projetos relacionados a alterações específicas de componentes de um ou mais subsistemas devido a um dos seguintes itens:

- Problema de Qualidade: projeto se faz necessário para corrigir um modo de falha detectado internamente ou pelo próprio cliente;

- Redução de Custo: projeto se faz necessário para validar tecnicamente a ideia que trará a redução para a organização. Normalmente está relacionado à: padronização, verticalização, novos fornecedores;

- *Dual Sourcing*: projeto se faz necessário para garantir a meta da organização de ter pelo menos dois fornecedores para qualquer componente do compressor, ou pelo menos para os itens mais críticos do ponto de vista financeiro e técnico.

Já os Projetos Grandes se baseiam:

- No desenvolvimento de novas tecnologias para serem incorporadas em compressores novos ou já existentes;

- No desenvolvimento de novas famílias de compressores com papel de satisfazer a demanda por níveis elevados de eficiência energética ou para entrar em determinados nichos de mercado.

Booz (1982) propõe uma classificação de desenvolvimento de produto baseada no grau de novidade operacional e também ao consumidor conforme abaixo:

- novos produtos para o mercado;
- melhorias e revisões nos produtos atuais;
- novas linhas de produção;
- incremento nas linhas de produção atuais.

Cada planta fabril da Embraco (Brasil, China, Eslováquia, Itália e México) conta com uma equipe de especialistas de produto dedicados à coordenação e implementação de projetos médios e grandes. O número anual de projetos médios gira em torno de 200-300 somando todas as plantas fabris. Já o número de projetos grandes é de no máximo 10 por ano.

Cada projeto precisa seguir a metodologia interna da empresa para desenvolvimento de produtos e em duas etapas se encontra a proposta deste Sistema Especialista:

1) Análise Crítica ou CPA (*Change Point Analysis*): esta etapa ocorre no início do projeto e pode ser revisada durante outras fases do mesmo. Neste momento o especialista de produto detalha alguns dos requisitos funcionais do compressor com base na necessidade do cliente/mercado. Back et al (2008) cita que o processo de conversão dos requisitos de usuários em requisitos de engenharia do produto depende dos conhecimentos e experiência de quem o conduz. O mapeamento eficaz destes requisitos funcionais pode apresentar alguns problemas, pelos seguintes motivos:

- Tal tarefa baseia-se muito na experiência e conhecimento dos especialistas que participam da análise crítica. E como o conhecimento não está uniformizado entre todos, os requisitos e suas especificações podem ser definidos de forma ineficaz. Exemplo: demanda para o mercado europeu para sistemas que possuem *check valve* (válvula que atua mantendo a diferença de pressão entre as linhas de sucção e descarga mesmo com o compressor desligado). Tais aplicações exigem aprovação com diferencial de pressão na partida, requisito também chamado de partida não equalizada.

- Pode se basear em projetos do passado que tiveram obviamente a participação de especialistas. Mas nem sempre a informação está adequadamente documentada ou possui fácil acesso;

2) Plano de Testes ou CPV (*Certification Planning Validation*): para projetos médios, muitas vezes esta etapa ocorre junto com o item anterior. Nesta etapa é necessário detalhar todos os testes e análises técnicas para a entrega do projeto. Usa-se como base o CPA, pois ele já traz alguns requisitos mapeados com forte relação com o cliente/mercado. Mas há também requisitos internos da empresa-alvo que precisam ser avaliados. Como o CPV é um aprofundamento do que

fora feito no CPA, os mesmos pontos levantados anteriormente podem ocorrer. Além disto, vale acrescentar:

- A falta de experiência dos especialistas mais novos pode comprometer o mapeamento eficaz de todos os requisitos a serem testados, pois muitas vezes eles desconhecem a relação das alterações propostas no produto com os possíveis requisitos impactados.

Esses problemas levantados culminam diretamente em aumento de custo devido às novas necessidades (exemplo: contratação de terceiros para realização de trabalho; aprovações em institutos reguladores; maior tempo de simulação e número de protótipos) e/ou tempo (exemplo: testes de longa duração não mapeados; incremento de testes que não são possíveis de serem realizados em paralelo com os recursos disponíveis; desencontro com cronograma de aprovação do cliente).

De acordo com Simms (2011), cerca de 35% do tempo de um projeto é gasto com retrabalho. Chen (2010) cita dentre outros: a falta de clareza na definição do escopo de produto e seus requisitos, bem como, a experiência dos especialistas, como fatores que podem afetar o tempo de projeto.

Maksimovic et al (2014) apresenta um estudo com relação aos desafios da gestão de conhecimento no fluxo de desenvolvimento de produto sob a perspectiva dos projetistas e engenheiros. Participaram do estudo 42 engenheiros de 9 diferentes empresas de diferentes ramos da indústria: automotiva (4), aeroespacial (2), equipamentos médicos (1), aplicações domésticas (1) e fabricante de metais (1). Dentre os resultados apontados vale destacar: 50% entendem que um dos principais pontos para a integração da gestão de conhecimento é o uso de técnicas e métodos através da tecnologia de informação como exemplo, sistema especialista. Desejável é ainda a possibilidade de integração com os atuais *softwares* de CAD (*Computer-aided design*) e PLM (*Product Lifecycle management*). Os mesmos citaram as principais formas de obtenção de conhecimento em suas empresas:

- o conhecimento tácito é a principal fonte de conhecimento técnico da empresa;

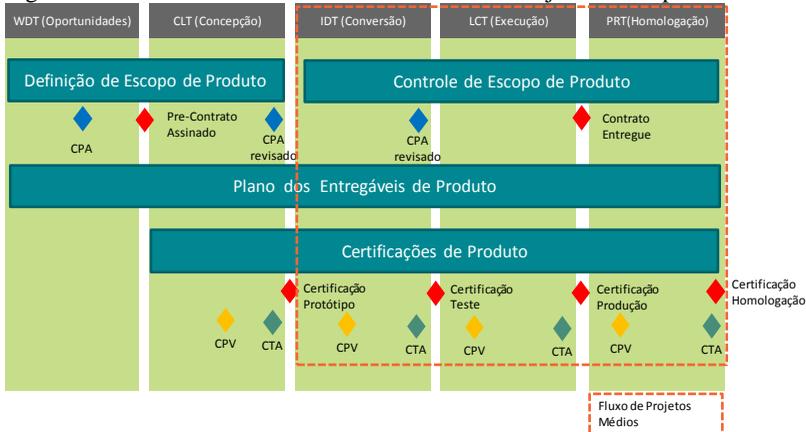
- o uso de projetos anteriores como aquisição de conhecimento – *knowledge retrieval* é um importante fator, mas os mesmos nem sempre estão bem documentados: informações duplicadas, dados não necessários e de difícil acesso.

Como há uma variedade muito grande de tipos de compressores e aplicações, o Sistema Especialista Protótipo é restrito aos compressores de aplicação doméstica com velocidade variável.

Na Figura 1.1 - Plano de Desenvolvimento Macro de Projetos na empresa-alvo.

Figura 1.1 mostra-se o fluxo de projetos Grandes e Médios da empresa-alvo para desenvolvimento de produto, focando nos itens de interesse: CPA e o CPV. Tal fluxo é denominado C2C (Customer to Customer).

Figura 1.1 - Plano de Desenvolvimento Macro de Projetos na empresa-alvo.



Fonte: Whirlpool – Unidade de Compressores Embraco.

Como é observado na figura 1.1, o CPA e o CPV aparecem ao longo das fases do projeto. Basicamente há 4 fases de projeto (Concepção, Conversão, Execução e Homologação) além do WDT (*Winning Definition Tollgate*) que funciona como um fórum de análise de oportunidades de projetos. Nesta etapa é realizada uma análise preliminar do escopo do projeto, desdobrando custos, investimentos, retorno financeiro, riscos técnicos e cronograma. O SE pode ser utilizado com intuito verificar se as possíveis soluções de produto propostas afetarão alguns dos requisitos funcionais elencados no CPA.

Na próxima fase, Concepção, são avaliados de forma simultânea: projeto definitivo de produto, estratégia de manufatura dos componentes e análise inicial dos potenciais fornecedores. O objetivo é entregar ao fim desta fase os desenhos de cada componente em sua versão final. Para tal, é realizado o CPV, chamado também de Planejamento da Certificação do Produto; execução dos testes e posterior revisão técnica (CTA). Nesta fase, o SE pode auxiliar na (1) revisão do CPA, pois com a proposta de *design* de cada subsistema para

atingir os *targets* do produto é possível verificar quais requisitos funcionais poderão ser impactados e (2) no delineamento dos testes por meio do CPV é possível obter particularidades, restrições e cuidados na condução das análises dos requisitos funcionais listados.

Por muitos anos durante esta fase, os entregáveis eram os desenhos preliminares de produto. A partir de 2015, com a mudança no fluxo de desenvolvimento de produto por meio da incorporação da engenharia simultânea (ES) (produto, processo e fornecedor) desde as fases de desenvolvimento tecnológico dos conceitos de produto (fases anteriores ao WDT), é possível atingir um grau de maturidade maior na fase de Concepção. Segundo Back *et al* (2008), os principais benefícios da ES são: antecipação do desenvolvimento dos sistemas de produção e logístico, ocorrendo simultaneamente com o projeto; as pessoas das áreas de interface (vendas, logística, manufatura, qualidade, etc) ganham um claro entendimento do projeto e comprometem-se para seu sucesso; as modificações no protótipo são reduzidas porque o projeto se torna mais maduro desde as fases iniciais. Tais benefícios culminam numa melhoria no processo de desenvolvimento de produto no que tange qualidade, custo e cronograma. Ao final da fase, o projeto é submetido ao CLT (*Conception lockdown tollgate*).

Na fase seguinte, Conversão, o foco é o refinamento do investimento necessário para a implementação do produto e também a conclusão das estratégias de desenvolvimento com os fornecedores (cotação, amortização, prazo de desenvolvimento). Com estas informações, chega-se ao IDT (*Investment decision tollgate*). A aprovação desta fase tem um cunho mais financeiro e estratégico do que técnico, pois é neste momento que se define a viabilidade final do projeto para posterior implementação.

Na fase posterior, Execução, o objetivo é implementar o produto através dos meios de manufatura finais, sejam ele internos ou externos. Ao final desta fase, muitos dos requisitos funcionais avaliados na fase de Concepção são novamente verificados para garantir a entrega técnica conforme escopo proposto. Com as certificações dos meios produtivos e do produto aprovadas, o projeto é submetido ao LCT (*Launch contract tollgate*). Com a passagem desta fase, diz-se que o produto está liberado para produção.

A última fase, chamada de homologação, é quando o projeto é entregue a manufatura e inicia-se a produção dos compressores pelo fluxo produtivo padrão da empresa-alvo. Nesta fase, o acompanhamento técnico se dá através dos chamados TPV (testes de produto vendável). Este acompanhamento funciona como uma auditoria de produto no seu

início do ciclo de vida e tem como objetivo corroborar os requisitos funcionais especificados em catálogo com a medição de compressores retirados dos lotes de produção. Após a auditoria realizada, o projeto é submetido ao PRT (*Project release tollgate*). Com a aprovação, o projeto é oficialmente finalizado.

1.2 OBJETIVOS

Desenvolver um sistema especialista protótipo que auxilie no desenvolvimento de produto garantindo uma análise crítica e um plano de testes robustos, evitando *looping* ou entrega de projeto incompleta.

1.3 Objetivos específicos

- Sistematizar e universalizar o conhecimento técnico no que tange o desenvolvimento de compressores/componentes;
- Contribuir para o treinamento de novos engenheiros de desenvolvimento;
- Diminuir tempo gasto pelos especialistas de produtos ou dos subsistemas nas análises críticas e planejamento de testes;
- Possuir capacidade de agregar, através de sua expansão, outros requisitos funcionais que não serão implementadas neste protótipo.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2, é apresentada uma revisão técnica de compressores, com enfoque no tipo recíproco. Dar-se-á detalhes sobre os subsistemas do compressor e do inversor. Também são mostrados os principais requisitos funcionais avaliados no desenvolvimento do produto, dando ênfase aos requisitos implementados neste Sistema Especialista Protótipo.

O capítulo 3 aborda conceitos relacionados a sistemas especialistas e suas etapas de desenvolvimento, bem como, uma revisão bibliográfica de sistemas especialistas desenvolvidos em áreas similares ao tema proposto nesta dissertação.

O capítulo 4 apresenta o processo de desenvolvimento do SE protótipo relativo às etapas de aquisição e representação do

conhecimento e implementação computacional. Bem como, são documentadas as etapas de verificação e validação do SE protótipo. Para a validação são apresentados alguns exemplos do relatório gerado e também a avaliação do uso do mesmo por outros especialistas: os que contribuíram com o conhecimento tácito do SE e outros que não se envolveram no processo.

Por fim, no capítulo 5, é mostrada a conclusão do trabalho proposto e também oportunidades de expansão a partir do SE protótipo para mais requisitos funcionais de produto e também em nível de componentes.

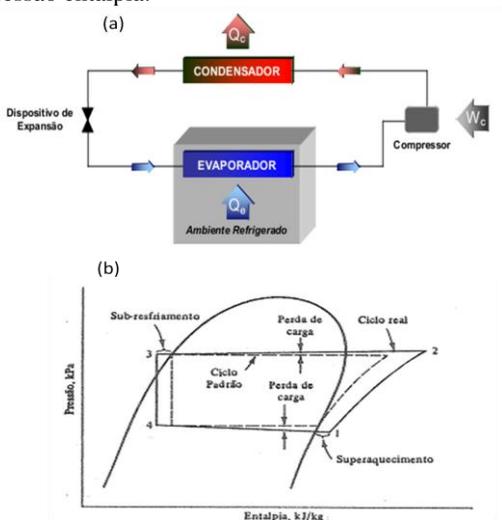
2 COMPRESSOR, SUBSISTEMAS E REQUISITOS FUNCIONAIS

Este capítulo tem o objetivo de apresentar alguns conceitos relacionados ao: compressor hermético e seus subsistemas e também sobre os principais requisitos funcionais avaliados durante o desenvolvimento de produto na empresa-alvo.

2.1 COMPRESSOR

O ciclo de refrigeração por compressão de vapor típico do qual o compressor faz parte é mostrado na Figura 2.1(a). Os principais componentes do sistema são: evaporador, cuja função é fornecer uma superfície de transferência de calor, para que o fluido refrigerante retire calor do espaço a ser refrigerado; compressor, no qual o refrigerante em estado gasoso é aspirado do evaporador e comprimido até a atingir a sua pressão de condensação; condensador, que fornece uma superfície de transferência de calor, na qual o fluido refrigerante transfere calor ao ambiente, sendo condensado; dispositivo de expansão, que fornece a quantidade correta de refrigerante ao evaporador e também reduz sua pressão, para que o mesmo evapore na temperatura desejada dentro do evaporador (Dossat, 1961).

Figura 2.1 - (a) Ciclo de refrigeração por compressão de vapor (b) diagrama pressão entalpia.



Fonte: (a) Gomes (2006) e (b) Stoecker (1985).

Na Figura 2.1(b) é sobreposto o ciclo de compressão padrão e o real. As principais diferenças entre esses ciclos residem nas perdas de carga no evaporador e condensador (decaimento da pressão nas linhas 4-1 e 2-3), no sub-resfriamento do líquido que deixa o condensador e no superaquecimento do vapor na aspiração do compressor. Em virtude do atrito, ocorre uma perda de carga no ciclo real, resultando num trabalho de compressão maior entre os estados 1 e 2 do ciclo padrão (Stoecker, 1985).

2.2 TIPOS DE COMPRESSORES

Segundo Trott (2008), os compressores podem ser divididos em 2 grupos: deslocamento positivo e dinâmico.

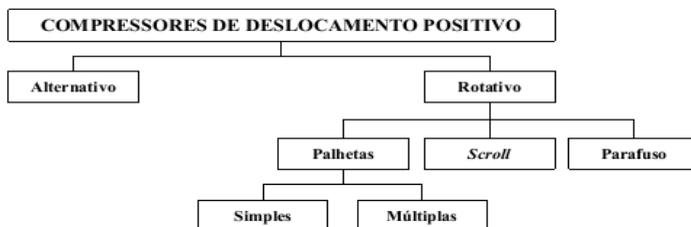
Os compressores dinâmicos caracterizam-se por fornecer quantidade de movimento ao fluido refrigerante, através do movimento rotativo de um rotor provido de diversas pás. O fluido, após passar pelo rotor, escoava através de um difusor no qual a quantidade de movimento é convertida em pressão. Isto pode ser feito através de um escoamento axial ou radial. Em refrigeração, a grande maioria dos compressores dinâmicos utiliza escoamento radial e são conhecidos como compressores centrífugos (Gomes, 2006).

Nos compressores de deslocamento positivo, a compressão de vapor é efetuada mecanicamente, admitindo-se uma quantidade de gás e comprimindo-o pela diminuição de seu volume até atingir a pressão desejada da linha de descarga (Gomes, 2006).

Dentre os seus vários tipos, conforme mostrado na Figura 2.2, a empresa-alvo produz os chamados compressores alternativos.

De acordo com Stoecker (1985), o compressor alternativo consiste de um êmbolo movendo-se alternadamente no interior de um cilindro, com as válvulas de aspiração e descarga dispostas convenientemente para permitir os processos que compõem o ciclo de compressão.

Figura 2.2 – Tipos de compressores de deslocamento positivo.



Fonte: Gomes (2006).

Quase todas as aplicações de pequeno porte, tais como geladeiras, congeladores e ar condicionado residencial utilizam compressores herméticos. As únicas ligações com a carcaça do compressor são as conexões da linha de aspiração e de descarga e os terminais elétricos. Unidades herméticas de grande capacidade apresentam o cabeçote removível, permitindo a manutenção das válvulas e dos êmbolos. Tais unidades denominam-se semi-herméticas (Stoecker, 1985).

Nos compressores herméticos, o conjunto formado pelo motor e o mecanismo de compressão é montado no interior de uma carcaça isolada do meio externo, a fim de eliminar a perda de gás refrigerante e reduzir os níveis de ruído acústico (Gomes, 2006).

Nas

Figura 2.3 e Figura 2.4 são mostrados exemplos da vista externa de compressores hermético e semi-hermético, respectivamente.

Figura 2.3 - Vista externa de um compressor hermético com velocidade variável Embraco.



Fonte: Autor.

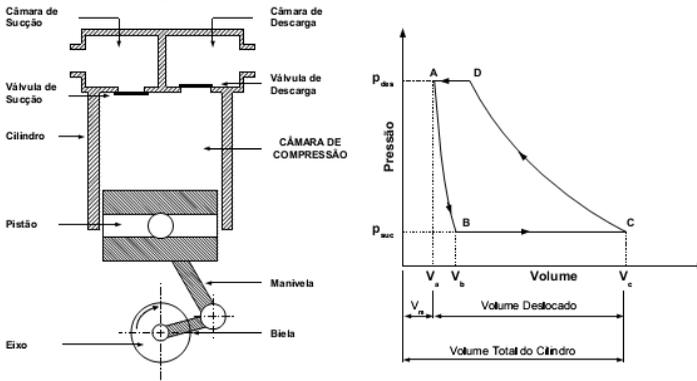
Figura 2.4 - Vista externa de um compressor semi-hermético Bitzer.



Fonte: Autor.

A Figura 2.5 (a) mostra alguns dos componentes do mecanismo de compressão de um compressor alternativo. E na Figura 2.5 (b) o processo de compressão é visualizado através de um diagrama de pressão-volume, conhecido também por diagrama pV, referente a um ciclo de compressão ideal na presença do volume morto.

Figura 2.5 - Compressor alternativo.



(a) Mecanismo

(b) Diagrama pV

Fonte: Autor.

A câmara de compressão de um compressor alternativo é composta essencialmente por um pistão que se move alternadamente dentro de um cilindro e válvulas automáticas para permitir a sucção e a descarga do fluido refrigerante. O movimento alternativo é gerado a partir do movimento rotativo do eixo acoplado ao motor elétrico, o qual é convertido em movimento linear através de um mecanismo biela-manivela.

A admissão de gás para dentro do cilindro ocorre até o pistão atingir o ponto C, denominado ponto morto inferior (PMI). Em seguida, o pistão inicia seu movimento no sentido oposto e a válvula de sucção é imediatamente fechada, devido ao aumento da pressão no cilindro. A pressão no interior do cilindro aumenta continuamente até atingir o valor da pressão na câmara de descarga. A abertura da válvula de descarga estabelece o processo de descarga, no qual o gás comprimido é liberado para a linha de alta pressão do sistema de refrigeração. Este processo ocorre até o pistão atingir o ponto morto superior (PMS), indicado pela letra A no diagrama da Figura 2.5 (b) (Gomes, 2006).

No processo de descarga, parte do gás comprimido não é transferido para a câmara de descarga. Conforme pode ser visto na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Exemplo de perda volumétrica no processo de compressão.

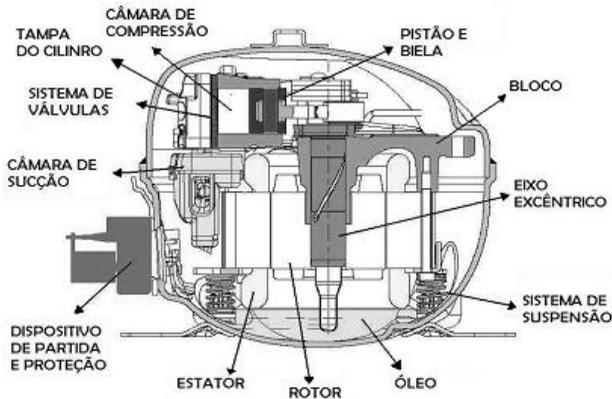


Fonte: Trott (2008).

O gás retido na folga entre o PMS do pistão e a placa de válvula precisa ser reexpandido antes que uma nova carga de gás refrigerante entre no cilindro. Pois a válvula de sucção não se abrirá até que a pressão no cilindro seja menor que a pressão de sucção. Quanto maior for esta folga, significa uma maior reexpansão, ou seja, parte do movimento descendente do pistão é utilizado somente para que a pressão no cilindro diminua e a válvula de sucção possa abrir. Com isso, a perda volumétrica aumenta, pois deixa-se de admitir gás para dentro do cilindro (Trott, 2008).

Com relação ao compressor alternativo da empresa-alvo, sua representação é mostrada na Figura 2.7 com os seus principais componentes e sua localização dentro da carcaça do compressor.

Figura 2.7 - Detalhe interno do compressor da empresa-alvo.



Fonte: Autor.

Alguns componentes do compressor podem variar sua geometria de forma significativa. Isso depende principalmente do nível de eficiência e capacidade de refrigeração especificados do projeto. Vale citar: estator, rotor, bloco, câmara de sucção e sistema de válvulas como sendo alguns dos conjuntos de componentes cuja geometria é diretamente impactada pelos requisitos citados.

Para se obter níveis de eficiência maiores, uma das soluções é projetar estator e rotor com maior quantidade de aço elétrico ou seja “pacotes maiores”. Consequentemente a carcaça terá seu tamanho aumentado. O bloco do compressor acompanha de certa forma o tamanho da carcaça, pois uma das suas funções é atuar como batente, protegendo outros componentes: como a mola de suspensão; o tubo de descarga e o estator, por exemplo. O sistema de válvulas, composto basicamente pelas válvulas de sucção e descarga e da placa válvula terá em muitos casos tamanhos de orifícios (local por onde o gás refrigerante esco) distintos a depender do nível de capacidade e eficiência desejadas. Por fim, a câmara de sucção cuja função será descrita posteriormente, possui maior ou menor volume a depender principalmente da altura de pacote citada do estator e também do tamanho da câmara de compressão do compressor.

2.3 SUBSISTEMAS

O compressor pode ser dividido em 5 grandes subsistemas, a saber:

1. Mecanismo;
2. Carcaça e Suspensão;
3. Sucção
4. Descarga
5. Motor

Vale ressaltar que como o SE protótipo é voltado para compressores com velocidade variável, há interação com o inversor de frequência. O mesmo funciona como o dispositivo de partida, convertendo a frequência da rede de 50Hz ou 60Hz para a rotação desejada (respeitando os limites do produto). O inversor também será detalhado a seguir.

2.3.1 Mecanismo

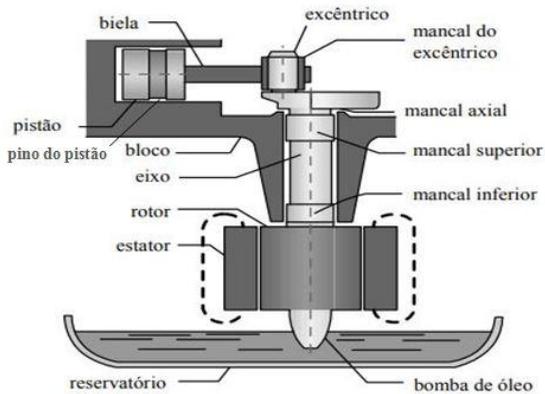
Este subsistema é conhecido por ser a parte móvel do compressor alternativo.

Segundo Chieh (2007), as partes móveis do compressor são interligadas entre si através de mancais hidrodinâmicos de forma a minimizar a potência mecânica dissipada por atrito. No eixo de acionamento, é fixada uma bomba de deslocamento positivo que através do movimento de rotação do motor alimenta os mancais com óleo lubrificante. Este óleo é conduzido pelo eixo através de um sistema de ranhuras e desta forma alimenta os mancais.

De acordo com Pedroso (2013), os componentes deste subsistema transformam o movimento de rotação recebido do rotor em alternativo, para permitir a compressão do gás refrigerante, por meio de um mecanismo de biela-manivela.

Os principais elementos que compõem o mecanismo podem ser vistos na Figura 2.8.

Figura 2.8 - Representação esquemática do mecanismo em um compressor alternativo.



Fonte: Autor.

A cinemática das partes móveis proporciona a variação da pressão no interior do cilindro. É por meio do movimento alternativo do pistão que se realiza o trabalho de compressão do gás refrigerante (Chieh, 2007).

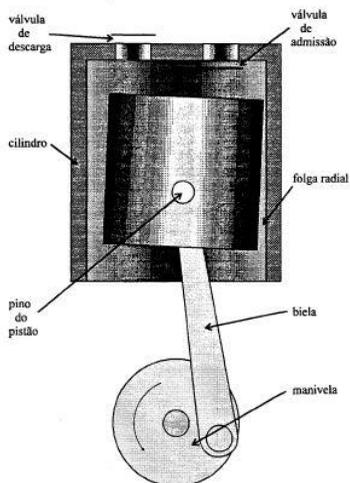
O mecanismo é formado por eixo, no qual o rotor é montado, biela, pino do pistão, pistão, bloco e sistema de lubrificação: óleo e sua respectiva bomba. Há também a junta do cilindro na qual é montada no topo do cilindro evitando com que haja colisão do pistão com a placa válvula. Conseqüentemente, forma-se o denominado volume morto, que é o volume não bombeado durante o ciclo de compressão.

Conforme Novák (2013), o bloco tem por característica sustentar e integrar a grande maioria dos componentes do compressor, sendo nele dispostos o cilindro e demais aberturas e furações para montagem e fixação do cabeçote e do estator.

O eixo é a principal parte do mecanismo de manivela. Na parte inferior é fixado o rotor e na superior está o excêntrico que define o deslocamento total. Suas funções são de suportar os carregamentos e também de transportar o óleo. A biela transforma o movimento rotacional do excêntrico em movimento linear do pistão.

Na Figura 2.9, é mostrada em maior detalhe a região da câmara de compressão, também chamado de cilindro.

Figura 2.9 - Representação esquemática pistão/cilindro.



Fonte: Fernandes (1996).

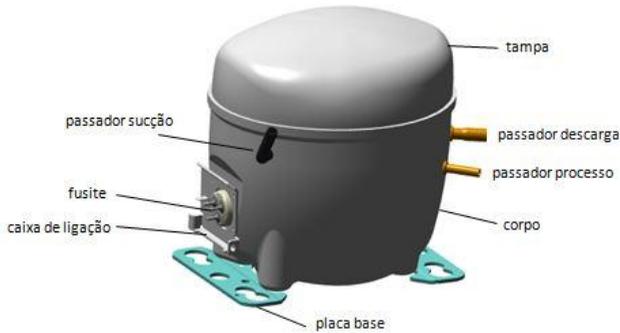
O pino do pistão é responsável por transmitir as forças entre a biela e pistão. Este realiza dentro do cilindro o processo de compressão do gás e através de suas ranhuras ocorre o fluxo de óleo que cria uma película de vedação que minimiza o vazamento de gás refrigerante pela folga radial do pistão-cilindro.

2.3.2 Carcaça e Suspensão

A carcaça tem como funções principais: isolar hermeticamente os componentes do compressor; atenuar parte do ruído gerado pelo conjunto mecânico e sistema de sucção e descarga através dos componentes corpo e tampa; reter o óleo do sistema de lubrificação; efetuar a troca de calor oriunda do processo de compressão no sistema de descarga.

Na Figura 2.10, pode-se observar os componentes da carcaça. A placa base junto com os amortecedores (não apresentados na figura) tem função de fixar o compressor no sistema de refrigeração. Os passadores de sucção e descarga conectam com as respectivas linhas no refrigerador. E o passador de processo é utilizado geralmente para carga de óleo e gás. O fusite faz o contato elétrico para transmissão de corrente do inversor para o estator. E a caixa de ligação é o elemento de fixação do inversor.

Figura 2.10 - Representação esquemática da carcaça.



Fonte: Autor.

Na Figura 2.11, é possível ver um exemplo de projeto de batentes plásticos em conjunto com a mola de suspensão do compressor.

Figura 2.11 - Modelagem do conjunto mola-batentes.



Fonte: Carmo (2001).

A suspensão consiste em um sistema de batentes e molas que são em sua maioria fixadas na parte inferior do corpo. As molas tem a função de sustentar os demais componentes e estão entre os principais caminhos de vibração do compressor para a carcaça e conseqüentemente para o refrigerador. Seu projeto tem uma forte relação com fadiga de alto ciclo devido ao seu deslocamento constante no liga/desliga do compressor e durante o regime permanente de funcionamento.

Os batentes tem função de união da mola de suspensão com o corpo e também com o estator (parte superior da mola).

Há também os batentes laterais, conforme mostrado na Figura 2.12.

Figura 2.12 - Exemplo de projeto de batente lateral.



Fonte: Empresa-alvo.

Os batentes laterais que possuem a função de proteção contra impacto na carcaça de componentes como o estator ou tubo de descarga. Eles podem sofrer variação no seu formato, pois dependem da distância relativa dos componentes citados para a carcaça.

2.3.3 Sucção

O subsistema de sucção é compreendido pelo *muffler*, válvula de sucção e mola do *muffler*.

Figura 2.13. Exemplo dos componentes do subsistema de sucção.



(a) Muffler de Sucção (b) Válvula

Fonte: Empresa-alvo.

O *muffler* de sucção também chamado de silenciador é, segundo Novák (2013), composto por vários compartimentos com intuito de remover ressonâncias e ruídos causados durante a fase de sucção do

compressor. A mola é um componente de fixação do *muffler* no cabeçote do compressor.

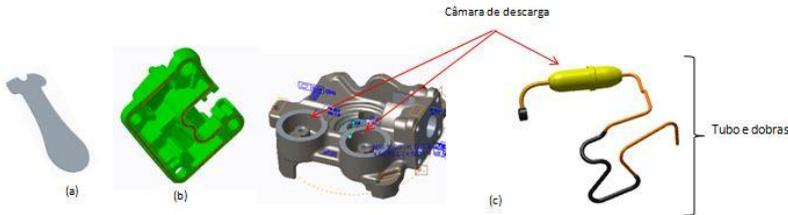
A válvula de sucção tem a função de comandar o fluxo de entrada de gás refrigerante para o interior da câmara de compressão, abrindo e fechando ao longo do ciclo, nos momentos adequados, para otimizar o desempenho do compressor. Seu funcionamento depende da diferença de pressão entre a câmara de sucção e a câmara de compressão (Pedroso, 2013).

2.3.4 Descarga

A descarga do cabeçote do compressor é composta por sua válvula, batente, tampa de cilindro e tubo de descarga. A placa de válvula é um elemento limitrofe entre sucção e descarga e por questões didáticas será inserido neste subsistema.

Pode-se observar na Figura 2.14 um exemplo dos principais componentes do subsistema descarga.

Figura 2.14. Conjunto de descarga. (a) válvula (b) tampa (c) tubo e câmaras.

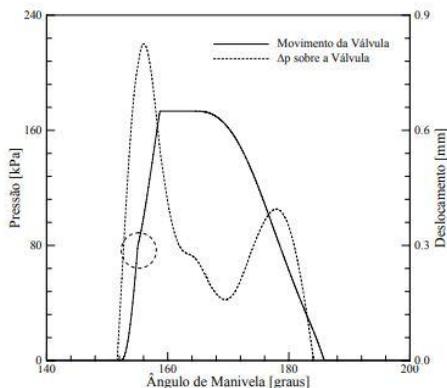


Fonte: Empresa-alvo.

A válvula de descarga funciona por diferencial de pressão conduzindo o gás refrigerante em alta pressão para dentro da câmara de descarga localizada na tampa de cilindro. Conforme Lange (2006), o ponto de abertura das válvulas é determinado pela força oriunda da diferença entre a pressão no cilindro e nas câmaras de sucção e descarga. Além disso, a presença de óleo entre as superfícies da válvula e do assento produz também uma força, denominada força de colamento, que tende a manter a válvula fechada.

A Figura 2.15 mostra um exemplo do deslocamento da válvula de descarga durante a evolução da pressão na tampa de cilindro.

Figura 2.15. Dinâmica da válvula de descarga.



Fonte: Lange (2006).

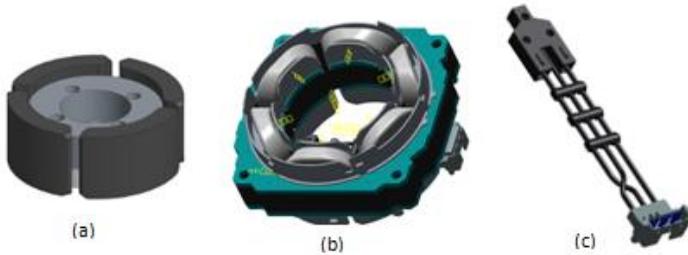
Por questões de confiabilidade, normalmente o deslocamento máximo da válvula é limitado pelo batente. Conforme mostrado na Figura 2.15, ao alcançar o batente a válvula é mantida em um afastamento fixo, permanecendo assim durante um intervalo de tempo devido à diferença elevada de pressão entre o cilindro e a câmara de descarga (Lange, 2006).

O tubo de descarga possui câmaras para absorção de pulsação e ruído produzidos pelo compressor durante a compressão. A função principal do tubo de descarga é conduzir o gás comprimido para o exterior da carcaça. O seu formato com curvas e dobras tem o objetivo de atenuar parte da energia vibratória transmitida à carcaça (Sangoi, 1983).

2.3.5 Motor

O subsistema motor é formado pelo estator, rotor e cabo de conexão.

Figura 2.16. Componentes do motor: (a) rotor, (b) estator e (c) cabo de conexão.



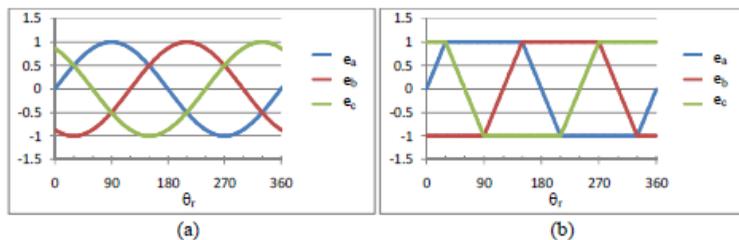
Fonte: Empresa-alvo.

Para compressores de velocidade variável da empresa-alvo o tipo de motor usado é de corrente direta sem escova com ímãs permanentes, os chamados *brushless DC (direct current)*. De acordo com Andrich (2013), existem diversos tipos de motores MSIP (motores síncronos de ímã permanentes), mas os mais utilizados podem ser divididos em dois tipos:

- AC, ou Brushless AC, conhecidos pela sigla BLAC;
- DC, ou Brushless DC, conhecidos pela sigla BLDC;

Os motores do tipo BLAC apresentam tensões induzidas do tipo senoidais enquanto que os motores BLDC apresentam tensões com formatos trapezoidais. A Figura 2.17 ilustra as tensões induzidas de ambos os motores.

Figura 2.17. Representação das tensões induzidas nos motores a) BLAC e b) BLDC.



Fonte: Autor.

O estator é formado por lâminas de aço elétrico estampado e enrolamentos feitos através de fios de cobre ou alumínio. Ele é a parte estática e é responsável por produzir o campo magnético que será transmitido ao rotor.

O rotor é do tipo interno. Segundo Trindade (2009), quando se necessita de alto torque em baixas rotações é necessária a configuração com rotor interno, com ímãs de ferrite ou terras-raras e múltiplos polos. Ele é a parte móvel do motor na qual através do fluxo magnético gerado e torque resultante é realizado o movimento rotativo do eixo do compressor.

No processo de acionamento dos motores MSIP, faz-se uso de inversores de frequência com o intuito de permitir que os motores sejam acionados por meio das técnicas mais adequadas para cada tipo (BLAC ou BLDC) e também para possibilitar variação de velocidade. Os motores MSIP geralmente são construídos com três fases, pois com esta configuração consegue-se a melhor relação entre densidade de energia e complexidade de montagem em comparação a um motor ideal com infinito número de fases (Chiasson, 2005).

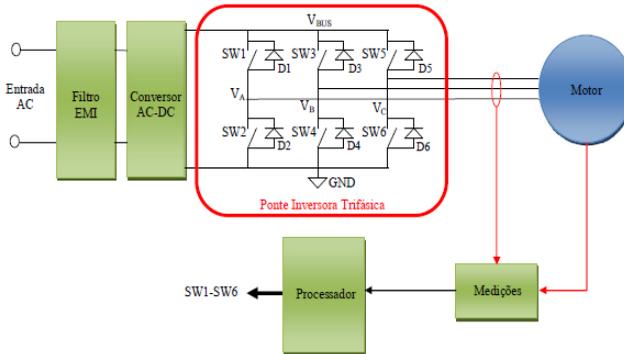
O cabo de conexão é o elemento de conexão entre o inversor e o estator.

2.3.6 Inversor

Para fornecer velocidade variável ao sistema de refrigeração, é requerida frequência variável da corrente do estator. Para tal é necessário um inversor que necessita de uma entrada do tipo DC – *Direct Current* (corrente contínua) que na maioria das vezes é obtido por uma fonte de alimentação AC - *Alternated Current* (corrente alternada) e retificada através de uma ponte de diodo (Krishnan, 2010).

A comutação eletrônica no motor BLDC trifásico é feita através de ponte inversora trifásica com seis dispositivos eletrônicos que são acionados por chaves.

Figura 2.18. Inversor trifásico e seus principais componentes



. Fonte: Andrich (2013).

Conforme Andrich (2013), segue abaixo a descrição dos componentes da

Figura 2.18:

- Filtro EMI (*Electromagnetic Interference*): suas funções são impedir que ruídos externos afetem a operação do inversor e também evitar a emissão de interferência conduzida ou irradiada do próprio inversor para a rede AC externa;
- Conversor AC-DC : Converte a tensão AC de entrada numa tensão DC para alimentar o barramento da ponte inversora. Na grande maioria dos casos esses conversores são simples pontes retificadoras seguidas de um capacitor do tipo eletrolítico de valor elevado;
- Ponte Inversora Trifásica: converte a tensão DC do barramento em tensão trifásica para alimentação das fases do motor;
- Bloco de Medições: dependendo do tipo de controle a ser utilizado no acionamento do motor MSIP o bloco de medições poderá ler as correntes de fase, corrente do barramento, velocidade e posição do motor por meio de *encoder* e sensor *hall* ou simplesmente a leitura das tensões nos terminais do motor;

- **Processador:** a unidade de processamento, onde é implementada a estratégia de acionamento, pode variar desde um simples microcontrolador de 8 bits até um sofisticado Processador Digital de Sinais (DSP) ou um processador com arquitetura ARM de 16 ou 32bits.

2.4 REQUISITOS FUNCIONAIS

Dependendo das alterações de produto requeridas para o projeto, diferentes tipos de requisitos necessitam ser avaliados com o intuito de: avaliar se o mesmo atingiu o valor especificado durante o projeto; garantir que os riscos técnicos foram mitigados e conseqüentemente, uma validação robusta do produto ao longo das passagens de fases.

Os requisitos técnicos podem ser classificados de forma macro, focando no escopo do compressor como um todo, ou então, pode-se desdobrá-lo ao nível de subsistema/componente. De forma geral podemos separar os requisitos nos seguintes grupos:

- **Termodinâmico:** capacidade de refrigeração, consumo de potência, COP (coeficiente de performance);
- **Funcionamento / Aplicação:** mínima tensão de partida, partida não equalizada, tombamento, circulação externa de óleo, ruído em partida e parada, temperatura de bobina em condições extremas;
- **Acústico:** potência sonora, vibração, pulsação, warm-up;
- **Confiabilidade:** pode-se separar em: cargas elevadas de compressão (desgaste), degradação por temperatura (vida); lubrificação em transiente de partida e parada (start/stop);
- **Manuseio e transporte:** integridade durante transporte do compressor e manuseio

Devido ao número elevado de requisitos funcionais existentes, este trabalho dará enfoque em 7 deles:

1. Capacidade de refrigeração;
2. Mínima tensão de partida;
3. Partida não equalizada;
4. Tombamento;
5. Circulação externa de óleo;

6. Ruído em partida e parada;
7. Temperatura de bobina em condições extremas;

Os requisitos escolhidos para o SE protótipo são os comumente impactados nos projetos da empresa-alvo.

2.4.1 Requisitos Termodinâmicos

O COP (coeficiente de performance) é definido como:

$$COP = \frac{Q}{W}$$

onde Q é a capacidade de refrigeração [w] e W , potência elétrica [w] consumida pelo compressor.

A capacidade de refrigeração refere-se ao calor absorvido pelo fluido refrigerante no evaporador. Esta, por sua vez, pode ser calculada como (Gomes, 2006):

$$Q = \dot{m}\Delta h$$

onde \dot{m} é a vazão mássica [kg/s] bombeada pelo compressor e Δh é a variação de entalpia [J/kg] do fluido refrigerante do evaporador (Gomes, 2006).

O COP é um dos principais requisitos avaliados no desenvolvimento de projetos. Grande parte dos subsistemas/componente do compressor pode impactá-lo. Exemplos: motor: através da perda elétrica e eficiência do aço elétrico; mecanismo: perdas mecânicas ao longo do subconjunto eixo/biela/pistão, capacidade de vedação pistão/cilindro.

A medição do COP é realizada em equipamentos conhecidos como calorímetros e segue padrões conforme regulamentações vigentes: 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) (Pedroso, 2013). Os parâmetros controlados são: temperaturas de evaporação, condensação, ambiente, sub-resfriamento e de entrada do compressor.

Atualmente, grande parte dos projetos é focada o mais próximo possível nas temperaturas de aplicação dos sistemas pelo qual serão utilizados, ou seja, o intuito é melhorar os projetos de válvulas e do motor nas temperaturas de trabalho dos refrigeradores que serão desenvolvidos. No passado o foco era projetar para a condição de temperatura de evaporação e condensação normatizada ASHRAE que refletia as características de projeto da época, mas com o aperfeiçoamento dos refrigeradores, para muitas aplicações, não faz mais sentido usar como referência a condição ASHRAE que possui temperatura de evaporação de $-23,3^{\circ}\text{C}$ e de condensação de $54,4^{\circ}\text{C}$.

No Quadro 2.1, apresenta-se algumas condições normatizadas de teste: ASHRAE e CECOMAF, bem como, duas condições de sistema.

Quadro 2.1. Quadro descritivo com temperaturas de controle em teste de calorímetro.

Parâmetro	ASHRAE		CECOMAF		Sistema 1	Sistema 2
	LBP	HBP	LBP	HBP	LBP	LBP
Faixa de aplicação						
Temperatura de evaporação	$-23,3^{\circ}\text{C}$	$7,2^{\circ}\text{C}$	-25°C	$7,2^{\circ}\text{C}$	-10°C	-25°C
Temperatura de condensação	$54,4^{\circ}\text{C}$	$54,4^{\circ}\text{C}$	55°C	55°C	40°C	40°C
Temperatura de sub-resfriamento	32°C	32°C	55°C	55°C	32°C	32°C
Temperatura do box do compressor	32°C	32°C	32°C	32°C	32°C	32°C
Temperatura de entrada do compressor	32°C	32°C	32°C	32°C	32°C	32°C

Fonte: Autor.

Para sistemas *All Refrigerator* (somente refrigerador) como, por exemplo, cervejeiras, necessitam de temperaturas internas mais elevadas, pois o intuito não é congelar o produto, e sim, mantê-lo refrigerado. Por sua vez, sistemas de dois ou mais compartimentos geralmente possuem *Freezer*, cuja temperatura interna é mais baixa. No Quadro 2.1, são mostrados este dois casos, chamados de Sistema 1 e 2, respectivamente. Na qual a temperatura de evaporação do compressor é diferente da condição ASHRAE normatizada para LBP. A temperatura de condensação também é alterada, mas está relacionada à temperatura ambiente na qual o sistema de refrigeração está inserido.

O foco deste trabalho é sobre compressores de velocidade variável, ou seja, há mais um parâmetro de entrada: rotação (rpm). A

mesma pode variar de 950 a 4500rpm dependendo da família de compressor a ser utilizada como base para o projeto. As limitações de rotação geralmente estão atreladas a: dimensionamento do motor; definição de conforto acústico; limites do sistema de lubrificação; restrições estruturais do sistema de válvulas.

A capacidade de refrigeração para compressores de velocidade variável tem como um dos pontos mais importantes nos requisitos de projeto o seu valor máximo que está diretamente atrelado à rotação máxima do produto.

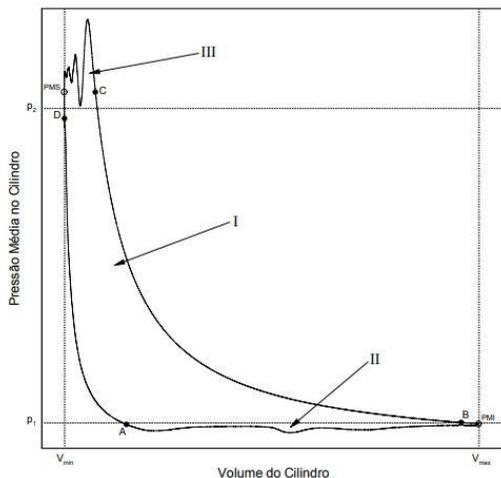
Um dos testes em sistemas de refrigeração que avalia este requisito é chamado de: capacidade de congelamento ou *Freezing Capacity Test*. O intuito deste teste é determinar se o compressor é adequado para o refrigerador em questão e necessita atingir os valores de temperatura de compartimentos especificados pelo cliente em um tempo pré-estabelecido (Novák, 2013).

As principais alterações de produto que podem impactar este requisito funcional estão relacionadas com:

- Volume morto do processo de compressão;
- Dinâmica das válvulas de sucção e descarga;
- Características construtivas da placa de válvula: rugosidade, espessura, acabamento dos assentos das válvulas;
- Superaquecimento.

A Figura 2.19 é um diagrama de pressão média no cilindro versus volume do mesmo (diagrama p-V) com objetivo de mostrar as perdas provocadas pelos sistemas de sucção.

Figura 2.19. Diagrama pressão-volume (p-V). Posições inferior (PMI) e superior (PMS) do pistão. Pontos de abertura (A, C) e fechamento (B, D) das válvulas de sucção e descarga, respectivamente.



Fonte: Lange (2006).

A área total do diagrama, multiplicada pela frequência de operação do compressor, resulta na potência indicada ou potência termodinâmica. As áreas II e III representam as energias gastas nos processos de sucção e descarga, respectivamente, enquanto a área I representa a energia efetiva entregue ao fluido. Valores médios para as potências despendidas nos processos de sucção e descarga ficam na ordem de 8% da potência indicada para os compressores mais modernos. Em especial, as válvulas devem possuir uma resposta dinâmica adequada, baixa perda de carga e restringir ao máximo o refluxo de gás (Lange, 2006).

2.4.2 Requisitos de Aplicação

Estes requisitos recebem esta denominação por terem forte relação com critérios de performance do cliente/mercado. Junto com os requisitos termodinâmicos (eficiência e capacidade de refrigeração) e acústicos (potência sonora e vibração) eles formam o início do desdobramento dos projetos dos subsistemas do produto. É a partir deles que se iniciam as análises de risco e posteriormente de projeto de componente.

2.4.2.1 Mínima Tensão de Partida

A mínima tensão de partida é designada como sendo a mínima tensão necessária para conseguir partir o compressor sob uma determinada condição de pressão de sucção e de descarga equalizadas. Dependendo das características da rede elétrica do país em que o produto será aplicado e da exigência de carga necessária pelo sistema de refrigeração, este requisito torna-se importante. Gradativamente os clientes estão exigindo especificações mais criteriosas de mínima tensão de partida.

O mercado indiano é um exemplo claro da importância de produtos que suportem as altas oscilações de tensão das redes de alimentação de energia. Lá a mínima tensão de partida exigida fica em torno de 160 V ou menos.

As principais alterações de produto que podem impactar este requisito funcional estão relacionadas com:

- Projeto de volumes e tubos de sucção e descarga;
- Características construtivas do motor (estator e rotor);
- Características construtivas do mecanismo (exemplo: tamanho do volume de gás deslocado);
- Algoritmo de controle do software do inversor

2.4.2.2 Partida Não Equalizada

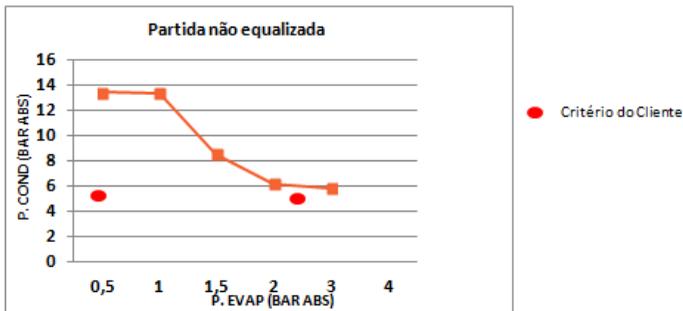
A partida não equalizada avalia se o compressor consegue partir com diferencial de pressão de sucção e descarga a uma determinada tensão de alimentação. Este requisito está diretamente relacionado a aplicações na qual o sistema permanece durante o período desligado com diferencial de pressão. Isso traz uma redução no consumo de energia, pois após a partida o compressor consegue atingir de forma mais rápida as temperaturas de evaporação e condensação de regime permanente.

As principais alterações de produto que podem impactar este requisito funcional são as mesmas citadas para o requisito de mínima tensão de partida.

Na Figura 2.20, tem-se um exemplo do resultado de teste deste requisito. Na qual é mostrado um gráfico com os valores de pressão de condensação (eixo y) possível de atingir dada a uma determinada pressão de evaporação (eixo x). Geralmente este teste é feito na região de mínima rotação do produto e com nível de tensão de alimentação abaixo da nominal (a depender de cada mercado ou cliente). A curva em

laranja são os pontos indicando as condições em que o compressor partiu de forma satisfatória, ou seja, sem ruído.

Figura 2.20. Exemplo de teste de partida não equalizada na empresa-alvo.

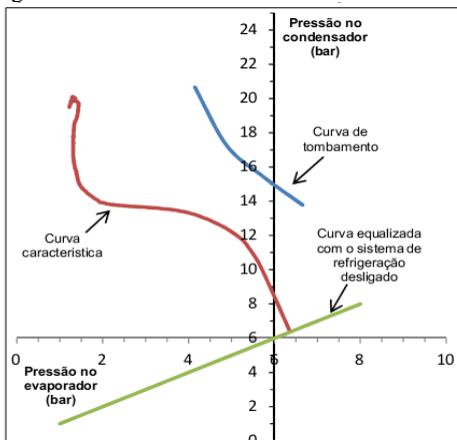


Fonte: Autor.

2.4.2.3 Tombamento

O tombamento (*stalling*) avalia a capacidade de o compressor suportar regiões de alta carga (pressões de evaporação e condensação elevadas). Subistemas como o motor, mecanismo e cabeçote estão diretamente ligados com este requisito. O teste é realizado para diferentes valores de pressão de evaporação. No final obtêm-se a curva de tombamento do compressor, mostrado na Figura 2.21.

Figura 2.21. Curva Característica e Tombamento genéricas.



Fonte: Thomazini (2013).

Neste exemplo com gás refrigerante R134a, o compressor está adequado para o sistema de refrigeração, pois a curva de tombamento (mostrado apenas seus pontos críticos – alta pressão de condensação) não cruza com a curva característica do sistema em questão. A curva característica mostra as solicitações de pressão de evaporação e condensação do sistema desde a sua partida (intersecção com a curva de pressão equalizada) até a região de trabalho durante regime permanente (extremidade contrária da curva) (Thomazini, 2013).

As principais alterações de produto que podem impactar este requisito funcional estão relacionadas com:

- Características construtivas do mecanismo e rotor (exemplo: tamanho do volume de gás deslocado e inércia);
- Características construtivas da placa de válvula: principalmente na região da descarga;
- Projeto de volumes e tubos de sucção e descarga;
- Rotinas de controle do software do inversor (exemplo: limite de potência);
- Tensão de barramento do hardware do inversor (exemplo: projeto do circuito de entrada e capacitor).

2.4.2.4 Circulação Externa de Óleo

A circulação externa de óleo avalia o percentual de óleo do compressor que circula pelo sistema de refrigeração. Níveis de óleo maiores que o especificado podem prejudicar a performance das válvulas de sucção e de descarga, bem como, o processo de compressão.

As principais alterações de produto que podem impactar este requisito funcional estão relacionadas com:

- Projeto do *muffler* de sucção: a geometria da purga (orifício por onde o óleo oriundo do circuito de refrigeração escorre para o cárter – fundo da carcaça) e o *design* do bocal de entrada (atua como uma barreira para a névoa de óleo e gás que se encontra em torno do *muffler*);
- Características do sistema de lubrificação: volume (quantidade projetada) e tipo do óleo;
- Fluxo do óleo no interior da carcaça: óleo direcionado de forma excessiva (1) para a entrada do *muffler* ou sua purga, bem como, (2) para a folga pistão cilindro.

2.4.2.5 Ruído em Partida e Parada

O ruído em partida e parada ou *knocking noise* do compressor avalia se durante a partida e parada do compressor há choques de componentes internos com a carcaça do compressor. O teste é realizado seguindo padrões da empresa-alvo. O não cumprimento deste requisito pode ser facilmente percebido pelo cliente, através de ruídos anormais durante a aplicação do produto.

As principais alterações de produto que podem impactar este requisito funcional estão relacionadas com:

- Projeto da suspensão;
- Intervalo de rotação do produto;
- Aplicações que exigem HST (*high starting torque*) – alto torque de partida;
- Aumento do torque máximo do motor;
- Rotina de controle de partida do software.

2.4.2.6 Temperatura de Bobina em Condições Extremas

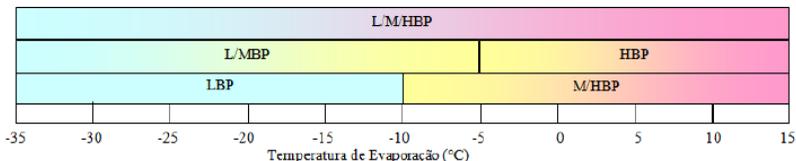
A temperatura de bobina em condições extremas avalia de forma indireta a degradação dos componentes poliméricos e do rolamento de esferas dentro do compressor através da medição da temperatura de bobina do estator, como já citado, em condições extremas de aplicação. O valor medido não pode ultrapassar o critério definido internamente pela empresa-alvo.

As principais alterações de produto que podem impactar este requisito funcional estão relacionadas com:

- Envelope de aplicação e intervalo de tensão do produto;
- Isolamento térmico na sucção e descarga;
- Projeto de motor.

Com relação ao envelope de aplicação. Esta é uma forma de classificar o produto de acordo com os intervalos de temperaturas de evaporação e condensação aprovadas para o mesmo. Na Figura 2.22 pode-se observar os principais envelopes e seus derivados.

Figura 2.22. Envelopes principais de aplicação doméstica.



Fonte: Empresa-alvo.

Os principais envelopes são o LBP (*low back pressure* – baixa pressão de retorno), MBP (*medium back pressure* – média pressão de retorno) e HBP (*high back pressure* - alta pressão de retorno). Esta terminologia está diretamente ligada com a pressão de evaporação ou temperatura de evaporação.

2.4.3 Requisitos Acústicos

Junto com o COP, o nível de potência sonora tornou-se um dos principais requisitos do compressor para projetos de aplicação doméstica e comerciais leves. De um modo geral, fala-se em conforto acústico do sistema de refrigeração. Em muitos casos, a potência sonora é usada como um requisito estratégico para diferenciação do produto no mercado.

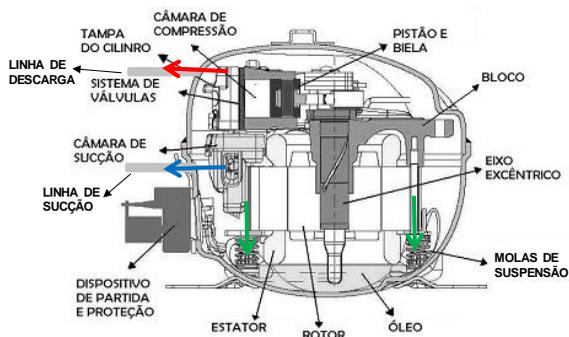
Segundo Sangoi (1983), o nível de potência sonora é o parâmetro mais adequado para avaliar a irradiação de uma máquina, pois independe do ambiente onde os dados foram obtidos, da distância entre fonte e observador. É uma característica da máquina e seu método de medição segue a norma ISO 3741- Determinação de Níveis de Potência Sonora de Fontes de Ruído: Métodos de Precisão para Fontes de Banda Larga em Salas Reverberantes.

Conforme Carvalho (2008), o compressor é uma das principais fontes de irradiação sonora do sistema de refrigeração. A carcaça do compressor é responsável por essa irradiação direta e tem como característica fundamental o fato de possuir a maior parte de sua energia acústica distribuída nas altas frequências, acima de 2 kHz.

Além da irradiação de ruído, o compressor transmite energia vibratória ao gabinete do sistema de refrigeração, via estrutura (setas verdes na Figura 2.23) e via pulsação do fluido refrigerante (setas azul e vermelha na mesma figura), fazendo com que o gabinete também irradie ruído (Moraes, 2013). A vibração também é requisito primordial nos projetos, na qual, trabalha-se para melhorar os seus principais

mecanismos geradores: motor elétrico; conjunto eixo, biela e pistão; câmaras de sucção e descarga.

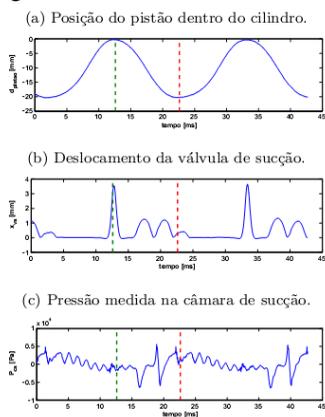
Figura 2.23. Transmissão da energia vibratória.



Fonte: Autor.

Com relação à pulsação, a mesma pode ser originada da sucção através do fluxo intermitente de gás na câmara de sucção e sua pulsação causada pelo movimento oscilatório na válvula de sucção (Carmo, 2001). Na Figura 2.24 há um exemplo da dinâmica da válvula.

Figura 2.24. Dinâmica da válvula de sucção

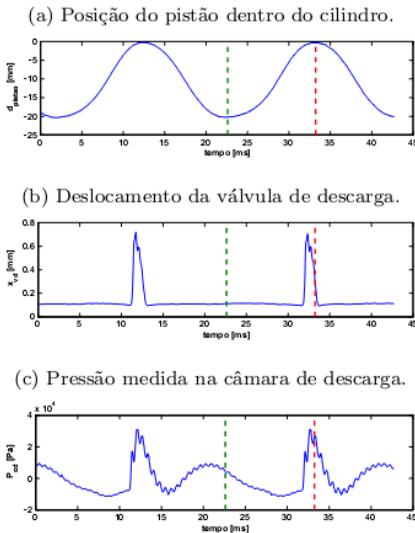


Fonte: Empresa-alvo.

No intervalo de tempo compreendido entre a reta vertical verde e a vermelha, o pistão está recuando de sua posição máxima para a

mínima dentro do cilindro (Figura 2.24a). O fluido proveniente da câmara de sucção é admitido no cilindro através desta válvula, cuja abertura (Figura 2.24b) acontece com oscilações. Esta dinâmica ocasiona flutuações na pressão do fluido refrigerante dentro da câmara de sucção (Figura 2.24c) e estas se propagam para o evaporador do sistema de refrigeração por meio de ondas de pressão (Moraes, 2013). A pulsação também é proveniente da descarga, conforme mostrado na Figura 2.25 a dinâmica da válvula de descarga.

Figura 2.25. Dinâmica da válvula de descarga.



Fonte: Empresa-alvo.

A pulsação é gerada devido à variação brusca de pressão no fluxo de gás que ocorre quando a válvula de descarga é aberta (Figura 2.25b), condicionando o gás a uma rápida queda de pressão (Figura 2.25c), com alta velocidade de saída no orifício de descarga resultando em um fluxo altamente turbulento (Carmo, 2001). A pulsação de fluido refrigerante criada pela dinâmica impulsiva da válvula é transmitida juntamente com o fluido para o condensador do sistema de refrigeração (Moraes, 2013).

O *warm up* é um teste realizado no compressor onde o mesmo é colocado na condição de operação padronizado pelas normas ASHRAE ou nas condições específicas de operação do sistema e é medido a potência sonora SWL (sound power level) em banda de 1/3 de oitavas em função da temperatura da carcaça, desde a temperatura ambiente

quando o compressor é ligado, até a temperatura de estabilização do mesmo. O objetivo do teste é avaliar possíveis problemas de ruído que dependem da temperatura, tais como vazamentos em câmaras de sucção, nível de óleo, válvula de sucção, entre outros.

2.4.4 Requisitos de Confiabilidade

Os requisitos de confiabilidade podem ser separados em:

1. Alta temperatura;
2. Desgaste ou alta carga;
3. Transiente de partida e parada.

As avaliações são realizadas em testes acelerados com o uso de pressões e temperaturas mais elevadas do que a normalmente encontrada durante funcionamento com o intuito de reproduzir de forma rápida o que pode acontecer com o compressor em campo durante sua vida útil.

O requisito de alta temperatura tem o intuito de avaliar a degradação do óleo; resistência ao desgaste e compatibilidade dos materiais.

O requisito de desgaste ou alta carga avalia a resistência estrutural e de desgaste do mecanismo e componentes do cabeçote.

O transiente de partida e parada avalia a eficácia do sistema de lubrificação do mecanismo através do nível de desgaste do mesmo e também do sistema de suspensão. O compressor passa pelo ciclo de liga/desliga de 125-250 mil vezes conforme metodologia interna da empresa-alvo.

2.4.5 Requisitos de Manuseio e Transporte

Tais requisitos são extremamente importantes para validação do projeto dos batentes e também da mola de suspensão. É utilizado também para validação das fixações e acoplamentos entre componentes.

O requisito de transporte é realizado seguindo alguns critérios internos da empresa-alvo e também a ASTM (American Society for Testing and Materials).

O requisito de manuseio é avaliado através do teste de queda ou *drop*. Na qual o produto é fixado dentro de uma gaiola metálica e submetido à queda livre conforme altura definida internamente.

O capítulo 2 mostrou uma descrição dos principais subsistemas do compressor, bem como, os requisitos funcionais que são constantemente avaliados nos projetos da empresa-alvo, com enfoque

para os sete requisitos que fazem parte do sistema especialista desta dissertação. O próximo capítulo traz uma revisão de inteligência artificial, bem como, apresenta o sistema especialista protótipo que serviu como análise de viabilidade desta dissertação.

3 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E SISTEMA ESPECIALISTA

Este capítulo tem o objetivo de mostrar alguns conceitos e referências relacionadas à inteligência artificial, bem como, sistemas especialistas (SEs). Também são apresentados alguns SEs com propostas de trabalho similares aos desta dissertação e também o SE protótipo da disciplina de Sistema Especialista que deu origem a este trabalho.

3.1 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Já na história antiga, mitos gregos incorporavam a ideia de robôs inteligentes e artificios quase humanos. Muitos brinquedos mecânicos e modelos foram construídos por pessoas reais. Aristóteles, no século V a.C., desenvolvia a lógica silogística, considerada como o primeiro sistema de raciocínio dedutivo. Um papiro do século III antes de Cristo representava 48 observações cirúrgicas com sintoma, diagnóstico, tratamento e prognóstico, combinados como uma programação: se o paciente possui este sintoma, então ele tem esta doença com este prognóstico e este tratamento devendo ser aplicado. Este papiro é conhecido como a primeira ideia próxima de sistema especialista até então divulgado (Nordlander, 2001).

Alan Turing concebeu a máquina de Turing que poderia imitar a operação de qualquer outra máquina de computação. No entanto, como fez Godel, ele também reconheceu que existem certos tipos de cálculos que nenhuma máquina poderia executar. Mesmo reconhecendo esse limite de computadores, Turing ainda não duvidava que os computadores pudessem pensar. Walter Pitts e Warren McCulloch mostraram como as redes neurais artificiais poderiam trabalhar, confiando no uso de *loops* de *feedback*. No ano de 1950, Alan Turing propôs um teste para reconhecer a inteligência das máquinas, na qual um computador e uma pessoa são colocados em quartos separados e uma segunda pessoa, o interrogador, é colocado em um terceiro quarto realizando perguntas idênticas para o computador e a primeira pessoa. O teste tem sucesso se o interrogador não for capaz de distinguir a máquina da pessoa através de suas perguntas (Nordlander, 2001).

Somente em 1956, na conferência no *Dartmouth College* o termo foi pela primeira vez empregado oficialmente. O trabalho que deu origem à expressão IA foi elaborado por John McCarthy, Marvin Minsky, Nathaniel Rochester e Claude Shannon, cuja proposta era

realizar um estudo sobre o tópico de Inteligência Artificial (Bittencourt, 2001).

Kremer (2001) propõe duas definições de inteligência artificial (IA):

1. IA fraca: máquinas que podem agir como se fossem inteligentes;
2. IA forte: máquinas que agem de forma inteligente e que possuem mente consciente e real.

3.2 SISTEMAS ESPECIALISTAS

Podem-se citar alguns programas que obtiveram sucesso na resolução de problemas. O DENDRAL desenvolvido em 1967 por Edward Feigenbaum na qual utilizava a análise de espectrogramas de massa para identificar elementos químicos. Em 1972 o Mycin foi desenvolvido por uma equipe na Universidade de Standford com o intuito de diagnosticar doenças de sangue infecciosas e recomendar antibióticos. Em 1978, criou-se o PROSPECTOR, um programa que usava regras baseadas em informações de geólogos para localizar depósito de minerais (Russel & Norvig, 1995) (Nordlander, 2001).

O que estes programas possuem em comum é o fato de utilizarem uma base de conhecimento para emularem o raciocínio utilizado por especialistas na resolução do problema. Surgiram então os Sistemas Baseados em Conhecimento, mais especificamente os Sistemas Especialistas (SEs) (Zimmermann, 2003).

Uma das primeiras definições de SE foi proposta pelo Prof. Edward Feigenbaum (1961), da Universidade de Stanford, citada por Giarratano e Riley (1994) como sendo:

Programa inteligente de computador que utiliza conhecimentos e procedimentos inferenciais para resolver problemas com grau de dificuldade suficiente para requerer significativa especialidade humana em sua solução.

Um Sistema Especialista é desenvolvido para atender a uma aplicação determinada e limitada do conhecimento humano. É capaz de emitir uma decisão, apoiada em conhecimento justificado, a partir de uma base de informações, tal qual um especialista de determinada área do conhecimento humano. Durante o processo de raciocínio, analisa os fatos definidos pelo usuário, comparando-os com as informações já contidas em sua base de conhecimento sobre esses fatos e hipóteses.

Neste processo, vai formulando novas hipóteses e verificando novos fatos; e esses novos fatos vão influenciar no processo de raciocínio. Este raciocínio é sempre baseado no conhecimento prévio acumulado. Um especialista com esse processo de raciocínio pode não chegar a uma decisão se os fatos de que dispõe para aplicar o seu conhecimento prévio não forem suficientes. Pode, por este motivo, inclusive chegar a uma conclusão errada; mas este erro é justificado em função dos fatos que encontrou e do seu conhecimento acumulado previamente (Fávaro, 2004).

Ostelino (2003) apud Telles (2005) define o domínio de uso dos SE que deve ser aplicado somente onde um sistema convencional não atende o objetivo. Segundo Ostelino, “antes de optar pela criação de um Sistema Especialista, deve-se fazer uma avaliação se a alternativa convencional existe. Se existir, normalmente ela é mais eficiente”.

Nos sistemas baseados em algoritmos, o conhecimento está armazenado no código do programa, ou seja, a solução de um determinado problema está definida dentro do código através de uma ou mais rotinas. Deste modo, quando for necessário agregar mais conhecimento, o código precisará ser alterado. Já nos SE, o conhecimento pode ser agregado sem necessidade de alteração de código (Telles, 2005).

De um modo geral, sempre que um problema não pode ser algoritmizado, ou sua solução conduza a um processamento muito demorado, os Sistemas Especialistas podem ser uma saída, pois possuem o seu mecanismo apoiado em processos heurísticos (Fávaro e Santos, 2004).

O conhecimento de um SE consiste em fatos e heurísticas. Os fatos constituem um corpo de informações. Heurísticas representam conhecimento informal, permitem um especialista encontrar a solução sem realizar análise detalhada de uma situação particular (Massirer, 2007).

De acordo com Knight (1991) apud Silva (1998), o termo heurística tem origem do grego *heuriken*, que significa descobrir. Ainda conforme Silva (1998), uma heurística é uma técnica que aprimora a busca por uma solução. Assim, aplicando heurísticas, é possível obter soluções para problemas difíceis em um curto período de tempo. Além disso, é possível formular heurísticas específicas para determinados tipos de domínios complexos, como sistema hidráulico.

Conforme Matelli (2008), do mesmo modo que o responsável pelo desenvolvimento de programas convencionais é conhecido por

engenheiro de software, o responsável pelo desenvolvimento de SE é conhecido por engenheiro de conhecimento (EC).

O EC entretanto não conseguirá criar um sistema especialista com origem em uma ideia brilhante que lhe surgiu em um momento de inspiração. Faz-se necessária participação e contribuição de especialistas. Os especialistas humanos (EH) são assim denominados, por deterem o domínio de um conhecimento específico que é base da construção de um sistema especialista. Uma das dificuldades de construir sistemas especialistas surge na aquisição do conhecimento dos especialistas humanos para transformá-las em regras (NORDLANDER, 2001).

Waterman (1986) cita alguns pontos importantes para análise de viabilidade do uso de SE, segue abaixo algum deles:

- Existe realmente um problema;
- O problema em questão pode ser representado pelo conhecimento humano;
- O problema é predominantemente de natureza heurística ou algorítmica;
- A experiência relativa ao domínio do problema é bem atendida e aceita.

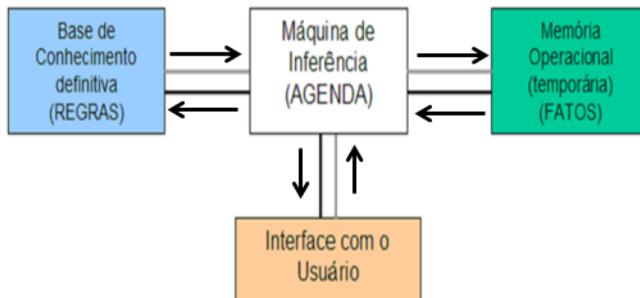
E com relação a recursos:

- Necessário um engenheiro de conhecimento (EC) capacitado para elaborar o SE;
- Apoio gerencial para o projeto;
- Disponibilidade de tempo tanto do engenheiro de conhecimento quanto do(s) especialista(s);
- O especialista precisa ser colaborativo para poder relatar sobre seu conhecimento no domínio do problema.

Um SE pode ser desenvolvido com base em um *software Shell* que foi especialmente projetado para conseguir um desenvolvimento rápido, com linguagens de inteligência artificial como LISP e Prolog ou com linguagens convencionais como Fortran, C++ e Java (Nordlander, 2001).

Segundo Fávoro e Santos (2004), existem três elementos básicos em um Sistema Especialista: base de conhecimento, memória operacional e máquina de inferência, conforme pode ser visto na Figura 3.1.

Figura 3.1. Elementos de um Sistema Especialista.



. Fonte: Massirer (2007).

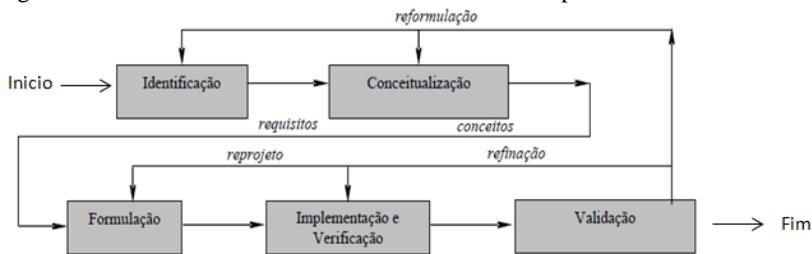
Base de conhecimento é um elemento permanente, mas específico de um sistema especialista. É onde estão armazenadas as informações, ou seja, os fatos, objetos e as regras. As informações armazenadas de um determinado domínio fazem do sistema um especialista neste domínio.

Para Durkin (1994), a memória operacional ou de trabalho é a parte de um sistema especialista que contém os fatos dos problemas, que são descobertos durante uma consulta.

Mecanismo de inferência ou motor de inferência é um elemento permanente, que pode inclusive ser reutilizado por vários sistemas especialistas. É a parte responsável pela busca das regras da base de conhecimento para serem avaliadas, direcionando o processo de inferência. Segundo Massirer (2007), a máquina de inferência examina a memória operacional, a qual contém os dados sobre o problema em questão, e fornece as conclusões e explicações adicionais quando solicitado pelo usuário. É por intermédio deste mecanismo, que os fatos, as regras, as classes e os objetos que compõem a base de conhecimento são aplicados no processo de resolução do problema.

Com relação ao processo de desenvolvimento do SE, Waterman (1986) utiliza uma proposta conforme mostrado na Figura 3.2.

Figura 3.2. Processo de desenvolvimento de Sistema Especialista.



Fonte: Waterman (1986).

No Quadro 3.1, são descritos os objetivos de cada uma das etapas do processo de desenvolvimento do SE.

Quadro 3.1 – Definições das etapas de desenvolvimento do SE.

Etapa	Definição
1. Identificação	Tipo e escopo do problema, escolha dos especialistas, recursos necessários e objetivos do sistema.
2. Conceitualização	Engenheiro de conhecimento e especialistas decidem quais conceitos, relações, estratégias, subtarefas e restrições são necessárias para resolver o problema no escopo específico.
3. Formulação	Expressar conceitos chave e relações de acordo com a estrutura da ferramenta de implementação a ser usada. Nesta fase, a técnica de representação do conhecimento (regras, frames, redes semânticas, etc) a ser aplicada torna-se fundamentais.
4. Implementação	Sistema de codificação envolve o conteúdo do domínio do conhecimento, a ferramenta de implementação específica, a integração de diferentes fontes de conhecimento (para evitar contradições) que podem ocorrer entre as regras e estrutura de dados.
5. Validação	Teste de desempenho e utilidade do sistema. Os especialistas avaliam o sistema protótipo e apoiam o engenheiro de conhecimento em melhorá-lo. Esta fase pode revelar erros na representação do conhecimento e, conseqüentemente, originam iterações para

	refinar, redesenhar ou reformular as fases anteriores.
--	--

Fonte: Silva (1998).

Uma das abordagens do desenvolvimento faz uso do modelo incremental. Este modelo possui utilidade na qual com a adição de regras ao longo do desenvolvimento, aumenta também a capacidade do sistema em níveis de maturidade. A principal vantagem deste modelo é que o aumento da capacidade funcional é fácil de testar e validar. Cada incremento funcional pode ser testado imediatamente com o especialista em vez de tentar fazer toda a validação somente no final (Giarrantano e Riley, 1994) apud (Silva, 1998).

3.3 SISTEMAS ESPECIALISTAS CORRELATOS COM ESTE TRABALHO

No contexto desta dissertação, podem-se citar alguns trabalhos como o de Botega (2016), Bonfin (2015), Gomes (2015), Pedroso (2013), Hernandez (2012), Matelli (2008), Massirer (2007), e Emri e Kovacic (1997).

Botega (2016) desenvolve um SE para selecionar técnicas de criatividade de diversas áreas do conhecimento, convergindo conhecimentos de Engenharia Mecânica, Metodologia de Projeto, Design Centrado no Usuário, Inteligência Artificial e Engenharia de Conhecimento. Seu objetivo é fornecer opções de técnicas de criatividade durante o processo de design de produto dos projetos. Este SE protótipo conta com 24 ferramentas de suporte à criatividade.

Bonfin (2015) apresenta um SE que auxilia no diagnóstico de avarias em transformadores de transmissão. Os dados de entrada são obtidos dos ensaios realizados e alguns parâmetros técnicos do transformador. Um dos principais objetivos é estimar o momento de se proceder à manutenção preventiva dos equipamentos, resultando numa maior disponibilidade dos sistemas de transmissão.

Gomes (2015) relata o uso do SE para auxiliar no projeto da ferramenta utilizado no processo de trefilação de fio. O problema é similar ao abordado nesta dissertação: o banco de dados para novos projetos é de difícil acesso ou restrito a poucos especialistas. O SE compila dados de projetos anteriores e também conhecimento obtido dos próprios especialistas através de uma base de conhecimento que possa ser acessada de forma rápida, estruturada e organizada. E visa reduzir os

tempos gastos com planejamento de novos projetos ou alterações em projetos já existentes.

Pedroso (2013) mostra um SE para diagnóstico de falhas de performance em compressores herméticos. O objetivo é de melhorar a qualidade dos diagnósticos e da redução do tempo e custo destas análises, além de facilitar o compartilhamento do conhecimento e experiência dos especialistas para outras áreas da empresa.

Hernandez et al (2012) propôs um sistema especialista protótipo, denominado GREENESYS, para dar suporte na seleção de métodos e ferramentas de Design for Environment – Projeto para o meio-ambiente no processo de desenvolvimento de produto. Um dos problemas levantados era: (1) falta de conhecimento dos projetistas e especialistas mais novos e (2) e as metodologias propostas estavam espalhadas pela literatura em vários níveis de abstração, muitas vezes focada em ciclos de vida, produtos e indústrias específicas.

Matelli (2008) desenvolve dois sistemas para projeto de plantas de cogeração a gás natural. Um utiliza técnicas de SE e o outro raciocínio baseado em casos (RBC). O objetivo é utilizá-los para apoio as fases de projeto conceitual e preliminar de plantas de cogeração.

Massirer (2007) apresenta um SE para as etapas de estruturação da lista técnica de produto dentro do processo de desenvolvimento do mesmo. O objetivo é que este sistema auxilie as atividades do projetista com relação à liberação da lista de engenharia ou BOM – Bill of material.

Emri e Kovacic (1997) criam um SE chamado de TENSALUM para uso no processo de ensaios mecânicos de alumínio e suas ligas tendo como base 9 diferentes padrões internacionais. O programa atua como uma ferramenta de suporte para o operador durante todo o processo de realização do ensaio. Estudos mostraram uma redução de 300% a 400% do tempo de ensaio quando utilizando o SE em comparativo com outros programas disponíveis no mercado.

3.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE DO SE PROTÓTIPO

Com o intuito de validar a proposta de um SE para atuação na análise crítica de projetos de compressores de aplicação *household*, foi desenvolvido um SE protótipo no segundo trimestre de 2015, durante a disciplina de Sistemas Especialistas aplicados à Engenharia.

Por questão do curto espaço de tempo na disciplina, a base de conhecimento foi feita pelo próprio engenheiro de conhecimento, pois o mesmo atua como especialista na empresa-alvo, desde 2010.

Por ser mais simples, neste protótipo foi usada a representação através de regras, sem modelagem por objetos. Fez-se uso do modelo incremental no processo de desenvolvimento.

Os requisitos funcionais a serem avaliados são basicamente os mesmos do SE da dissertação com exceção da capacidade de refrigeração. A diferença está nas opções de entrada, a qual tem interface com o usuário. Não houve a separação por subsistemas e se dividiu em 5 grandes tipos de alterações de projeto, conforme observado no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Lista de entrada do SE protótipo.

Pergunta 1	O projeto se destina a qual família de compressor full-motion?
Pergunta 2	Haverá necessidade da criação de um novo motor?
Pergunta 3	Haverá necessidade de aplicação HST (high starting torque) também conhecido por partida não equalizada?
Pergunta 4	Haverá alteração na janela de aplicação (LBP MBP HBP e seus derivados) ou range de tensão do compressor?
Pergunta 5	Haverá alteração de suspensão (Exemplo: rigidez da mola) ou range de rotação que possibilite deslocamentos maiores dentro do compressor? Ou: Haverá alteração das distâncias internas dos componentes em relação a carcaça do compressor: aproximando-os?
Pergunta 6	Haverá alterações no sistema de lubrificação (Exemplos: eixo, muffler sucção, volume óleo) que possam afetar a dispersão do óleo no interior do compressor ou aproximar o nível de óleo do muffler de sucção?

Fonte: Autor.

A pergunta 1 serve somente como dado de aquisição sobre qual família de compressor *fullmotion* se destinava o projeto.

O meio do SE são algumas regras construídas com base nas respostas do usuário referente às perguntas de entrada.

Exemplos de Regra para correlação entrada/saída:

- Se houver alteração de motor (pergunta 2) é necessário avaliar os requisitos de mínima tensão de partida, tombamento e temperatura de bobina em condições extremas;

- Se houver necessidade de aplicação do compressor em sistemas HST, os requisitos funcionais ruído em start/stop com partida não-equalizada deverão ser avaliados.

Foi realizada a verificação dos 32 casos possíveis de acordo com as variáveis de entrada, conforme disposto no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Lista de verificação do SE protótipo.

casos	Entradas						Saída emitida
	pergunta 1	pergunta 2	pergunta 3	pergunta 4	pergunta 5	pergunta 6	
1	ABCD	n	n	n	n	n	sim
2	ABCD	n	n	n	n	s	sim
3	ABCD	n	n	n	s	n	sim
4	ABCD	n	n	n	s	s	sim
5	ABCD	n	n	s	n	n	sim
6	ABCD	n	n	s	n	s	sim
7	ABCD	n	n	s	s	n	sim
8	ABCD	n	n	s	s	s	sim
9	ABCD	n	s	n	n	n	sim
10	ABCD	n	s	n	n	s	sim
11	ABCD	n	s	n	s	n	sim
12	ABCD	n	s	n	s	s	sim
13	ABCD	n	s	s	n	n	sim
14	ABCD	n	s	s	n	s	sim
15	ABCD	n	s	s	s	n	sim
16	ABCD	n	s	s	s	s	sim
17	ABCD	s	n	n	n	n	sim
18	ABCD	s	n	n	n	s	sim
19	ABCD	s	n	n	s	n	sim
20	ABCD	s	n	n	s	s	sim
21	ABCD	s	n	s	n	n	sim
22	ABCD	s	n	s	n	s	sim
23	ABCD	s	n	s	s	n	sim
24	ABCD	s	n	s	s	s	sim
25	ABCD	s	s	n	n	n	sim
26	ABCD	s	s	n	n	s	sim
27	ABCD	s	s	n	s	n	sim
28	ABCD	s	s	n	s	s	sim
29	ABCD	s	s	s	n	n	sim
30	ABCD	s	s	s	n	s	sim
31	ABCD	s	s	s	s	n	sim
32	ABCD	s	s	s	s	s	sim

Fonte: Autor.

Para a validação do mesmo, foram convidados dois especialistas de produto da empresa-alvo. Um com menos de 5 anos e outro com mais de 20 anos de experiência no assunto. Ambos deram um retorno satisfatório quanto ao uso do SE, pois foi possível avaliar, através de dois perfis diferentes, tanto a interface do usuário, quanto, a base de conhecimento do SE. Ambos citaram que o SE protótipo possui potencial para usado como base de conhecimento para os especialistas de menor experiência e também como consulta para os planejamentos das certificações. Os mesmos também apontaram algumas sugestões de melhoria na interface: por exemplo, a possibilidade de um relatório na qual pudesse ser salvo pelo próprio especialista após o uso do mesmo. E também a introdução de imagens para facilitar as explicações no relatório de saída. Estas sugestões foram de fato introduzidas na versão do SE desta dissertação.

4 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA ESPECIALISTA PROTÓTIPO

Neste capítulo tem o objetivo de mostrar o processo de desenvolvimento do SE tema desta dissertação. Desde as etapas iniciais de aquisição e representação de conhecimento até as etapas de verificação e validação do mesmo.

A implementação do SE seguiu o modelo incremental e foi dividido nas seguintes etapas. Conforme pode ser observado no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Etapas do Modelo Incremental.

Versão	Subsistema
V01	Descarga, sucção
V02	Mecanismo
V03	Motor
V04	Carcaça e suspensão
V05	Sistema de refrigeração
V06	Inversor: <i>software e hardware</i>
	Requisito
V07	Capacidade de refrigeração

Fonte: Autor.

Nas versões 01 a 04, foi implementada a base de conhecimento correspondente aos cinco subsistemas do compressor, detalhados no capítulo 2. A versão 05 está relacionada com alterações exigidas ou fundamentais para determinado cliente / mercado, aqui denominada de sistema de refrigeração. A versão 06 é relativa ao inversor de frequência que foi desmembrado em dois subsistemas: software e hardware. Para todas essas versões, o SE foi implementado considerando 6 dos 7 requisitos funcionais descritos no capítulo 2. O requisito funcional capacidade de refrigeração foi implementado na versão 07, na qual todos os subsistemas que possuem relação com o mesmo foram revisados.

Após o SE estar verificado com todas as versões implementadas, o mesmo foi traduzido para o idioma inglês. A tradução é relativa somente aos itens que estão na interface do usuário. O intuito de liberar o SE no idioma inglês é para possibilitar que especialistas dos outros

países na qual a empresa-alvo possui centros de engenharia e manufatura (México, Eslováquia, China) possam usá-lo.

4.1 ESCOPO

Conforme citado de forma simplificada no capítulo 2, este SE protótipo tem algumas limitações na sua abrangência de domínio de conhecimento, conforme abaixo:

- compressores de deslocamento alternativo: biela-manivela;
- compressores *fullmotion*: velocidade variável, as quais fazem uso do dispositivo de controle: inversor eletrônico de potência;
- compressores para aplicação doméstica. Podem ser divididos em:
 - *All refrigerator*: sistemas que não possuem freezer;
 - *Combi*: sistemas que possuem ambos: refrigerador e freezer;
 - *Freezer*: sistemas que possuem somente freezer como compartimento único.

A proposta de atuação do SE, conforme exposto no capítulo 1, é de dar suporte ao processo de análise crítica e plano de testes de desenvolvimento. Este SE propõe fazer isso correlacionando às alterações de produto do projeto em questão com os requisitos funcionais possivelmente impactados por esta alteração. As interfaces de entrada e saída serão detalhadas a seguir.

4.2 AQUISIÇÃO DE CONHECIMENTO

O processo de aquisição de conhecimento ocorreu de duas formas:

1. Engenheiro de conhecimento (EC) atuando como o especialista humano (EH): os últimos dois projetos grandes de compressores *fullmotion* de aplicação doméstica, o EC atuou como especialista no processo de desenvolvimento e implementação do produto. E também atuou por cerca de 3 anos como EH em projetos médios.
2. Processo de entrevistas com os especialistas humanos (EHs): através de reuniões de uma a duas horas cada com os especialistas dos subsistemas do compressor.

Com relação ao item 1, os dois projetos grandes mencionados ocorreram de 2014/2015 e 2015/2017. São projetos que contaram com a participação de cerca de 20 especialistas de subsistemas. Sendo que o último projeto teve o objetivo de desenvolver uma nova plataforma de compressores, ou seja, todos os subsistemas foram impactados. Com isto, foi possível obter um grande número de informações contidas nas análises críticas (CPA) e também nos planejamentos das certificações. Além disso, o próprio EC utilizou do seu conhecimento adquirido durante esses projetos para contribuir com a parte de explicação do relatório de saída. O período no time de projetos médios da empresa-alvo foi importante para contribuir com as principais alterações de produto que ocorrem nesses tipos de projetos.

Com relação ao item 2, o processo de entrevistas ocorreu entre os meses de setembro/2016 e abril/2017. Foram entrevistados 7 especialistas em subsistemas, conforme quadro resumo a seguir:

Quadro 4.2 - Especialistas por subsistema e tempo de experiência.

Subsistema	Tempo de Experiência (anos)
Mecanismo	8
Motor	15
<i>Hardware</i>	20
<i>Software</i>	10
Produto	15
Descarga e sucção	9
Carcaça e suspensão	10

Fonte: Autor.

Com exceção dos especialistas de hardware e software, as demais entrevistas foram feitas individualmente. Para deixar o processo mais produtivo, o EC utilizou um Quadro resumo para documentar o conhecimento obtido dos especialistas. No Quadro 4.3, há um exemplo do mesmo para o requisito funcional de mínima tensão de partida.

Quadro 4.3 - Exemplo da Quadro resumo para aquisição do conhecimento: requisito funcional Mínima Tensão de Partida.

Requisito Funcional	Nome do Especialista / Área	Explicação
Informe abaixo alterações em que se faz necessário a análise do requisito abaixo citado	Insira seu nome e área de conhecimento	Descreva o motivo pelo qual o requisito deve ser analisado
Mínima Tensão de Partida		
Descarga: alterações que aumentam a perda de carga: volumes (tamanho e barreiras) e tubos (comprimentos e diâmetros)	Especialista 1 / Termodinâmica	O aumento da perda de carga consequentemente aumenta o torque resistivo criado pelo gás refrigerante. O sistema de descarga é mais influente com relação ao torque resistivo devido a perda de carga nesta região ser maior do que na sucção
Sucção: alterações que aumentam a perda de carga: volumes (tamanho e barreiras) e tubos (comprimentos e diâmetros)	Especialista 1 / Termodinâmica	O aumento da perda de carga consequentemente aumenta o torque resistivo criado pelo gás refrigerante.
Rigidez do mecanismo: bloco, eixo, biela	Especialista 2 / Produto	Alterações de rigidez nestes componentes: 1. podem modificar a distância rotor e estator e consequentemente impactar na folga radial. Para VCC, por ter folgas maiores, por ser considerado não crítico 2. rigidez muito baixa pode atravessar o pistão para dentro do cilindro.
Downsizing: carcaça e nível de óleo	Especialista 2 / Produto	Modificações de compressor EG para EM, por exemplo, o requisito de partida equalizada altera, devido a questão da menor quantidade de gás estar retido no óleo do compressor - a pressão interna da cavidade aumenta.
Características do tipo de óleo / refrigerante	Especialista 3 / Mecanismo	Miscibilidade gás retido no óleo afeta a pressão equalizada;

Fonte: Autor.

O intuito é o especialista listar as possíveis alterações de produto do seu subsistema que afetam o requisito funcional mencionado. Na segunda etapa, preencha-se a coluna de explicação com o intuito de dar

detalhes técnicos do motivo pelo qual se faz necessária a análise daquele requisito.

Com este procedimento de entrevistas e também com o conhecimento prévio do EC com relação ao produto *fullmotion*, foi possível completar o Quadro resumo com um número de mais de 60 alterações de produto e suas respectivas explicações.

4.3 REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO

A representação de conhecimento do SE protótipo é baseada em regras e com orientação a objetos.

As regras expressam o conhecimento através de uma declaração condicional do tipo Se-Então, estas declarações são compostas por duas partes: antecedente (conhecida por parte condicional) e conclusão, que define o procedimento a ser realizado dependendo do cumprimento das condições (Silva, 1998). Há dois métodos de inferência geralmente usados: encadeamento direto e o reverso. No direto, ocorre o raciocínio dos fatos informados pelo usuário até chegar às conclusões resultantes destes fatos. Já no reverso, o raciocínio parte de uma hipótese, uma conclusão potencial a ser provada, até chegar aos fatos que suportam esta hipótese (Giarrantano e Riley, 1994) (Silva, 1998).

De acordo com Dym e Levitt (1991), as regras não são poderosas o suficiente para representar o conhecimento a problemas de síntese, pois não permitem uma adequada representação das informações (dados) associadas a entidades reais desses problemas.

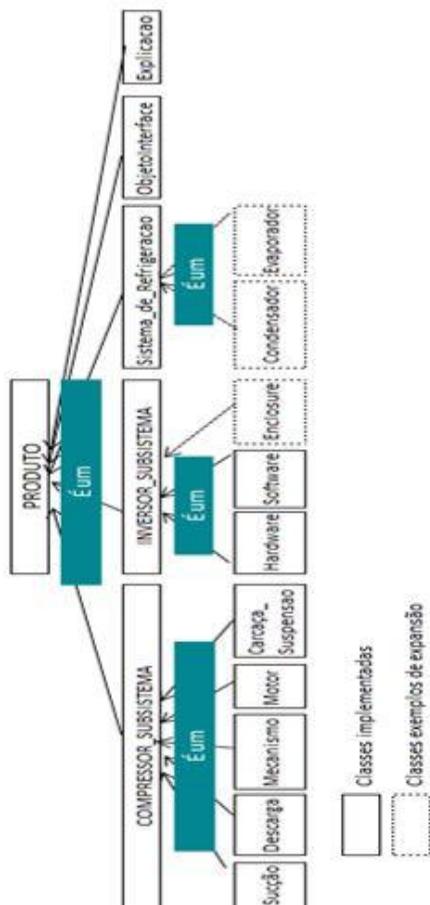
Para o SE em questão, foi utilizado o método de encadeamento direto na qual o usuário responde as questões relativas às alterações de produto do projeto em questão por subsistema, ou seja, fatos novos são gerados. E através deles chegam-se as conclusões dos requisitos funcionais a serem avaliados com suas respectivas explicações.

Com o intuito de representar a estrutura dos subsistemas do compressor e facilitar a expansão do SE protótipo para outros requisitos funcionais como os acústicos ou de confiabilidade, por exemplo, a orientação a objetos é uma excelente escolha. Modelagem Orientada a Objeto é útil para armazenar dados complexos, volumosos e hierarquicamente arranjados (Silva, 1998). A aplicação de orientação a objeto requer o entendimento de certas propriedades, que compõem a fundamentação teórica desta técnica: abstração, encapsulamento, herança e polimorfismo (Gonzalez e Dankel, 1993; Silva, 1998):

- Abstração: ignorar aspectos de algumas entidades que não são relevantes para o problema atual e com isso concentrar-se nos aspectos que realmente importam;
- Encapsulamento: cada parte do programa deve esconder características cuja interface revele o mínimo possível sobre seu trabalho;
- Herança: permite expressar as características comuns possuídas por uma coleção de objetos de diferentes classes;
- Polimorfismo: permite que cada classe responda a mesma mensagem de maneira diferente.

As classes (entidades) do SE protótipo podem ser vistas na Figura 4.1.

Figura 4.1. Estrutura de classe do SE protótipo.



Fonte: Autor.

A primeira parte é composta pelas classes dos subsistemas compressor e inversor, bem como, do sistema de refrigeração. Abaixo das duas primeiras estão os seus respectivos subsistemas: sucção, descarga, mecanismo, motor, carcaça e suspensão, hardware e software.

Em formato tracejado foram expostos exemplos de incrementos de subsistemas como o *enclosure*, condensador e evaporador. Eles não fazem parte do SE implementado.

A segunda parte é composta por duas classes, sendo uma responsável pelo texto de entrada do SE e também pela aquisição das

respostas do usuário: objetointerface. A outra armazena as explicações dos 7 requisitos funcionais que são apresentados no relatório final: explicação.

O Quadro 4.4 mostra a classe mecanismo e os atributos da mesma.

Quadro 4.4 - Classe Mecanismo: seus atributos e procedimentos.

Classe Mecanismo	
Atributos	Rigidez Folga_mancal Tamanho_bomba Perda_mecanica Lubrificacao Oleo Vazamento
Procedimento	Obter resposta do usuário

Fonte: Autor.

Há sete atributos que são relacionados aos diferentes tipos de alteração de projeto envolvendo o subsistema em questão. O procedimento de obter a resposta do usuário tem o intuito de saber quais dos atributos listados estão de fato sendo alterados.

As demais classes de subsistemas seguem a mesma lógica construtiva da classe mecanismo. O

Quadro 4.5.4.5 mostra a classe explicação e seus atributos.

Quadro 4.5 – Classe Explicação: seus atributos e procedimentos.

Classe Explicação		Comentários
Atributos	textoexplicacao_tomb	Texto da explicação Requisito Tombamento
	textoexplicacao_mintp	Texto da explicação Requisito Mínima Tensão de Partida
	textoexplicacao_pneq	Texto da explicação Requisito Partida não-equalizada
	texto_ceo	Texto da explicação Requisito Circulação Externa de Óleo
	texto_extrema	Texto da explicação Requisito de Temperatura Extrema de Bobinas
	texto_ruido_partida_parada	Texto da explicação Requisito de Partida e Parada

	texto_capacidade	Texto da explicação Requisito Capacidade de Refrigeração
Procedimento	Armazenar as explicações (texto e imagens) relativas de cada subsistema e o respectivo requisito impactado	

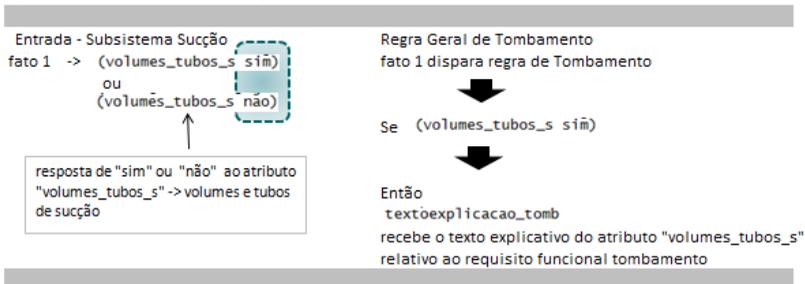
Fonte: Autor.

Há um atributo para cada requisito funcional, sendo sete no total. O intuito desta classe é obter e armazenar as explicações de cada alteração de subsistema com seu correspondente requisito impactado. Essas explicações fazem parte do relatório de saída que é detalhado a seguir.

Para a correta execução do SE, o mesmo é baseado em regras ativadas em função das respostas do usuário. Além das regras de execução que fazem parte da interface de entrada para fazer o questionário, há também uma estrutura com sete regras gerais, uma para cada requisito funcional. Essas regras fazem a ligação dos dados de entrada e saída do SE. Dentro de cada regra, há condicionais Se-Então que checam os atributos das classes dos subsistemas e dependendo do seu valor (sim ou não, oriundo do questionário de entrada), o mesmo é adicionado ao relatório de saída do texto de explicação do respectivo requisito funcional impactado.

A Figura 4.2 mostra um exemplo de parte da regra geral do requisito tombamento. Se o usuário responder “sim” no questionário de entrada para a alteração do subsistema sucção relativa aos volumes e tubos (volumes_tubos_s sim) então, na regra geral de tombamento, cujo requisito é impactado por essa alteração, o atributo (textoexplicacao_tomb) da classe explicação recebe o texto e, quando houver, imagens que vão por fim fazer parte do relatório de saída do SE.

Figura 4.2. Esquema da regra do requisito funcional tombamento.



Fonte: Autor.

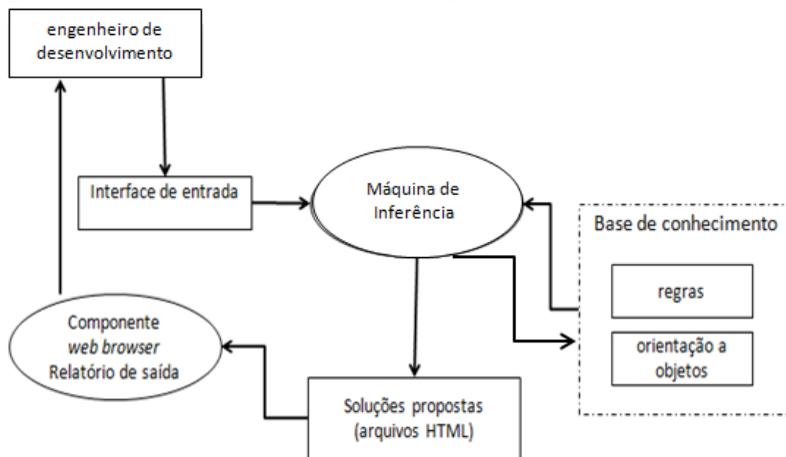
Esta forma de estrutura (1) separando por subsistema o questionário de entrada e (2) em regras gerais de produção, sendo 1 para cada requisito funcional, possibilita de forma muito eficaz a expansão do SE. Para novas alterações de projeto, deve-se somente agregar novos atributos às classes de subsistemas já existentes e conseqüentemente criar novas perguntas e agrupá-las quando possível. E caso tenha-se interesse em adicionar novos requisitos como, por exemplo, de performance acústica ou transporte, cria-se uma nova regra para cada novo requisito adicionado, seguindo a mesma lógica das regras já existentes.

Foi utilizado o SHELL como sistema de engenharia de conhecimento. De acordo com Massirer (2007), apesar de oferecer menor flexibilidade, fornece mais orientações e mecanismos para representação e acesso ao conhecimento. O desenvolvimento deve ser mais fácil, rápido e econômico com este tipo de sistema. A ferramenta escolhida foi o CLIPS (versão 6.30) que está disponível e a mesma foi usada pelo EC durante a disciplina de Sistemas Especialistas no SE protótipo inicial que deu origem ao trabalho desta dissertação.

4.4 ESTRUTURA DO SISTEMA ESPECIALISTA

A estrutura funcional para execução do SE protótipo é mostrada na Figura 4.3.

Figura 4.3. Estrutura funcional do SE protótipo.



Fonte: Autor.

O engenheiro de desenvolvimento se comunica com o SE por meio da interface de entrada (*software* CLIPS). Os dados de entrada são as informações fornecidas pelo usuário com relação às alterações de produto de cada subsistema. Com os mesmos preenchidos, a máquina de inferência entra em ação acionando a base de conhecimento do SE, neste caso, formada pelas regras e objetos com o intuito de encontrar a solução adequada para os fatos fornecidos. A partir de então, a solução é proposta no formato de arquivo HTML, e através do componente *web browser*, o relatório de saída é exibido para o usuário através de interface gráfica e textual.

4.5 UTILIZAÇÃO DO SE E CASOS IMPLEMENTADOS

Para a utilização deste SE protótipo o usuário necessita de um conhecimento prévio dos subsistemas do compressor e inversor conforme foi mostrado no capítulo 2. Assim, o mesmo pode informar de forma clara as alterações nos respectivos subsistemas através da interface de entrada do SE.

Conforme exposto na seção 1.1 o propósito final é informar aos usuários quais são os requisitos funcionais a serem avaliados e explicar o porquê do mesmo. O relatório de saída faz isso com o uso de um arquivo em formato *html* possibilitando o uso conjunto da explicação em mensagem textual e gráfica (quando necessário).

Para um entendimento do funcionamento do SE protótipo serão apresentados dois exemplos.

O primeiro exemplo é relativo a alterações em dois subsistemas: mecanismo e motor. No mecanismo é alterada a rigidez de um ou mais de seus componentes ou a redução na folga do mancal. No motor as mudanças são em relação às características construtivas do magneto. A Figura 4.4 mostra o questionário de entrada respondido pelo usuário. Estão destacados os itens informados como alterações do projeto em questão.

Figura 4.4. Questionário de entrada do exemplo 1.

```

*****
Prototype Expert System to support
the household hermetic compressors development
*****

.....
Is there any change in the Suction Subsystem? (y/n)?
R: n

.....
Is there any change in the discharge subsystem?(y/n)
R: n

.....
Is there any change in the mechanism subsystem?(y/n)
R: y

.....
Is there stiffness change in the following components: crankcase, crankshaft, connecting-rod or bearing clearance reduction?(y/n)
R: y

.....
Are there changes in:
* oil volute due to lubrication system: Examples: crankshaft (shape/channel pitch); pump type; volume or type of oil
* oil way flow: Examples: crankcase,suction muffler, shell, cylinder cover
* piston overlap: Examples: eccentricity, C dimension, connecting-rod length and cylinder slot
? (y/n)
R: n

.....
Are there changes at oil viscosity or geometric error specification increase?(y/n)
R: n

```


.....
Is there pump size increase?(y/n)

R: n

.....
Are there any changes at oil / refrigerant type or its properties?(y/n)

R: n

.....
Are there changes in:

- * Cylinder/piston clearance
 - * Crankcase L dimension (distance between bearing center up to cylinder lowest point)
 - * Crankcase top chamfer
 - * Cylinder top length
- ? (y/n)

R: n

.....
Is there any change in the motor subsystem?(y/n)

R: y

.....
Are there any changes in the geometry or magnet property; rotor inertia?(y/n)

R: y

.....
Is there a new project motor?(y/n)

R: n

.....
Is there any change in the shell & suspension subsystem?(y/n)

R: n

.....
Are there any changes in the parameters / limits of:

1. speed/voltage range;
2. application envelope;
3. high starting torque?

(y/n)

R: n

.....
Is there any change in the Hardware subsystem?(y/n)

R: n

.....
Is there any change in the Software subsystem?(y/n)

R: n

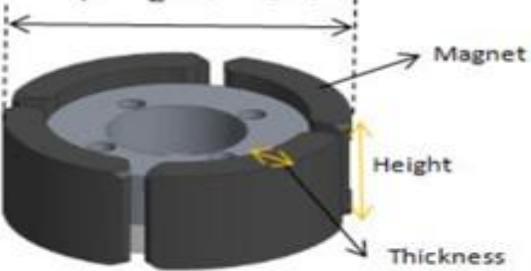
Fonte: Autor.

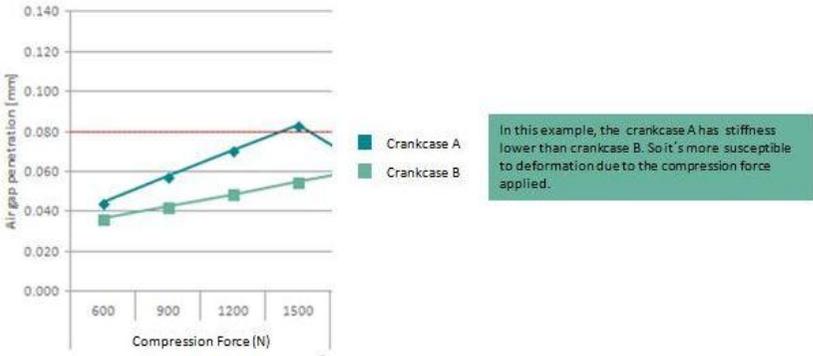
A Figura 4.5 mostra o relatório de saída com base nas entradas do usuário para as alterações feitas nos subsistemas mecanismo e motor conforme citado anteriormente. Pode-se observar também na coluna *Functional Requirements* os sete requisitos funcionais que fazem parte deste SE protótipo, a saber:

1. *Stalling*: tombamento
2. *Minimal starting voltage*: mínima tensão de partida
3. *Unbalanced starting*: partida não equalizada
4. *Oil external circulation*: circulação externa de óleo
5. *Winding extreme temperature*: temperatura de bobina em condições extremas
6. *Start and Stop noise*: ruído em partida e parada
7. *Cooling capacity*: capacidade de refrigeração

Figura 4.5. Exemplo 1 do relatório de saída.

Functional Requirements to be evaluated
Output file

Functional Requirements	Explanation
Stalling	<p># Rotor changes: inertia, geometry or magnetic properties. 1) Low inertia: it can cause speed oscillations between the starting and the stabilized condition point then the motor can not withstand the counter pressure and stalls. 2) geometry: magnet with lower thickness and height, it decreases the magnetic flow and consequently the torque. 3) magnetic properties: if increases the magnet grade (Br - Remanence), it increases also the magnetic flow and also the torque.</p> <p style="text-align: center;"> $\downarrow J = \frac{m}{2}(R_1^2 + R_2^2) \downarrow$ Lower Diameter, Lower Inertia </p> 

Minimal Starting Voltage	<p># Stiffness change: crankcase, crankshaft, connecting rod: 1. it can modify the distance between rotor and stator so consequently impact in the radial clearance. For Fullmotion compressors (variable speed), it may have less impact because the clearance are larger then Single Speed compressors. 2. stiffness very low can make the piston cross the cylinder section creating contacts between them and therefore demanding higher starting torque.</p> <p># Bearing clearance reduction: Inadequate level of clearance and geometric errors can create contact between the parts, making worst the compressor's starting.</p>  <table border="1" data-bbox="421 379 1234 735"> <caption>Airgap penetration data from graph</caption> <thead> <tr> <th>Compression Force (N)</th> <th>Crankcase A Airgap Penetration (mm)</th> <th>Crankcase B Airgap Penetration (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>600</td> <td>0.045</td> <td>0.035</td> </tr> <tr> <td>900</td> <td>0.055</td> <td>0.040</td> </tr> <tr> <td>1200</td> <td>0.070</td> <td>0.045</td> </tr> <tr> <td>1500</td> <td>0.085</td> <td>0.055</td> </tr> </tbody> </table> <p>In this example, the crankcase A has stiffness lower than crankcase B. So it's more susceptible to deformation due to the compression force applied.</p> <p># Rotor changes: inertia, geometry or magnetic properties. 1) Inertia: if increases the inertia, there is more difficulty in accelerate the compressor therefore impacting its starting. 2) geometry: magnet with lower thickness and height, it decreases the magnetic flow and consequently the torque. 3) magnetic properties: if increases the magnet grade (Br - Remanence), it increases also the magnet flow and also the torque.</p>	Compression Force (N)	Crankcase A Airgap Penetration (mm)	Crankcase B Airgap Penetration (mm)	600	0.045	0.035	900	0.055	0.040	1200	0.070	0.045	1500	0.085	0.055
Compression Force (N)	Crankcase A Airgap Penetration (mm)	Crankcase B Airgap Penetration (mm)														
600	0.045	0.035														
900	0.055	0.040														
1200	0.070	0.045														
1500	0.085	0.055														
Unbalanced Starting	<p># Rotor changes: inertia, geometry or magnetic properties: 1) Inertia: if increases the inertia, there is more difficulty in accelerate the compressor therefore impacting its starting. 2) geometry: magnet with lower thickness and height, it decreases the magnetic flow and consequently the torque. 3) magnetic properties: if increases the magnet grade (Br - Remanence), it increases also the magnet flow and also the torque.</p>															
Oil External Circulation	<p>#There is no need to evaluate this requirement.</p>															
Winding Extreme Temperature	<p>#There is no need to evaluate this requirement.</p>															
Start and Stop Noise	<p>#There is no need to evaluate this requirement</p>															
Cooling Capacity	<p>#There is no need to evaluate this requirement</p>															

Na coluna *explanation*, são mostradas as explicações da necessidade de avaliar o requisito em questão.

Com relação ao requisito tombamento ou *stalling*, há 3 impactos do rotor: (1) inércia: principalmente relacionada com o seu diâmetro, rotores menores possuem maior oscilação de velocidade dentro de uma volta mecânica e dependendo da condição de trabalho podem não suportar a contra-pressão do cilindro; (2) geometria: altura e espessura menores resultam em menor fluxo magnético e conseqüentemente menor torque do motor; (3) propriedade magnética: um ímã pode gerar um fluxo maior ou menor dependendo da sua classificação ou *grade*. Uma das propriedades relacionadas é a remanência (Br).

Com relação ao requisito de mínima tensão de partida ou *minimal starting voltage*, há impacto de rigidez dos componentes do mecanismo: quanto menor a rigidez, menor serão as folgas médias entre os componentes móveis como, por exemplo, eixo e mancal do bloco ou pistão e cilindro e impacto do rotor: (1) inércia: rotores maiores possuem maior dificuldade de aceleração na partida; (2) geometria e (3) propriedade magnética: quanto maior sua espessura / altura ou o seu *grade*, maior o fluxo magnético gerado.

Já o requisito de partida não equalizada ou *unbalanced starting* vale a mesma explicação de impacto do rotor feito para a mínima tensão de partida. Com a ressalva de que há diferenças de pressões na sucção e descarga do compressor e conseqüentemente tais alterações são mais significativas neste requisito.

Os demais requisitos não possuem impacto devido às alterações selecionadas.

No segundo exemplo mostrado no questionário de entrada da Figura 4.6, são apresentadas alterações do sistema de refrigeração. A saber: (1) faixa de rotação do compressor; (2) envelope de aplicação ou faixa de tensão.

Figura 4.6. Questionário de entrada do exemplo 2.

```

*****
Prototype Expert System to support
the household hermetic compressors development
*****

.....
Is there any change in the Suction Subsystem? (y/n)?
R: n

.....
Is there any change in the discharge subsystem?(y/n)
R: n

.....
Is there any change in the mechanism subsystem?(y/n)
R: n

.....
Is there any change in the motor subsystem?(y/n)
R: n

.....
Is there any change in the shell & suspension subsystem?(y/n)
R: n

.....
Are there any changes in the parameters / limits of:
  1. speed/voltage range;
  2. application envelope;
  3. high starting torque?
  (y/n)
R: y

.....
Is there any change in the speed range ?(y/n)
R: y

.....
Are there any changes in the application envelope or voltage range?(y/n)
R: y

.....
Is there any change in the Hardware subsystem?(y/n)
R: n

.....
Is there any change in the Software subsystem?(y/n)
R: n

```

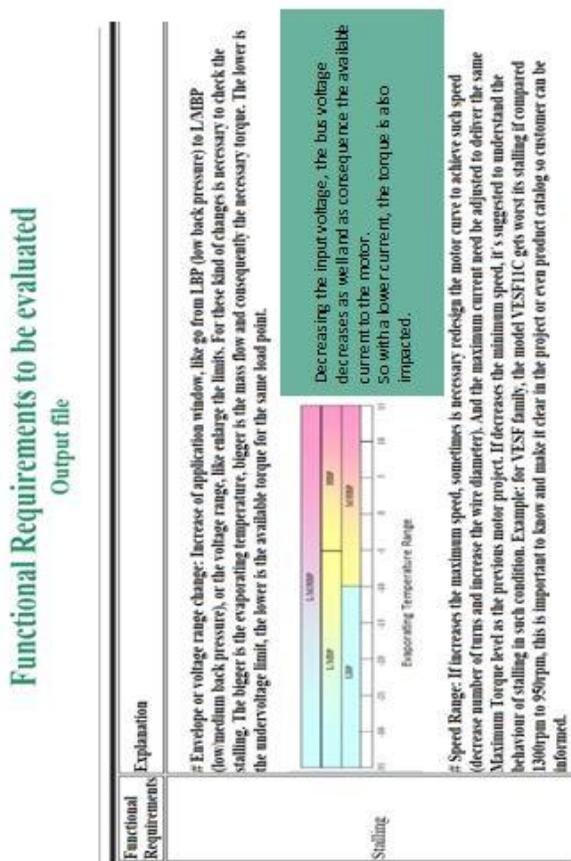
Fonte: Autor.

Essas necessidades de alterações devido ao cliente ou mercado estão cada vez mais comuns no desenvolvimento de projetos grandes. A rotação está ligada a algumas características importantes do refrigerador como, por exemplo, consumo do compressor. Há um ponto de ótimo, mas uma regra geral é que quanto menor a rotação, menor é o consumo do compressor e consequentemente maior a eficiência. Já o envelope de

aplicação está diretamente ligado com os tipos de refrigeradores e seus respectivos projetos. A faixa de tensão depende principalmente do país na qual o produto será aplicado.

As Figura 4.7, Figura 4.8, Figura 4.9 apresentam o relatório de saída do exemplo 2. O mesmo foi subdividido para facilitar a explicação dos seus respectivos gráficos.

Figura 4.7. Exemplo 2 do relatório de saída – parte 1.



Fonte: Autor.

Com relação ao requisito tombamento, o ponto principal é torque. Para a faixa de tensão, quando a alteração exige limite inferior de tensão menor do que o atual do produto, isso reflete diretamente na tensão de

barramento do inversor e por fim no torque disponível no motor. Com relação ao envelope de aplicação, sistemas com dois ou mais evaporadores e também sistemas com somente o refrigerador (sem o *freezer*) operam em regiões com altas temperaturas de evaporação (entre -5°C e $+5^{\circ}\text{C}$), e com isso, o fluxo de massa demandado também é maior, sendo necessário um maior torque para a condição de operação do produto. Já as alterações relativas à diminuição da rotação podem afetar o tombamento devido à flutuação de velocidade do rotor dentro de um mesmo ciclo devido a sua inércia. Na qual o rotor não consegue se sobrepor à contrapressão na compressão e “tomba”.

Figura 4.8. Exemplo 2 do relatório de saída - parte 2.

Minimal Starting Voltage	# Envelope or voltage range change: Increase of application window, like go from LBP (low back pressure) to L/MBP (low/medium back pressure), or the voltage range, like enlarge the limits. For these kind of changes is necessary to check the starting: The bigger is the evaporating temperature, bigger is the mass flow and consequently the necessary torque for starting. The lower is the undervoltage limit, the harder is to compressor reaches the condition (Suction / Discharge pressure) of equalized starting. Because the available torque will decrease.
Unbalanced Starting	# Envelope or voltage range change: 1) Envelope: conditions like MBP (medium back pressure) or HBP (high back pressure) demand starting in higher evaporating temperatures, sometimes, the compressor does not have enough torque for unbalanced starting. 2) Voltage range: the lower is the undervoltage limit, the harder is to compressor reaches the condition (Suction / Discharge pressure) of unbalanced starting. It's recommended approval in appliance level with the customer.
Oil External Circulation	# Speed Range: Mainly when increases the maximum speed, it's expected an increase in the external oil circulation due to the higher pump rate.
Winding Extreme Temperature	# Envelope or voltage range change: Increase of application window, like go from LBP (low back pressure) to L/MBP (low/medium back pressure), or the voltage range, with the upper limit, the motor power also increases and consequently its temperature.

Fonte: Autor.

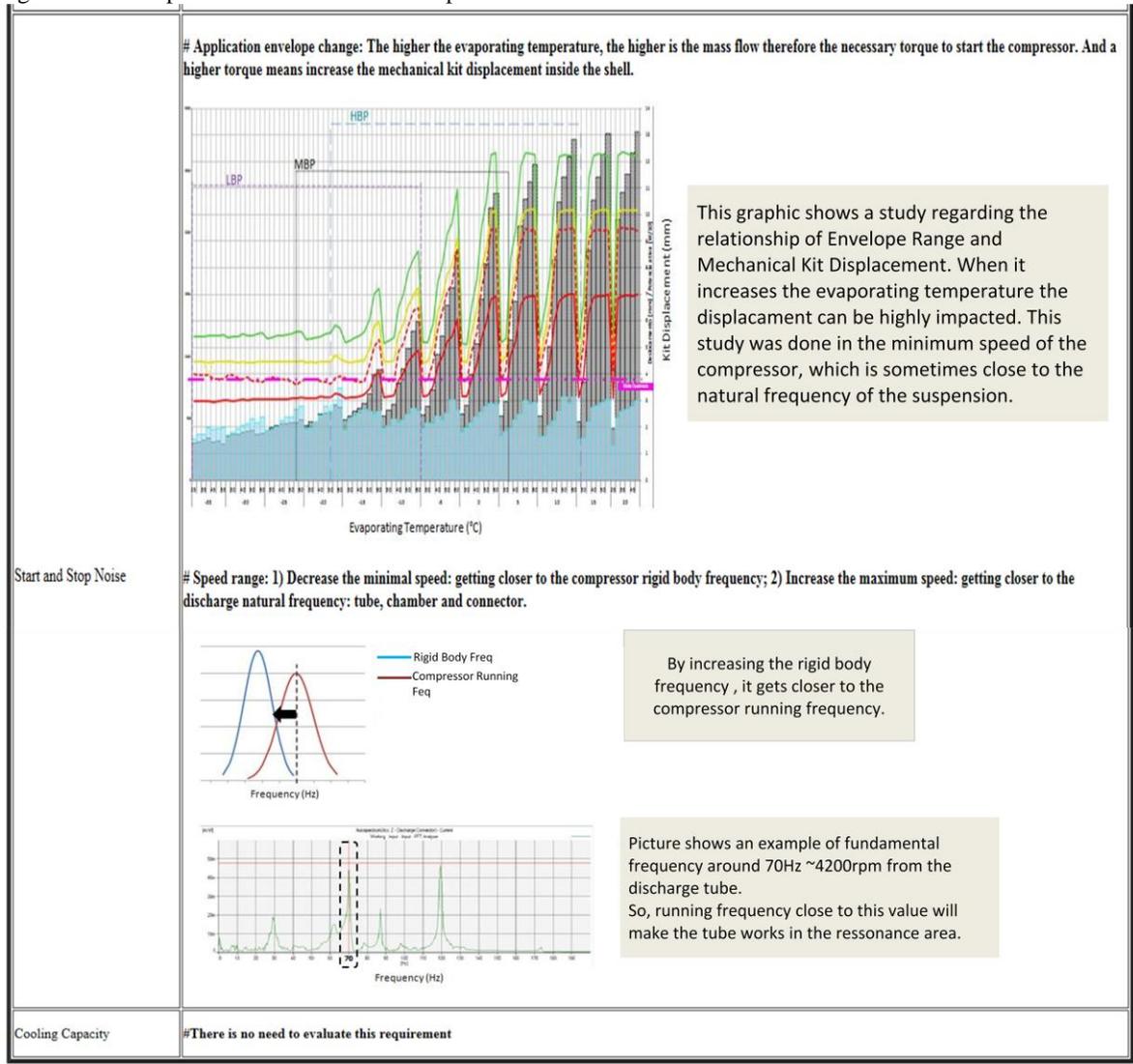
O requisito mínima tensão de partida, também está relacionado ao torque do compressor. Com a redução da tensão, o torque disponível diminui e pode impedir o compressor de partir numa dada condição.

Para a partida não equalizada, os critérios de análise são, muitas vezes, do próprio cliente. Dependendo da temperatura de evaporação, o compressor pode não possuir torque suficiente para partir. E para redução da tensão, como o torque também diminui, a partida do compressor fica comprometida. Para critérios de projeto utiliza-se inicialmente a mínima tensão como sendo 90% da tensão nominal: 103 V e 198 V no caso de alimentação em 115 V e 220 V, respectivamente.

Com relação ao requisito de circulação externa de óleo, a mudança nos limites de rotação, principalmente com o aumento da rotação máxima, espera-se um aumento dos valores medidos para uma mesma condição devido ao aumento do fluxo de massa com o aumento da rotação. Vale lembrar que este aumento não é linear com a rotação, pois a circulação externa tem relação com diversos componentes do compressor, conforme já visto no capítulo 2, item 4.2.4.

Para a temperatura de bobina em condições extremas, com o aumento da janelas de aplicação (aumentando a temperatura de evaporação) ou através do aumento do limite superior da tensão, permite com que o motor atinja condições com de maior fluxo de massa e/ou de diferencial de pressão (sucção e descarga). Consequentemente a potência consumida pelo motor aumenta e também sua temperatura.

Figura 4.9. Exemplo 2 do relatório de saída – parte 3.



Fonte: Autor.

Para o requisito de ruído em partida e parada, o primeiro gráfico mostra um exemplo de estudo que relaciona temperatura de evaporação (*evaporating temperature*) – eixo horizontal com deslocamento do compressor (*kit displacement*) – eixo vertical. Com o aumento do envelope de aplicação, o torque necessário para partir o compressor aumenta e isso provoca um deslocamento lateral maior das molas de suspensão, e como consequência todo o compressor terá também um maior deslocamento. Este requisito tem uma alta criticidade, pois envolve uma interface grande de componentes e seus respectivos projetos: corpo e tampa, bloco, mola de suspensão, batentes laterais, bomba de óleo, tubo/volume de descarga e software do inversor.

O segundo gráfico mostra um exemplo de sobreposição da frequência de funcionamento do compressor com a de corpo rígido (mola de suspensão + massa do conjunto mecânico), fato este que ocorre em alterações para diminuir a rotação mínima de funcionamento do produto. Quanto maior esta sobreposição, maior o deslocamento do compressor e conseqüentemente, o ruído em partida e parada.

O terceiro e último gráficos trazem um exemplo da frequência fundamental do conjunto de descarga do compressor (passador + volume + tubo) em 70Hz (4200rpm), na qual alterações de rotação aumentando o limite superior podem causar o cruzamento da frequência de funcionamento com a de ressonância (fundamental) da descarga. Em casos como este, além de validar o requisito mencionado, é necessário checar a necessidade do uso de um “jump de frequência” por parte do software do inversor na qual para uma determinada região da faixa de rotação não será possível o funcionamento do compressor, com o intuito de evitar a quebra do tubo ou passador de descarga.

Para o requisito de capacidade de refrigeração, não se faz necessário sua análise.

4.6 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO

O processo de verificação tem o intuito de checar erros de semântica e sintaxe introduzidos durante a implementação, como por exemplo, erros na lógica de programação e erros de gramática e escrita com a interface ao usuário (Silva, 2014). De acordo com Gilstrap (1991), a validação determina a exatidão do código do produto final com relação aos requisitos/objetivos. Por exemplo: a saída do SE está conforme o que foi requerido?

Conforme dito no início deste capítulo, sete versões do SE protótipo foram feitas. Para cada nova versão, o SE era executado

novamente até a impressão do relatório de saída com intuito de checar os erros nas regras implementadas e na manipulação dos fatos gerados e objetos. Alguns dos erros geralmente encontrados em cada revisão seguem abaixo:

- Regras ativadas de forma antecipada: alguns dos requisitos funcionais imprimiam o resultado de execução do mesmo ainda durante o processo de resposta ao questionário de entrada. Foi detectado problema nas regras do SE;
- Relatório de saída incompleto: falta de algumas explicações no relatório. Mesmo tendo sido respondido sim para a alteração de produto: os textos explicativos, bem como, as figuras não estavam sendo impressas. Neste caso, houve problemas com algumas das regras e também na manipulação dos textos explicativos;

A interface de entrada é composta por um conjunto de perguntas separadas por subsistemas. O usuário responde sim ou não em cada uma delas dizendo se tal alteração ou conjunto de alterações faz parte do projeto em questão.

No Quadro 4.6 observa-se um total de 172 possibilidades diferentes de entrada a depender do tipo de alteração de produto de cada projeto. Ao todo são 27 perguntas que podem ser feitas ao usuário. Essas perguntas têm origem na base de conhecimento mapeada de mais de 60 alterações de produto citado anteriormente.

Quadro 4.6. Quadro resumo de possibilidades de entrada para o SE.

Subsistema	Quantidade de perguntas	Possibilidades de respostas
Descarga	4	16
Sucção	6	64
Mecanismo	6	64
Motor	2	4
Carcaça e suspensão	3	8
Refrigerador	3	8
Inversor: software e hardware	3	8

Fonte: Autor.

Todos eles foram verificados ao longo dos incrementos do sistema através das suas versões. No final ainda foi validado o SE completo em sua versão em inglês.

Boehm (1984) expressa de forma simples que para a verificação deve ser perguntado: “estou construindo o produto de forma correta?” e na validação: “estou construindo o produto correto?”. Conforme Gonzalez e Dankel (1993) apud Silva (1998), validação é a etapa de controle da qualidade final do SE. Ela garante que a saída do sistema está correta e que o sistema desenvolvido é o que os usuários querem e precisam.

No processo de validação, houve a participação de 3 especialistas de produto. Especialista 4 (engenheiro de produtos há 15 anos), especialista 5 (engenheiro de produtos corporativo com cerca de 20 anos de experiência com desenvolvimento de produtos) e especialista 6 (engenheiro de produto na Embraco China há 5 anos e com trabalhos anteriores em empresas fabricantes de refrigeradores). Vale lembrar que estes três especialistas não participaram da elaboração da base de conhecimento.

Para garantir o correto entendimento e eliminar possíveis barreiras dos especialistas no processo de validação foi enviado por email um tutorial descrevendo o passo a passo de cada etapa até chegar à impressão do relatório de saída. Após isso, houve conversas individuais sobre o objetivo dos mesmos como participantes da validação do SE.

O intuito é de que cada um dos 3 especialistas utilizasse o SE simulando casos hipotéticos ou reais de projetos em andamento, por exemplo. E, por fim, avaliar a consistência do relatório de saída, no que tange a base de conhecimento e a forma de apresentá-la.

Após o processo de validação, cada especialista foi questionado sobre (1) utilidade do SE e (2) a possibilidade de aplicação do SE como base de conhecimento, principalmente para especialistas com pouca experiência. As respostas foram bastante satisfatórias, conforme mostrado no Quadro 4.7.

Quadro 4.7 – Validação do SE protótipo – grupo 1.

Comentários	Especialistas
Utilidade do SE	
O SE poderia ser usado como consulta do especialista durante o processo de certificação de produto na etapa de análise crítica e planejamento.	Especialistas 4, 5 e 6.
Parte gráfica ajuda de forma significativa a melhorar as explicações	Especialistas 4 e 5.

Interface de entrada poderia ser melhorada.	Especialista 6.
Possibilidade de expansão para outros requisitos funcionais como os acústicos será muito importante, por ser um dos requisitos cada vez mais demandado pelos projetos.	Especialistas 5 e 6.
Base de Conhecimento	
O SE é muito rico em conhecimento. Até mesmo para especialistas com mais experiência, há certos itens do relatório de saída que são novidades e acabam agregando para os mesmos.	Especialista 4.
Aplicabilidade do SE pelos especialistas novos tanto durante o projeto, bem como, para aprendizado dos mesmos.	Especialistas 4, 5 e 6.

Fonte: Autor.

O processo de validação foi feito também com o time de projetos médios da planta Brasil da empresa-alvo. Cerca de 10 especialistas participaram.

Além de validação, o objetivo foi também explicar alguns conceitos de sistemas especialistas e sua aplicação no contexto proposto por essa dissertação.

No final, foi simulado um caso real de projeto em andamento. Além disso, foram feitas as mesmas perguntas com relação à utilidade e uso do mesmo principalmente com especialistas mais novos. Segue abaixo um resumo das respostas:

Quadro 4.8 - Validação do SE protótipo – time de projeto planta Brasil.

Comentários	Especialistas
Utilidade do SE	
Além do uso durante a análise crítica, o mesmo poderia ser usado pelo time de Qualidade para agregar maior conhecimento durante as discussões técnicas de alterações de produto dos projetos.	Líder do time de especialistas
O SE é válido como consulta para dar suporte nos planejamentos das certificações por parte dos	Consenso geral dos participantes da apresentação.

especialistas.	
Inclusão de alguns requisitos: também foi mencionado como desejável e positivo a possibilidade de acrescentar novos requisitos.	Especialistas 7 e 8.
Sistema com aprendizado contínuo: foi questionado se este SE possuía tal capacidade.	Especialista 7 e líder do time.
Base de Conhecimento	
Existe potencial do SE servir como base de conhecimento na empresa-alvo para os mais novos	Consenso geral dos participantes da apresentação.
Acesso: foi comentado de definir um local de fácil acesso do mesmo. Uma possibilidade é de incorporar o SE no ciclo de vida do produto dentro do sistema <i>Windchill</i> da empresa-alvo. O mesmo será avaliado junto ao departamento de gerenciamento de projetos da engenharia.	Especialistas 9 e 10.

Fonte: Autor.

5 CONCLUSÃO

Após a conclusão do processo de validação do SE com membros da engenharia da empresa-alvo é possível constatar que há oportunidade de aplicação do SE protótipo no processo de desenvolvimento de produto conforme uma das propostas iniciais dessa dissertação. Um dos pontos observados é que hoje não existe uma base de conhecimento para o domínio do problema em questão. Mesmo não abrangendo todos os requisitos funcionais descritos no capítulo 2, o protótipo conseguiu para os requisitos mencionados cumprir com sua proposta inicial de ferramenta de suporte ao desenvolvimento de compressores herméticos de aplicação doméstica de velocidade variável.

Com relação ao conteúdo técnico disposto neste trabalho, fica evidente a possibilidade de usar o mesmo como base de conhecimento. A adição da interface gráfica no relatório de saída contribuiu com este ponto, facilitando a explicação dos resultados obtidos por parte do SE.

Conforme abordado no capítulo 1, a gestão de conhecimento é um tema que possui desafios: como sua integração com o os demais *softwares* e programas de PLM (*Product Lifecycle management*). O intuito é disponibilizar para uso este SE protótipo na ferramenta de PLM *Windchill* na empresa-alvo.

Um dos objetivos específicos refere-se à contribuição para o treinamento de novos especialistas. Fato este comentado durante o processo de validação do SE. E também de estendê-lo para áreas com interface no fluxo de desenvolvimento do produto, como o time de Garantia da Qualidade.

Conforme apresentado no capítulo 4, o uso de orientação a objetos como técnica de representação de conhecimento possibilitou uma forma eficaz para expansão. Fato este comprovado ao longo das 7 versões do SE utilizando o modelo incremental.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS E COMENTÁRIOS GERAIS

A seguir, são apresentadas as principais recomendações para trabalhos futuros relacionados ao SE protótipo:

1. Expansão do SE: conforme já foi citado, a expansão do mesmo é algo natural de se pensar. As possibilidades são inúmeras. Mas se tratando de maior abrangência nos projetos, os requisitos acústicos são os principais;
2. Novas funcionalidades:
 - a. Interface de entrada: migrar do padrão textual do CLIPS para algo mais elaborado e que seja mais amigável ao usuário final;
 - b. *Baseline* de compressores *fullmotion*: questionar ao usuário se ele deseja ter acesso a base de dados dos tipos de compressores *fullmotion* com suas principais características, peculiaridades, benefícios e cuidados;
3. Sistema com inteligência contínua: possibilitar que o SE protótipo tenha capacidade de aprendizagem. Uma das sugestões é fazer isto através da criação de um chatbot de engenharia de produto, sendo possível abordar outras questões vinculadas aos planejamentos de testes e análises críticas, como por exemplo: (1) *template* padrão de desenvolvimento de algum componente, informando ao usuário sua função, principais evoluções ao longo dos anos, pontos de atenção nos projetos; (2) Novidades em recursos de testes e simulações de determinado subsistema ou componente; (3) Prototipagem: custos de diferentes tipos de protótipos, tempo de confecção de ferramental; correlação da fase do projeto e maturidade do protótipo.

Vale a pena lembrar a importância da parceria universidade-empresa na qual possibilitou ao mestrando realizar, mesmo que atuando em jornada reduzida, o seu trabalho de dissertação. Neste contexto, o intuito é de, não somente, transformar a teoria em prática ou neste caso conhecimento tácito em sistema especialista. Mas também, agregar no desenvolvimento profissional do próprio mestrando transformando dedicação em resultado.

REFERÊNCIAS

- [1] Andrich, Roberto, **Desenvolvimento de uma Plataforma para Avaliação de Desempenho de Estratégia de Acionamento de Motores usados em Produtos da Linha Branca**, 2013, 151f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade do Estado de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- [2] Back, N.; Dias A.; Ogliari, A.; Silva, J. C., **Projeto Integrado de Produtos**, Barueri/SP: Editora Manole, 2008, 601p.
- [3] Bittencourt, Guilherme. **Inteligência Artificial – Ferramentas e Teorias**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2001, 2º ed.
- [4] Boehm, B. W. **Verifying and validating software requirements and design specifications**. IEEE Software Journal, 1(1), 1984, pp. 75-88.
- [5] Booz, Allen. **New Products Management for the 1980s**. New York: Booz, Allen & Hamilton, 1982.
- [6] Bonfin, T. S., **Sistema Especialista para Análise Integrada de Respostas Advindas de Ensaios Experimentais Executados**, 2015, 121 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- [7] Botega, L. F. C., **Knowledge-based System for Categorization and Selection of Creativity Support Techniques in Design**, 2016, 215f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- [8] Carmo, M. G. V., **Fluxo de Energia Vibratória do Conjunto Moto-compressor para a Carcaça de um Compressor Hermético através das Molas de Suspensão**, 2001, 85 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- [9] Carvalho, R. S., **Métodos de Identificação de Fontes de Ruído em um Refrigerador**, 2008, 98 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em

- Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- [10] Chiasson, J., **Modeling and High-Performance Control of Electric Machines**: John Wiley and Sons Inc., 2005.
- [11] Dossat, R. J., **Principles of Refrigeration**, 1st Edition, New York, USA: John Wiley and Sons, 1961, 544p.
- [12] Durkin, John. **Expert Systems – Design and Development**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1994.
- [13] Dym, C. L. e Levitt, R. E. **Knowledge -Based Systems in Engineering**. New York: McGraw-Hill, 1991.
- [14] Emri Igor; Kovacic Drago, Expert System for Testing Mechanical Properties of Aluminum and Aluminum Alloys, **Journal of Expert System with Applications**, Vol. 12 (4), 1997, pp. 473-482.
- [15] Fávoro, Alexandre José; Santos, Nilson Moutinho dos. **Sistemas Especialistas**, disponível em <http://www.din.uem.br/ia/especialistas>. Acesso em 05/07/2015.
- [16] Giarratano, J; Riley, G. **Expert Systems-Principles and Programming**. Segunda edição, PWS Publishing Company, 1994.
- [17] Giarratano, J., **CLIPS User´s Guide** (volume 1, version 6.23), 2002, 160 p.
- [18] Gilstrap, Lewey, Validation and Verification of Expert Systems, **Journal of Telematics and Informatics**, Vol. 8 (4), 1991, pp. 439-448.
- [19] 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.
- [20] Gomes, I. A. C., **Sistema Especialista para a Trefilação a Frio de Barras de Aço**, 2015, 139 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.
- [21] Hernandez N. Vargas; Kremer G. Okudan; Schmidt L. C.; Herrera P.R. Acosta, Development of an expert system to aid engineers in the selection of design environment methods and tools, **Journal of**

- Expert System with Applications**, Vol. 39 (10), February 2012, pp. 9543-9553.
- [22] Kremer, R., **Introduction to Artificial Intelligence**. University of Calgary, 2001.
- [23] Krishnan, R. **Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives**: CRC Press, 2010.
- [24] Lange, Evandro, **Análise do Sistema de Válvulas Automáticas de Compressores Alternativos**, 2006, 121 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- [25] Maksimovic Maksim; Al-Ashaab Ahmed; Shehab Essam; Flores Myrna, Industrial Challenges in Managing Product Development Knowledge, **Journal of Expert System with Applications**, Vol. 71, 2014, pp. 101-113.
- [26] 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.
- [27] Matelli, J. A., **Sistema Baseados em Conhecimento para Projeto de Plantas de Cogeração a Gás Natural**, 2008, 134 f., Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- [28] Moraes, W. A., **Estudo de Ruído de Refrigeradores Causado pela Pulsção do Fluido Refrigerante no Condensador**, 2013, 104 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- [29] Nordlander, Tomas E. **AI Surveying: Artificial Intelligence in Business**. Tradução própria. Dissertação de Mestrado. Universidade de Montfort, 2001.
- [30] Novák, Libor, **21st Century Refrigeration**. Spišská Nová Ves: Embraco Slovakia s.r.o., 2013.

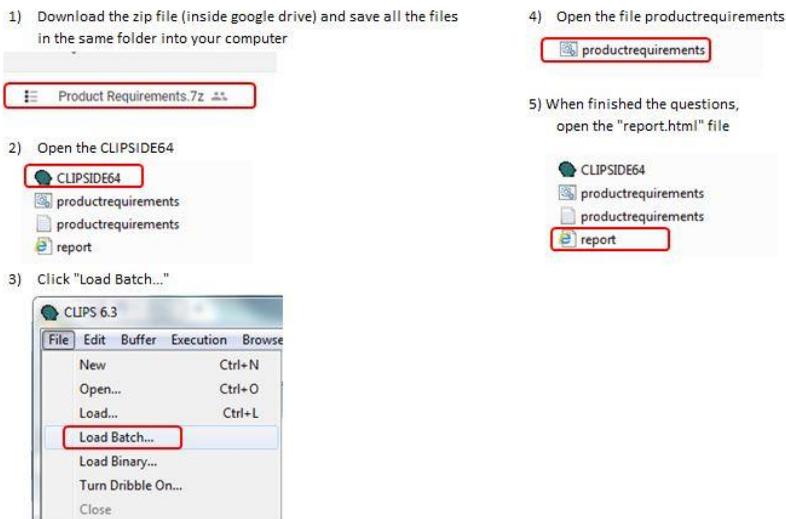
- [31] Pedroso, A., **Sistema Especialista Protótipo para Suporte ao Diagnóstico de Problemas de Baixo Desempenho de Compressores Herméticos**, 2013, 152 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- [32] Russel, S. J., Norvig, P. **Artificial Intelligence: a modern approach**. New Jersey: Prentice Hall, 1995.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Silva, J. C., Matelli, J. A., Bazzo, E., Development of knowledge-base system for cogeneration plant design: verification, validation and lessons learned, **Journal of Expert System with Applications**, Vol. 67, September 2014, pp. 230-243.
- [36] Simms Jed, **Cost Project Rework**, disponível em <http://projectmanager.com.au/reducing-cost-project-rework/>. Acesso em 22/04/2018.
- [37] Stoecker, W. F.; Jones, J. W., **Refrigeração e Ar Condicionado**, São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1985, 481p.
- [38] Telles, Matheus S., **Sistema Especialista Fuzzy para Diagnóstico de Transformadores de Potência**, 2005, 140 f., Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [39] Thomazini Júnior, J. C., **Desenvolvimento de Recursos para Aumentar a Produtividade de uma Bancada de Ensaio de Partida e Tombamento de Compressores de Refrigeração**, 2013, 148 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –

- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- [40] Trindade, Rafael Henrique, **Estudo de Máquinas Elétricas Não-convencionais: motor *Brushless* DC**. 2009, 30f., Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo.
- [41] Trott, A. R.; Hundy G. F.; Welch T. C., **Refrigeration and Air Conditioning**, 4th Edition, Oxford: Elsevier, 2008, 381 p.
- [42] Waterman, D.A., **A Guide to Expert Systems**, Boxton: Addison-Wesley Longman Publishing Company, 1986.
- [43] Zimmermann, Marco A., **Sistema Especialista Protótipo para Auxílio na Seleção de Bombas Hidrostáticas**, 2003, 105 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- [44] _____. Metodologia de desenvolvimento de projeto C2C 2.0, empresa Embraco. Joinville, 2015.

APÊNDICE A – Acesso ao SE

Para uma padronização da informação e evitar questionamentos repetidos de como faz para executar o SE, foi gerado uma figura que mostra as instruções de uso do mesmo, conforme a Figura A.1.

Figura A.1. Instruções gerais para execução do SE protótipo.



Fonte: Autor.

Os arquivos e programas citados nas instruções foram disponibilizados aos usuários através do diretório de rede *Google drive* da empresa-alvo. Como o intuito é que o SE possa ser usado de forma global, o guia de instruções foi feito no idioma inglês.

APÊNDICE B – Especialistas

No quadro abaixo são mostrados os nomes dos especialistas citados ao longo do capítulo 4.

Quadro B.1. Quadro com descrição dos nomes dos especialistas.

Especialista	Nome	Área de Atuação	Experiência (anos)
1	Sergio Lohn	Termodinâmica	5-10
2	Luis Jovita	Produto	15-20
3	Diego Sacomori	Mecanismo	5-10
4	Laerte Campestrini	Produto	20-25
5	Carlos Mafra	Produto	20-25
6	Zhu Jianchao*	Produto	5-10
7	Diogo Umbelino	Produto	5-10
8	Juliano Buchen	Embalagem	15-20
9	Ricardo Balsanelli	Produto	10-15
10	Jaderson Toth	Produto	<5

*Especialista chinês.

Fonte: Autor.