

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ
UNIDADE DE ENSINO MARACANÃ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Desenvolvimento de sistema de avaliação de
desempenho para compressor de metano
refrigerante**

Autor:

Brenno Jacinto Moraes de Abreu

Orientador:

Prof. Leydervan de Souza Xavier

**Rio de Janeiro
Dezembro 2015**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ
UNIDADE DE ENSINO MARACANÃ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Desenvolvimento de sistema de avaliação de desempenho para compressor de metano refrigerante

Brenno Jacinto Moraes de Abreu

Projeto final apresentado em cumprimento às normas do Departamento de Educação Superior do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador:
Prof. Leydervan de Souza Xavier, D.C.

**Rio de Janeiro
Dezembro 2015**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

A162 Abreu, Brenno Jacinto Moraes de
Desenvolvimento de sistema de avaliação de desempenho para
compressor de metano refrigerante / Brenno Jacinto Moraes de
Abreu.—2015.
xv, 111f. + anexo : il.color. , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2015.

Bibliografia : f. 107-111

Orientador : Leydervan de Souza Xavier

1. Engenharia mecânica. 2. Manutenção. 3. Compressores. 4.
Análise de correspondência (Estatística). 5. Confiabilidade
(Engenharia). I. Xavier, Leydervan de Souza (Orient.). II. Título.

CDD 621

Brenno Jacinto Moraes de Abreu

Desenvolvimento de sistema de avaliação de desempenho para compressor de metano refrigerante

Projeto final apresentado em cumprimento às normas do Departamento de Educação Superior do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Aprovado em ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Prof. Fernando Ribeiro da Silva (CEFET/RJ)

Prof. José Luiz Fernandes (CEFET/RJ)

Prof. Leydervan de Souza Xavier (CEFET/RJ) - Orientador

Rio de Janeiro
Novembro 2015

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus avós paternos, meu pai e minha mãe (*in memoriam*), por todo esforço na formação do meu caráter, pelo apoio ao longo desses anos e amor imensurável que deles recebi todos os dias da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar ao meu senhor Jesus Cristo, que me sustentou e direcionou em todos os momentos da minha vida.

A minha família e namorada pelo apoio incondicional, carinho e dedicação, sem os quais esse trabalho não seria realizado.

A todos que contribuíram para a realização deste estudo: os funcionários da Braskem e, principalmente, meu orientador, Leydervan de Souza Xavier, pelos desafios propostos, bons conselhos e direcionamentos.

A todos os mestres que dedicaram tempo e esforço em minha formação e desenvolvimento profissional.

Ao CEFET/RJ e todos que atuam direta e indiretamente para perpetuar a excelência do ensino tecnológico dessa instituição.

RESUMO

Este estudo tem por objetivo a elaboração de um Sistema de Monitoramento de um compressor centrífugo de dois estágios em uma planta petroquímica, visando aumentar a confiabilidade e disponibilidade do equipamento. Além disso, tem como objetivo secundário a identificação das variáveis críticas ao desempenho deste equipamento, através da utilização de uma técnica estatística conhecida como Análise de Correspondência. Para estas finalidades realizaram-se estudos nos campos de manutenção, máquinas de fluido e estatística, utilizando-se de técnicas dessas áreas e de softwares de simulação termodinâmica, gerenciamento estatístico e visualização de dados de processo de forma gráfica. Como resultado, verifica-se que o Sistema de Monitoramento apresenta ferramentas capazes de reduzir custos de manutenção e que o mapeamento das variáveis críticas ao desempenho do equipamento revela fatos que a revisão bibliográfica não foi capaz de prever.

Palavras-Chave: Sistema de Monitoramento; Análise de Correspondência; Confiabilidade; Manutenção; Compressores centrífugos.

ABSTRACT

This study aims to draw up a monitoring system of a centrifugal compressor in a two-stage petrochemical plant in order to increase the reliability and availability of equipment. It also has a secondary objective the identification of the critical variables to equipment performance, by using a statistical technique known as Correspondence Analysis. For these purposes were carried out studies in the fields of maintenance, fluid machinery and statistics, using techniques such areas and thermodynamic simulation software, statistical management and graphically process data visualization. As a result, it is found that the monitoring system provides tools that can reduce maintenance costs and the mapping of critical variables to equipment performance reveals facts that the literature review could not predict.

Keywords: Monitoring system; Correspondence analysis; reliability; Maintenance; Centrifugal compressors.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1. Considerações Iniciais.....	1
1.2. Descrição da Situação – Problema.....	2
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo Geral.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos.....	4
1.4. Questões Problema.....	4
1.5. Estrutura Metodológica do Estudo.....	5
1.6. Relevância do Estudo.....	5
1.7. Delimitações do Estudo.....	6
1.8. Organização do Estudo.....	6
2. Revisão da Literatura.....	8
2.1. Definições.....	8
2.1.1 De Confiabilidade.....	8
2.1.2. De Manutenção.....	9
2.1.3. De Máquinas de Fluido.....	9
2.2. Evolução da Manutenção.....	10
2.2.1. As Gerações da Manutenção.....	11
2.3. Técnicas de Manutenção.....	12
2.3.1. Manutenção Corretiva.....	12
2.3.2. Manutenção Preventiva.....	13
2.3.3. Manutenção Preditiva.....	14
2.4. Reliability Centred Maintenance (RCM).....	16
2.5. Máquinas de Fluido	18

2.5.1. Máquina de Fluido Geratriz	18
2.5.2. Máquina de Fluido Motriz	19
2.6. Tipos de Máquinas de Fluido	19
2.6.1. Máquinas de Deslocamento Positivo	20
2.6.2. Máquinas de Fluxo	20
2.7. Campo de Aplicação	21
2.8. Turbomáquinas	23
2.9. Compressores	23
2.9.1. Tipos de Compressores	23
2.9.1.1. Compressores Volumétricos	25
2.9.1.1.1. Compressores Alternativos	25
2.9.1.1.2. Compressores Rotativos	26
2.9.1.2. Compressores Turbos (Dinâmicos)	27
2.9.1.2.1. Compressores Axiais	30
2.9.1.2.2. Compressores Centrífugos	31
2.9.1.2.2.1. Formas Construtivas	32
2.9.1.2.2.2. Principais Componentes e Sistemas dos Compressores Centrífugos	36
2.9.1.2.2.3. Influência dos Parâmetros Operacionais nas Condições de Compressão.....	39
2.9.1.2.2.4. Tipos de Compressão Efetuadas em um Compressor Centrífugo	42
2.9.1.2.2.5. Manutenção em Compressores Centrífugos	43
2.10. Considerações Finais	44
3. Análise de Correspondência – Conceitos	45
3.1. Principais Conceitos.....	45
3.1.1. Matriz Indicadora	46

3.1.2. Nuvem de Pontos.....	46
3.1.3. Análise de Correspondência e Dados Longitudinais.....	47
3.1.4. Exemplo.....	47
3.1.4.1. Massa.....	48
3.1.4.2. Inércia.....	49
3.1.4.3. Máximo Número de Dinensões.....	49
4. Descrição do Funcionamento da UNIB04 e do Setor de Manutenção/ Confiabilidade.....	51
4.1. Descrição do Funcionamento da UNIB04	51
4.2. Setor de Manutenção/Confiabilidade	55
4.2.1. A Equipe	55
5. Descrição da Arquitetura de Monitoramento e Ferramentas Utilizadas	58
5.1. PI Process Book®	58
5.2. Banco de Dados.....	64
5.3. Metodologia de Cálculo	66
5.3.1. Hipóteses Adotadas	67
5.3.2. O Cálculo	70
5.3.2.1. Formulação	70
5.3.2.2. Comparação com o Data-Sheet.....	74
5.4. A Arquitetura de Monitoramento	76
5.4.1. Os Alarmes	76
5.4.2. As Telas de Monitoramento	77
5.5. Primeiras Conclusões.....	86
6. Análise de Correspondência e Resultados.....	93
6.1 Premissas.....	93
6.2 Construção da Matriz Indicadora.....	96

6.3 Statística® 7.0.....	97
6.4 Análise.....	98
6.4.1 Análise Inicial / Definição das Variáveis.....	98
6.4.2 Inércia X Número de Dimensões.....	99
6.4.3 As Nuvens de Pontos.....	101
6.4.4 Métrica Euclidiana e Resultados.....	103
7. Conclusão.....	106
Referências.....	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Componente de um programa de RCM.....	17
Figura 02: Campo de aplicação de ventiladores e compressores.....	22
Figura 03: Classificação dos Tipos de Compressores.....	24
Figura 04: Ilustração de um Impelidor.....	28
Figura 05: Fluxo do gás dentro de um compressor centrífugo.....	29
Figura 06: Compressor axial aberto – 15 estágios.....	30
Figura 07: Compressor centrífugo de um estágio.....	32
Figura 08: Carcaça de compressor centrífugo com corte horizontal.....	33
Figura 09: Carcaça de compressor centrífugo com corte vertical.....	34
Figura 10: Carcaça de compressor centrífugo “Gear Type”.....	35
Figura 11: Fluxo Interno de gás em um compressor centrífugo de dois estágios em corte longitudinal.....	36
Figura 12: Carcaça de compressor com sucção pelas extremidades e descarga central.....	37
Figura 13: Carcaça com sucção e descarga nas extremidades.....	38
Figura 14: Conjunto de Serpentina da seção de radiação.....	52
Figura 15: Fotografia do Compressor 1-GB-301.....	55
Figura 16: Organograma do Setor Manutenção/Confiabilidade.....	56
Figura 17: PI – Tela Inicial.....	60
Figura 18: PI – Sistema de monitoramento de UNIB4 e PE9.....	61
Figura 19: PI – Sistema de monitoramento do processo produtivo da planta de eteno (UNIB4).....	62
Figura 20: PI – Temperatura dos Mancais do 1-GB-301.....	63
Figura 21: PI – Níveis de Vibração x Velocidade do 1-GB-301.....	63

Figura 22: Comparação dos Fatores Z para diversos gases.....	68
Figura 23: Propriedades do ponto crítico.....	69
Figura 24: Tela Central – Arquitetura de Monitoramento	78
Figura 25: Análise de Desempenho do Compressor – Arquitetura de Monitoramento.....	79
Figura 26: Análise de Desempenho da Turbina – Arquitetura de Monitoramento.....	80
Figura 27: Análise de Desempenho dos Trocadores de Calor – Arquitetura de Monitoramento.....	81
Figura 28: Avaliação Mecânica – Arquitetura de Monitoramento.....	82
Figura 29: Velocidade x Níveis Vibracionais – Arquitetura de Monitoramento.....	83
Figura 30: Sistema de Lubrificação – Arquitetura de Monitoramento.....	84
Figura 31: Avaliação dos Instrumentos – Arquitetura de Monitoramento.....	85
Figura 32: Sazonalidade das Temperatura de Sucção e Descarga do 1º Estágio....	87
Figura 33: Pressão de Sucção e Descarga do 1º Estágio	88
Figura 34: Eficiência Politrópica 1º e 2º campanha do 1º Estágio.....	90
Figura 35: Eficiência Politrópica 1º e 2º campanha do 2º Estágio.....	91
Figura 36: Inércia x Número de Dimensões.....	99
Figura 37: Inércia Acumulada x Número de Dimensões.....	100
Figura 38: Nuvem de Pontos – 1 x 2.....	101
Figura 39: Nuvem de Pontos – 2 x 10	102
Figura 40: Nuvem de Pontos – 1 x 9.....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Influência da Velocidade nos Parâmetros Operacionais	40
Tabela 02: Influência da Temperatura de Sucção nos Parâmetros Operacionais	41
Tabela 03: Influência da Pressão de Sucção nos Parâmetros Operacionais	41
Tabela 04: Categoria de Fumantes	48
Tabela 05: Frequências Relativas	49
Tabela 06: Instrumentos Analisados - Operação	65
Tabela 07: Instrumentos Analisados – Mecânico	65
Tabela 08: Validação do Método Utilizado	75
Tabela 09: Coeficiente de Variação.....	95
Tabela 10: Coeficiente de Variação – Relação dos Resultados.....	95
Tabela 11: Nova Configuração das Variáveis.....	96
Tabela 12: Correlações.....	104

LISTA DE QUADROS

Quadro 01: Evolução da Manutenção.....	10
Quadro 02: Tecnologias Preditivas	15

SIGLAS E ABREVIATURAS

AC – Análise de Correspondência

ACS – Análise de Correspondência Simples

ACM – Análise de Correspondência Múltipla

MCC – Manutenção Centrada na Confiabilidade

NBR – Norma Brasileira

PCM – Planejamento e Controle da Manutenção

PE9 – Unidade de Polímeros de Polietileno

PP5 – Unidade de Polímeros de Polipropileno

RC – Razão de Compressão

RCM – *Reliability Centred Maintenance*

UNIB04 – Unidade de Insumos Básicos 04

Z – Fator de Compressão

Capítulo 1

1 – Introdução

1.1 – Considerações Iniciais

O ramo petroquímico tem sido constituído por empresas com grande grau de verticalização empresarial, onde, somente as empresas de maior porte, conseguem competitividade para se manterem atuantes no setor. Sendo assim, a confiabilidade dos sistemas de produção ganha destaque nas metas dessas multinacionais. (D'AVILA, 2002)

A estrutura de produção do setor petroquímico brasileiro é dividida em produtores de primeira, segunda e terceira geração, com base nos níveis de transformação dos insumos petroquímicos. Segundo a Braskem – Setor Petroquímico (2015), maior petroquímica da América Latina, a capacidade mundial de produção de eteno, um dos produtos de primeira geração, em 2015 é de 165 milhões de toneladas. Em 2018, a expectativa é a expansão da produção para 192 milhões de toneladas.

Para atender a essa demanda, as empresas de 1^o geração, fornecedoras de petroquímicos básicos, como eteno, propeno e butadieno, necessitam garantir a disponibilidade desses insumos, que irão constituir a base dos mais diferentes segmentos da indústria em geral. (D'AVILA, 2002)

A confiabilidade do processo é foco para se garantir a entrega dos insumos dentro das especificações de qualidade, quantidade e no prazo determinado. A operação e a manutenção devem estar alinhadas sob a mesma premissa de alto nível de produtividade, sem deixar de oferecer segurança aos colaboradores e ao meio ambiente.

Sendo essas duas funções, operação e manutenção, as mais importantes para a entrega do produto final de qualquer indústria, a manutenção ganha destaque

fundamental para garantir a manutenibilidade e disponibilidade dos equipamentos, sendo esses os resultados de uma gestão eficiente e do uso adequado de ferramentas como o PCM (Planejamento e Controle da Manutenção) e o RCM (*Reliability Centred Maintenance*).

Dentre as duas ferramentas citadas, a primeira define-se por um conjunto de ações para preparar, programar, verificar os resultados da execução das atividades de manutenção em relação a valores preestabelecidos e adotar medidas corretivas para os desvios (PEREIRA, 2009).

Já para a segunda ferramenta, o RCM, evidencia os requisitos de manutenção de qualquer sistema ou equipamento no seu contexto operacional, servindo como suporte à elaboração da melhor estratégia de manutenção. (BRANCO, 2008)

Pode-se dizer que a manutenção tem relação direta com a competitividade dessas organizações; suas ações para identificar e prever falhas, mitigar suas causas; e elaborar planos que garantam e/ou aumentem a confiabilidade de um sistema industrial, tendo sempre os gastos geridos de forma eficiente. Este conjunto de ações resultará em maior produtividade e lucratividade para a empresa. Sendo assim, é necessário para o desenvolvimento desse estudo estar atrelado às técnicas e ferramentas da função manutenção.

1.2 – Descrição da Situação – Problema

“Na manutenção da indústria brasileira, existem práticas desde o tipo puramente corretivas, ou seja, "quebrou-conserta", até técnicas pró-ativas, ancoradas no uso de tecnologias e processos avançados. Nesse contexto, destacam-se empresas dos setores de papel e celulose, petroquímico, aviação e siderúrgico como impulsionadores da utilização de técnicas de ponta em engenharia de confiabilidade. Os avanços em determinados segmentos são resultado das condições de mercado que exigem maior competitividade e, em consequência, maior disponibilidade operacional e menor custo. A manutenção na indústria brasileira está sintonizada com essa evolução e outras portas se abrirão para novos avanços" (ABRAMAN, 2004: 12).

O presente estudo concentra-se na Unidade de Insumos Básicos – UNIB4, também conhecida como uma indústria petroquímica de craqueamento térmico base

gás, da Braskem, localizada em Duque de Caxias. A planta opera 24 horas por dia e esteve em parada geral em junho de 2011, seus produtos eteno e propeno, são consumidos pelas unidades de polímeros de polietileno (PE9) e de polipropileno (PP5), que também estão alocadas em Duque de Caxias.

A escolha da empresa foi motivada pelo fato de o autor ser colaborador da mesma e ter observado a oportunidade de criar uma nova arquitetura de monitoramento e desempenho de um turbocompressor centrífugo. O equipamento alvo do estudo é considerado um dos principais equipamentos da unidade, podendo parar toda a operação da planta em caso de falha.

Atualmente, este monitoramento é feito pontualmente, para situações específicas, em que se desejam conhecer as condições mecânicas e termodinâmicas de um determinado instante. Não é possível realizar análises e diagnósticos de falhas em desenvolvimento. A inexistência de uma arquitetura de monitoramento contínua dos parâmetros físicos e termodinâmicos torna o estado de operação deste equipamento, em muitas situações, um enigma para os engenheiros.

O compressor alvo do estudo é comumente chamado de 1-GB-301, é um compressor turbinado centrífugo de dois estágios da Mitsubishi, modelo 4V-9B, que é utilizado para fornecer metano refrigerante com resfriamento entre os estágios, usando água de resfriamento. O compressor, em condições normais de operação, tem uma vazão de 13.720 kg de metano/h. Suas características de projeto são:

- Pressão de descarga de projeto: 47,7 Kgf/cm², aproximadamente 46,2 atm;
- Temperatura de descarga de projeto: 161,9 °C;
- Velocidade Máxima de Operação: 14.300 rpm.

Com a conclusão do estudo, espera-se atingir um aumento de confiabilidade do equipamento e segurança no processo, além da oportunidade de se quantificar e qualificar o desempenho da máquina. Para isso serão fundamentais os conhecimentos adquiridos no curso de Engenharia Mecânica e no decorrer do estágio, realizado na empresa.

1.3 – Objetivos

1.3.1 – Objetivo Geral

Propor uma arquitetura de sistema de monitoramento e avaliar um conjunto de parâmetros físicos e de desempenho que, associados, permitam caracterizar o estado físico do equipamento em tempo aceitavelmente próximo do ideal, ou seja, próximo do tempo real.

1.3.2 – Objetivos Específicos

- i. Identificar os parâmetros de operação importantes para garantir confiabilidade no funcionamento do equipamento;
- ii. Caracterizar cada parâmetro físico que atue isoladamente e/ou em conjunto tendo como consequência perdas de rendimento e riscos à integridade do equipamento;
- iii. Analisar o desempenho do equipamento com relação às condições de projeto
- iv. Analisar as variáveis que compõem o sistema de monitoramento através de ferramenta estatística para verificar quais destas influenciam de maneira considerável o rendimento do compressor;
- v. Contribuir para o aumento da confiabilidade do equipamento, tornando a planta mais eficiente operacionalmente.

1.4 – Questões Problema

- i. É possível a criação de uma arquitetura de monitoramento que atenda as condições reais de operação do equipamento?

- ii. As influências de cada parâmetro, seja ele operacional ou físico, podem ser analisadas e percebidas pelo modelo?
- iii. A ferramenta de monitoramento servirá para aumentar a confiabilidade e a disponibilidade do equipamento?

1.5 – Estrutura Metodológica do Estudo

Este estudo pode ser visto em duas vertentes: uma teórica e outra empírica. A vertente teórica visa a uma abordagem sobre manutenção e o que se configuram as melhores práticas para o monitoramento dos compressores. Como conceitos básicos para isso serão abordadas as características construtivas e de funcionamento destas máquinas, sempre tendo como foco os compressores centrífugos, com o objetivo de fundamentar as decisões.

A vertente empírica será constituída da criação de um banco de dados a partir dos instrumentos de monitoramento do compressor. Este banco de dados servirá para quantificar e qualificar os parâmetros físicos e termodinâmicos que o compressor apresentou ao longo do seu funcionamento. Será necessário caracterizar e equacionar o processo de compressão, dentro do volume de controle estabelecido. A etapa seguinte será a criação da arquitetura de monitoramento de desempenho no PI Process Book®, ferramenta de software para visualização de dados de forma gráfica, através dos dados teóricos e empíricos extraídos até o momento. Posteriormente, será realizada uma análise estatística visando identificar quais variáveis de processo tem possibilidade de influenciar significativamente o desempenho ou a confiabilidade do equipamento.

1.6 – Relevância do Estudo

Conforme as considerações anteriores constata-se a necessidade de se garantir a confiabilidade da planta. Em se tratando de que, aliados a um cenário complexo, com máquinas de grande porte e equipamentos automatizados, verifica-se a oportunidade de fazer evoluir as formas de acompanhamento e de manutenção

predictiva. Isto se alinha com a busca de máximo desempenho, custos otimizados e aumento confiabilidade do equipamento e de seus sistemas.

Pode-se acrescentar que, mesmo a função manutenção não sendo a geradora de recursos para a organização, o cumprimento desta atividade está diretamente relacionada à lucratividade da empresa e à continuidade do negócio. Sem a disponibilidade dos equipamentos não é possível a entrega do produto dentro das especificações requeridas.

O presente estudo pode contribuir, eventualmente, para aumentar a eficiência e a confiabilidade de outros sistemas industriais, já que a mesma abordagem pode ser utilizada para situações similares encontradas em plantas industriais. O monitoramento contínuo do desempenho de equipamentos e de seu estado físico é uma perspectiva que favorece a tomada de decisões mais rápidas e precisas, e, com apoio de softwares adequadamente customizados, tende a se difundir progressivamente com o tempo.

1.7 – Delimitações do Estudo

A presente monografia limita-se ao estudo do compressor de metano 1-GB-301, havendo foco na análise de seu desempenho, de seus parâmetros físicos e termodinâmicos, caracterizando como os mesmos podem ser afetados e afetar o equipamento como um todo. Destaca-se o fato do estudo estar limitado ao sistema de compressão do 1-GB-301, no ambiente industrial da empresa, não sendo abordados fatores externos.

1.8 – Organização do Estudo

A presente pesquisa está estruturada em 7 capítulos:

O primeiro capítulo tem caráter introdutório e é composto pelas considerações iniciais, descrição da situação-problema, objetivos do trabalho, questões-problema,

estrutura metodológica, relevância do estudo e delimitações do estudo e organização do estudo.

O segundo capítulo abrange a revisão da literatura para que haja embasamento teórico no desenvolvimento do estudo, compreendendo: a evolução da manutenção, as características das máquinas de fluido, principais grupos de compressores, principais características construtivas e funcionais de compressores centrífugos e a manutenção desses equipamentos.

O terceiro capítulo abrange uma revisão da literatura sobre a Análise de Correspondência. Será feita uma breve introdução ao método, apresentando seus principais conceitos e características.

O quarto capítulo contempla uma descrição da empresa, do funcionamento do setor de manutenção e da área industrial, havendo foco no fluxo do metano e nos produtos consumidos e gerados.

O quinto capítulo trata da “descrição da arquitetura”. Será apresentado o software utilizado – PI Process Book® e algumas de suas ferramentas, o banco de dados gerado através do software, os cálculos que foram necessários para produzir as principais informações e as telas produzidas. Também se torna necessário apresentar uma validação do Sistema de Monitoramento através de comparação direta com os testes de performance do equipamento.

O sexto capítulo apresenta um estudo com utilização da ferramenta de Análise de Correspondência, objetivando qualificar os principais parâmetros capazes de influenciar significativamente o desempenho do compressor.

O sétimo capítulo apresenta as conclusões do estudo.

Capítulo 2

2 – Revisão da Literatura

Esse capítulo trata dos fundamentos teóricos que suportam o desenvolvimento da pesquisa e está dividido em duas seções, o estudo da manutenção para nortear o desenvolvimento da arquitetura de monitoramento; e o estudo dos compressores, descrevendo-se os aspectos construtivos e funcionais desse grupo de máquinas.

2.1 – Definições:

2.1.1 – De Confiabilidade

A Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 5462:1994 define Confiabilidade como a capacidade de um item, sistema ou equipamento de desempenhar suas funções requeridas sob as condições estabelecidas, em um determinado período de tempo. O termo “Confiabilidade” é muito utilizado como uma medida de desempenho de confiabilidade

Segundo Fogliatto (2008), a confiabilidade de um item corresponde à probabilidade que o mesmo possui de executar adequadamente seu propósito, por um determinado período de tempo e sob fatores externos preestabelecidos.

Para Kardec & Nascif (2009), confiabilidade é a probabilidade de um item desempenhar sua função requerida, sob condições definidas de uso, por um intervalo de tempo pré-definido.

2.1.2 – De Manutenção

Na literatura é comum se encontrar diversas concepções de “manutenção”. Alguns desses conceitos serão expostos neste tópico.

Para Fuentes (2006), manutenção pode ser entendida como um conjunto de ações para prevenir, detectar falhas funcionais ou potenciais e corrigir estas falhas, com o objetivo de garantir as atividades operacionais e de segurança dos equipamentos, sistemas ou ativos.

A NBR 5462:1994 define manutenção como a capacidade de manter ou recolocar um item sob as especificações requeridas, ou seja, em um estado de funcionamento preestabelecido de acordo com a política de manutenção.

De acordo com Branco (2008), a manutenção é uma prestadora de serviço dentro da própria empresa, tendo como clientes a operação e outros setores e sendo responsável por garantir que as instalações estejam de acordo com parâmetros de funcionamento e estado preestabelecidos, gerindo custos e minimizando perdas.

Neste trabalho adota-se a concepção de Fuentes (2006), em que a manutenção é descrita como uma função proativa da organização, buscando ações de prevenção, correção e detecção de falhas.

2.1.3 – De Máquinas de Fluido

Para Junior (2006), as máquinas de fluido têm a finalidade de transformar a energia hidráulica disponível em um fluido em trabalho mecânico de um eixo, ou transformar o trabalho mecânico recebido através de um eixo em energia para um fluido executar movimento.

Para Brasil (2006), as máquinas de fluido são os equipamentos que promovem a troca de energia entre um fluido e um sistema mecânico, transformando energia mecânica em energia de fluido e o seu inverso.

2.2 – Evolução da Manutenção

A partir da década de 70 a manutenção industrial começa a adquirir um grau de importância diferenciado, evoluindo da sua condição inicial, quando atuava de forma reativa - conserto após a falha - para uma posição estratégica nas organizações, atuando de forma proativa. Fatores fundamentais das atividades industriais, relacionados com produção, qualidade e custos, passam a depender das condições de manutenção. A partir do Quadro 1 pode-se observar as gerações da manutenção e suas transições até a condição atual

Quadro 1: Evolução da Manutenção

Primeira Geração – 1940	Segunda Geração – 1940 a 1970	Terceira Geração – 1970 até os dias de hoje
<ul style="list-style-type: none"> • Conserto após a falha • Atitude REATIVA 	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidade crescente • Computadores grandes e lentos. • Sistemas manuais de planejamento e controle do trabalho. • Monitoração por tempo. • Atitude PREVENTIVA 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior disponibilidade e confiabilidade • Menor custo-benefício • Melhor qualidade dos produtos • Preservação do meio ambiente • Monitoração de condição • Projetos voltados para confiabilidade e manutenibilidade • Análise de risco • Computadores pequenos e rápidos • Análise de modos e efeitos de falha (FMEA) • Grupos de trabalho multidisciplinares • Atitude PROATIVA

Fonte: Kardec & Nascif (2009)

2.2.1 – As Gerações da Manutenção

Para Tavares (1996), a manutenção evoluiu ao mesmo passo que o desenvolvimento técnico industrial da humanidade, conforme ocorreram as revoluções industriais e passos largos foram dados em direção à digitalização de sistemas e à mecanização de atividades industriais; as técnicas de manutenção foram obrigadas a acompanhar essas mudanças e, pode-se então dividir a história da manutenção em três gerações.

Até 1914, a manutenção desempenhava um papel secundário na indústria e era executada pelo mesmo efetivo da operação. Com o advento da Primeira Guerra Mundial e o modelo de produção em série Fordista, surge a necessidade de atender a mínimos programas de produção e, como consequência, à necessidade de uma equipe especializada que pudesse reparar rapidamente os equipamentos no menor tempo possível. Essa etapa da manutenção pode ser vista como a primeira geração, conhecida como manutenção corretiva. (PASCHOAL, 2009)

Após a 2ª Guerra Mundial, Kardec e Nascif (2001) relatam que os esforços no desenvolvimento industrial durante o pós-guerra, produziram máquinas mais complexas e em maior quantidade e, assim, prevenir possíveis paradas se tornou cada vez mais relevante e necessário para atender a maior demanda. Com intervenções planejadas em intervalos de tempo fixo objetivando eliminar as falhas, tem início a segunda geração.

Ainda de acordo com Tavares (1996) o tempo gasto na investigação da falha é, geralmente, maior que o tempo gasto para realizar o reparo. A crescente demanda e a necessidade de uma maior velocidade de produção torna a manutenção tão importante quanto a operação, surgindo a necessidade de uma equipe especializada em planejar e controlar a manutenção e em analisar e investigar as causas das falhas. Esse conceito é o início da estruturação da Manutenção Preventiva.

A partir da década de 70, as críticas aos conceitos de manutenção passaram a ganhar força, o processo de mudanças nas indústrias se acelerou e o aparecimento de novas ideias e novas expectativas, assim como pesquisas e técnicas permitiu uma mudança no ponto de vista da engenharia de manutenção,

que passou a focar na confiabilidade dos equipamentos e buscar a quebra-zero, defeito-zero e acidente-zero. (PASCHOAL, 2009)

A engenharia de manutenção passou a buscar por métodos de predição ou prevenção de falhas, otimizando as atividades das equipes envolvidas. Historicamente, o choque do petróleo é considerado um marco para o gerenciamento da manutenção, pois determina a transição da segunda geração para a terceira. (KARDEC & NASCIF, 2001)

2.3 – Técnicas de Manutenção

A manutenção assume, em sua terceira geração, um papel de destaque para a obtenção da confiabilidade de um sistema, influenciando diretamente na produtividade e nos custos da organização. Sendo assim, é necessário que as técnicas de manutenção sejam dominadas pelos colaboradores, para que sejam aplicadas de forma eficaz, mantendo-se os equipamentos em funcionamento com um baixo custo. (SAMPAIO, 2005)

Na visão de Sampaio (2005), a manutenção pode ser executada de três formas diferentes, são elas:

- Manutenção Corretiva
- Manutenção Preventiva
- Manutenção Preditiva

2.3.1 – Manutenção Corretiva

Para Sampaio (2005) a manutenção corretiva é a mais conhecida dentre os tipos, baseia-se na ocorrência de alguma inconformidade, sendo uma falha no equipamento ou quando o mesmo apresenta um rendimento inferior ao estabelecido para uma operação satisfatória. Desta forma, conclui-se que a principal atribuição da

manutenção corretiva é restaurar ou reparar as condições de funcionamento do equipamento. Isto implica em uma produtividade com baixa confiabilidade, ineficiente e com possíveis danos consideráveis ao sistema ou equipamento, sendo considerado o método mais dispendioso.

A Manutenção Corretiva pode ser dividida em Planejada e Não Planejada. A Manutenção Corretiva Não Planejada acontece após uma falha sem que haja tempo disponível para a preparação dos recursos destinados à realização do serviço. Essa ocorrência trás prejuízos maiores, pois implica na parada súbita da produção, na realização da manutenção, na perda da qualidade do produto e em possíveis impactos ambientais. Um dos grandes desafios do setor é a eliminação dessa atividade, que apesar dos inúmeros transtornos e do alto custo, ainda é muito praticada nos dias de hoje. (NOGUEIRA & GUIMARÃES & SILVA, 2012)

Já a Manutenção Corretiva Planejada ocorre de forma mais gerenciada, pois após a ocorrência da inconformidade, a engenharia de manutenção poderá acompanhar a mesma, seja uma falha ou queda de rendimento. Essa política de manutenção vai depender da qualidade da informação fornecida pelo acompanhamento da inconformidade, que irá predizer o tempo disponível para a atuação e torna possível um planejamento das tarefas a serem executadas e dos recursos necessários, diminuindo os impactos na produção e os custos da ocorrência, podendo-se optar pelo funcionamento até a quebra. (NOGUEIRA & GUIMARÃES & SILVA, 2012)

2.3.2 – Manutenção Preventiva

Consiste em acompanhar o equipamento, de modo a prevenir a existência de falhas, baseado em intervalos regulares de manutenção. Esse tipo de manutenção é feita em equipamentos que estejam em funcionamento, mesmo que não apresentem sinais de falha, e consiste na troca de componentes, seguindo um padrão pré-estabelecido de partes que possuam a tendência de falhar com o aumento do uso. (SAMPAIO, 2005)

As dificuldades para realizar esse acompanhamento começam no momento em que se definem os intervalos de manutenção, pois em muitos casos são escolhidos aleatoriamente, por experiência ou estatisticamente, sem um estudo mais aprofundado das consequências da parada da máquina. Sendo assim, podem-se ocorrer dois resultados distintos. (NOGUEIRA & GUIMARÃES & SILVA, 2012)

Ainda de acordo com Nogueira & Guimarães & Silva (2012) o primeiro desses resultados ocorre quando a atividade é executada antes do necessário, gerando uma manutenção ineficaz e dispendiosa. O segundo ocorre quando a atividade é realizada tardiamente e o equipamento falha. Além desses inconvenientes inerentes à técnica, existe outro fator que pode dificultar a execução das atividades e acabar afetando a confiabilidade do sistema ou equipamento: a introdução de defeitos não existentes no equipamento, devido a:

- falhas humanas;
- falhas nos componentes sobressalentes;
- contaminações dos sistemas de óleo;
- falhas nas partidas e paradas dos equipamentos;
- falhas nos procedimentos de manutenção.

2.3.3 – Manutenção Preditiva

É considerada uma evolução da manutenção Preventiva, pois essa técnica consiste em realizar a parada somente no momento mais oportuno e necessário, tanto para o equipamento como para o processo produtivo. Isto só é possível através do acompanhamento das condições da máquina e como estas estão variando no tempo. (SAMPAIO, 2005)

Ainda de acordo com Sampaio (2005), a manutenção preditiva não deve ser utilizada com o objetivo de eliminar as outras técnicas já mencionadas, mas de minimizar de forma prática, técnica e objetiva a utilização dessas técnicas, através

do monitoramento de parâmetros estabelecidos, com uso de equipamentos e instrumentação adequada.

Para Nogueira & Guimarães & Silva (2012), essa técnica se torna interessante, pois permite uma manutenção mais eficaz, acompanhando o funcionamento do equipamento com medições regulares e garantindo seu funcionamento até um limite estabelecido pela equipe de manutenção como seguro para a operação do equipamento.

Ainda de acordo com Nogueira & Guimarães & Silva (2012), a manutenção preditiva prediz a falha do equipamento e quando se opta por fazer a intervenção no mesmo, o que ocorre, é uma manutenção corretiva programada.

Uma gama de tecnologias está à disposição da equipe de manutenção nos dias de hoje; os dados extraídos desses instrumentos permitem avaliar e programar de forma mais eficaz a função manutenção, é possível mensurar a degradação dos sistemas e traçar a melhor estratégia para repará-los. Abaixo se pode observar as mais diversas tecnologias e os equipamentos que podem ser contemplados por elas. (SEIXAS, 2006)

Quadro 02: Tecnologias Preditivas. Fonte: Seixas, 2006

MANUTENÇÃO PREDITIVA / INSPEÇÕES	MÁQUINAS DE FLUIDO	MOTORES ELÉTRICOS	GERADORES DIESEL	CONDENSADORES	MÁQUINAS DE TRANSPORTE	DISJUNTORES	VÁLVULAS	PERMUTADORES DE CALOR	SISTEMAS ELÉTRICOS	TRANSFORMADORES	TANQUES E TUBULAÇÕES
	TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS										
ANÁLISE E MONITORAMENTO DA VIBRAÇÃO	●	●	●		●						
ANÁLISE DO ÓLEO LUBRIFICANTE	●	●	●		●					●	
ANÁLISE DE PARTÍCULAS	●	●	●		●						
ANÁLISE TEMPERATURA DOS MANCAIS	●	●	●		●						

MONITORAMENTO DO DESEMPENHO	●	●	●	●				●		●	
DETECÇÃO DE RUÍDO ULTRASSÔNICO	●	●	●	●			●	●	●	●	
FLUXO ULTRASSÔNICO	●			●			●	●			
TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA	●	●	●	●	●		●	●	●	●	
TESTE NÃO DESTRUTIVO (ESPESSURA)				●				●			●
INSPEÇÃO VISUAL	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ÍNDICE DE POLARIZAÇÃO		●	●						●		
RESISTENCIA DE ISOLAMENTO		●	●			●			●	●	
ANÁLISE DA ASSINATURA DA CORRENTE DE MOTORES		●									
ANÁLISE DO CIRCUITO DE MOTORES		●				●			●		
MONITORAMENTO ELÉTRICO									●	●	

Através do Quadro 02 é possível delimitar quais parâmetros devem ser acompanhados para cada grupo de equipamento, não existe uma obrigatoriedade que limite a equipe de manutenção em somente acompanhar os grupos de parâmetros sinalizados. No entanto, é possível a criação de uma satisfatória metodologia de acompanhamento para a política de manutenção preditiva seguindo os planos traçados pelo Quadro 02.

Ainda deve-se acrescentar que através do Quadro 02 verificam-se as necessidades de monitoramento para o grupo de Máquinas de Fluido, grupo em que o equipamento de estudo do presente trabalho faz parte.

2.4 – Reliability Centred Maintenance (RCM)

O Reliability Centred Maintenance (RCM) é o desenvolvimento de uma metodologia que garanta a melhor estratégia de manutenção para um dado equipamento ou sistema. De acordo com Moubray (1992) é um processo responsável por determinar as necessidades de manutenção de qualquer ativo físico no seu contexto operacional.

De acordo com Seixas (2006) o método inicia-se com a identificação da funcionalidade ou desempenho requerido pelo equipamento no seu contexto operacional, identifica os modos de falha e as causas prováveis e, por fim, detalha as consequências dessa falha. Essa metodologia permite avaliar a criticidade de cada falha e componente, identificando as consequências para a segurança do processo, para o custo e para a disponibilidade do equipamento. É possível tratar cada grupo de modo de falha de forma diferente e mais eficaz, selecionando as tarefas mais adequadas.

Com o RCM, é possível explorar as vantagens de cada técnica de manutenção em conjunto, otimizando a função manutenção e minimizando os custos do ciclo de vida de cada sistema ou equipamento. Como pode ser visto na Figura 01, cada estratégia de manutenção passa a ser utilizada de forma integrada com as demais, tirando vantagem dos pontos fortes de cada uma e minimizando os seus ônus.

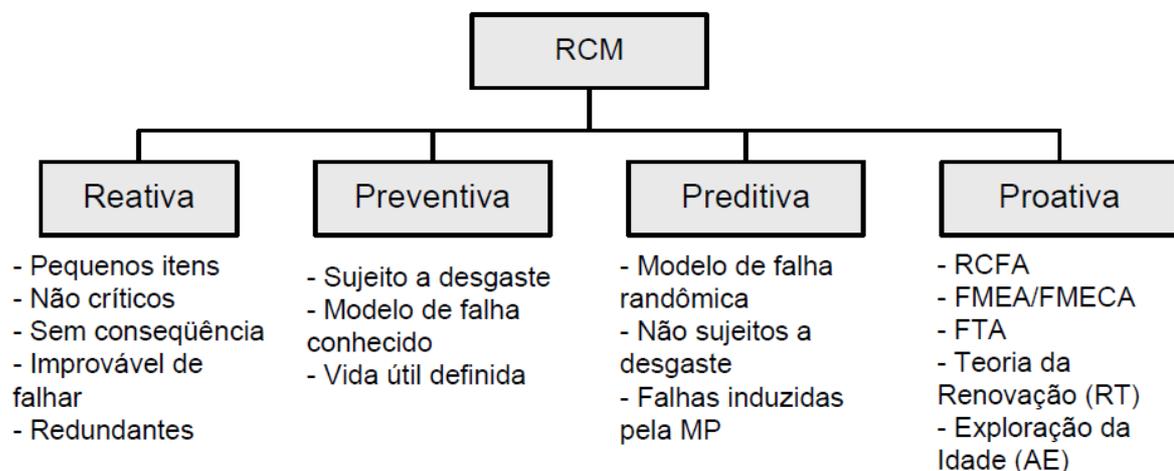


Figura 01: Componente de um programa de RCM. Fonte: Seixas, 2006.

O presente estudo já apresentou a função manutenção, com sua evolução e técnicas mais difundidas, o objetivo principal desta parte de revisão bibliográfica é fundamentar os parâmetros que devem ser monitorados neste sistema. Devido à importância operacional do equipamento de estudo, é de total interesse da organização que o RCM seja otimizado e gerido da melhor forma possível, tendo como pilar técnicas de manutenção preditiva. Foram apresentadas as necessidades

de monitoramento que a operação de um compressor possui, como pode ser visto no Quadro 2, sendo estas a motivação para o desenvolvimento desta arquitetura de monitoramento. No entanto, para completar a revisão da literatura necessária para o embasamento teórico do presente trabalho, é necessária a realização de um estudo voltado para os compressores.

2.5 – Máquinas de Fluido

O equipamento alvo do estudo deste trabalho é um turbocompressor centrífugo de 2 estágios e enquadra-se no grupo de máquinas de fluido, por isso serão apresentados os principais conceitos deste grupo de equipamentos, posteriormente, será apresentado um estudo mais aprofundado dos compressores, suas principais características, seus aspectos construtivos e funcionais.

As máquinas de fluido conforme já foi mencionado na definição do item 2.1.3, são equipamentos que possuem a característica de fornecer ou extrair energia de um fluido de trabalho, uma forma de classificá-las pelo seu tipo de transformação energética é utilizar essa definição, podendo ser uma Máquina de Fluido Geratriz (Geradora) ou uma Máquina de Fluido Motriz (Motora). (HENN, 2006)

2.5.1 – Máquina de Fluido Geratriz

De acordo com Henn (2006), quando ocorre aumento do nível energético de um fluido através da transformação da energia mecânica provinda do movimento de um eixo ou de um pistão, trata-se de uma Máquina de Fluido Geratriz (Geradora). Nas máquinas geratrizes o trabalho é executado sobre o fluido. São exemplos de equipamentos desse grupo de máquinas de fluido.

- Bombas: centrífugas, axiais;
- Ventiladores: radiais, axiais;

- Compressores: centrífugos, axiais, etc.

2.5.2 – Máquina de Fluido Motriz

Ainda de acordo com Henn (2006), quando energia mecânica é produzida através da redução do nível energético de um fluido, trata-se de uma Máquina de Fluido Motriz (Motora). Nas máquinas motoras o trabalho é produzido pelo fluido sobre o eixo mecânico ou pistão. Exemplificam-se abaixo alguns equipamentos desse grupo de máquinas de fluido.

- Turbinas: turbinas a vapor, turbinas a gás, turbinas hidráulicas em geral (Francis, Kaplan, Pelton, etc.);
- Motores: de pistões, de palhetas, etc.

Existe, contudo, outra forma de classificar os tipos de máquinas de fluido existentes, além do tipo de transformação energética que ocorre, pode-se levar em consideração a forma como ocorre a transformação energética.

2.6 – Tipos de Máquinas de Fluido

Para Henn (2006), ainda é possível classificar as máquinas de fluido levando em conta o seu funcionamento, ou seja, como o trabalho é executado durante a operação do equipamento. Existem dois tipos principais de máquinas de fluido de acordo com esse critério, as máquinas de deslocamento positivo e as máquinas de fluxo.

Ainda de acordo com Henn (2006), uma diferença interessante ao se comparar esses dois conjuntos de máquinas de fluido, está ao fazer a suposição que, quando ocorre uma falha, elas irão se comportar de maneira distinta. Ao se desconsiderar a troca de calor com o meio ambiente e possíveis folgas entre as

partes fixas e móveis, as máquinas de deslocamento positivo quando deixam de funcionar, o fluido de trabalho no seu interior permanecerá, indefinidamente, no estado em que se encontrava no momento em que o movimento cessou e este poderá ser completamente diferente das condições do ambiente externo. Na mesma situação, o fluido de trabalho de uma máquina de fluxo assumirá, imediatamente, as condições ambientais, quando ela deixar de operar.

2.6.1 – Máquinas de Deslocamento Positivo

Para esse tipo de equipamento, também chamado de estático ou volumétrico, uma quantidade fixa do fluido de trabalho é confinada na máquina e submetida a compressões sucessivas. Essas compressões ocorrem em razão da variação do volume em que o fluido de trabalho se encontra, isto é, o fluido é obrigado a mudar o seu estado energético pelo deslocamento de uma fronteira em movimento. (HENN, 2006)

Algumas características marcantes que se pode listar das máquinas de deslocamento positivo:

- funcionam, normalmente, com média e baixa rotação;
- o projeto e as características construtivas são relativamente mais simples;
- funcionam com altas e muito altas pressões de trabalho;
- operam eficientemente com fluidos de viscosidade elevada;
- trabalham com vazão intermitente.

2.6.2 – Máquinas de Fluxo

Neste tipo de equipamento, comumente chamado de máquinas dinâmicas, o fluido de trabalho não está sendo confinado por nenhuma fronteira, ao contrário, está num fluxo contínuo através da máquina, sendo submetido ao trabalho devido a trocas de energia por efeitos dinâmicos. (HENN, 2006)

Nas máquinas dinâmicas a energia transferida é quase que exclusivamente cinética, através da aceleração do fluido entre as pás do rotor.

Algumas características marcantes que se pode listar das máquinas de fluxo:

- Geralmente trabalham com alta rotação;
- funcionam com médias e baixas pressões de trabalho;
- não operam eficientemente com fluidos de viscosidade elevada;
- trabalham com vazão contínua;
- o projeto e as características construtivas são relativamente complexos.

Ambos os tipos de máquinas podem apresentar uma subdivisão em máquinas hidráulicas e máquinas térmicas. Este critério para classificá-las leva em conta a massa específica do fluido de trabalho. Quando não ocorre variação nesta propriedade, o equipamento geralmente é denominado máquina hidráulica. No entanto, se a variação for considerada significativa, esta é denominada máquina térmica. (BRASIL, 2006)

2.7 – Campo de Aplicação

O campo de aplicação abrangido pelos diferentes tipos de máquina de fluido é tão amplo e sujeito a regiões de superposição, que, em muitas situações, é difícil definir qual equipamento é mais indicado para determinada aplicação. Há situações em que a escolha para a melhor solução de um projeto esbarra em questionamentos sobre qual equipamento será o mais adequado, podendo-se optar por uma máquina de deslocamento positivo ou uma máquina de fluxo, como exemplo. No entanto, o oposto também poderá acontecer, em que um equipamento se mostra tão superior nas em determinado campo de aplicação que sua escolha pode ser feita já nas primeiras etapas de projeto (HENN, 2006).

Voltando para o estudo dos compressores, que geralmente são caracterizados por sua pressão de descarga e sua vazão de gás aspirado, pode-se observar na Figura 02 que existe uma supremacia dos compressores axiais e

centrífugos para regiões de grandes vazões, principalmente para situações que exijam a maior relação possível entre potência de propulsão e o peso do equipamento, como nos motores de avião. (HENN, 2006)

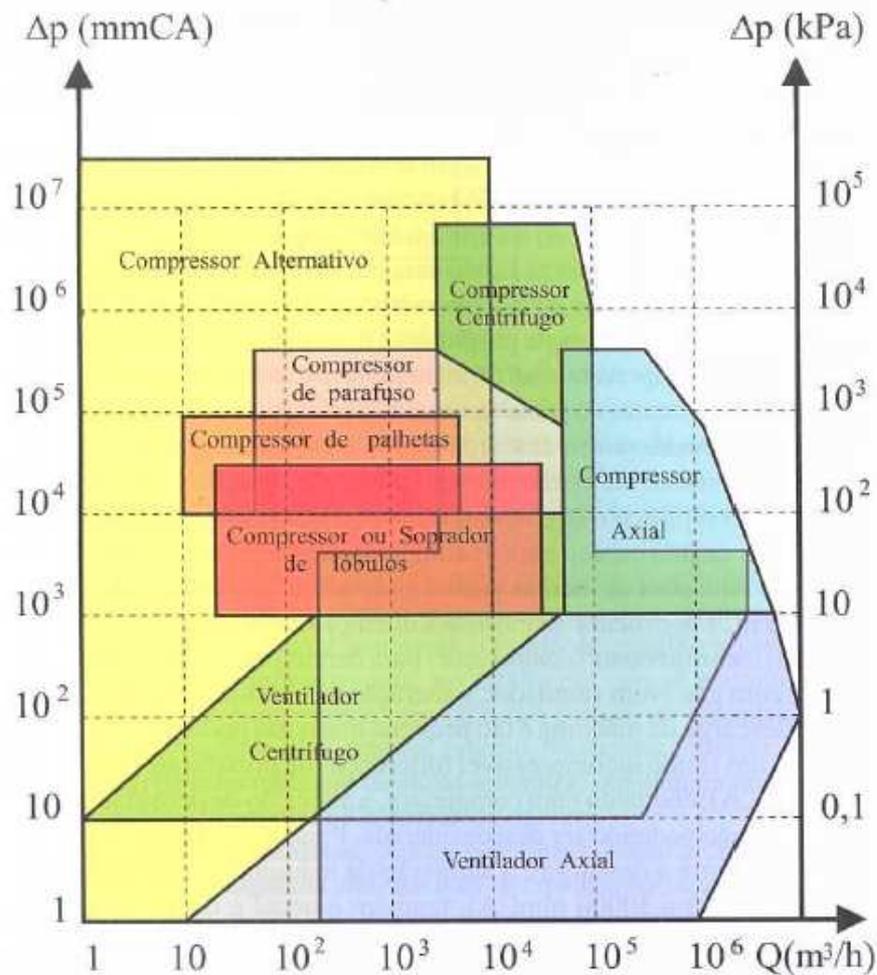


Figura 02: Campo de aplicação de ventiladores e compressores. Fonte: HENN, 2006 – Máquinas de Fluido

Deve-se atentar para a distinção entre os termos ventilador e compressor presentes na Figura 02. O ventilador é um caso típico de máquina de fluxo, porém é considerado uma máquina hidráulica, pois a variação da massa específica do fluido de trabalho é insignificante, considerada em muitas situações como constante. Já o compressor, é uma máquina de fluxo considerada, também, como uma máquina térmica, pois ocorre variação na massa específica do fluido de trabalho. (HENN, 2006)

2.8 – Turbomáquinas

De acordo com Mecabô (2007), as turbomáquinas, constituem-se na associação entre dois campos de aplicação das máquinas de fluido, seja entre as turbinas e as bombas ou turbinas e os compressores. Tratam-se de máquinas rotativas que permitem a transferência de energia entre fluido e o rotor, caracterizando-se, devido a este fato, como máquinas de fluxo. Existe uma infinidade de tipos construtivos destinadas às mais diversas aplicações industriais, no entanto, o presente trabalho não irá se ater em apresentar cada tipo construtivo pois será feito um estudo mais aprofundado dos compressores, que abrangerá satisfatoriamente grande parte deste grupo de máquinas fluxo.

2.9 – Compressores

Com o conceito de máquinas de fluido compreendido e, apresentado as principais formas de classificação desse grupo de máquinas, pode-se iniciar um estudo mais aprofundado sobre os compressores, tema alvo deste trabalho e, também, considerado um dos equipamentos mais importantes para a operação das plantas petroquímicas.

De acordo com Mecabô (2007), são equipamentos que transferem a energia recebida do meio externo (normalmente um motor ou turbina) ao fluido veiculado visando aumentar seu estado de energia interna.

2.9.1 – Tipos de Compressores

Por se tratar de um grupo de máquinas de fluido, sua classificação é similar à encontrada para estas, sendo assim basta-se mencionar que os compressores também se dividem em Compressores de Deslocamento positivo, conhecidos como

compressores volumétricos e compressores de fluxo, também conhecidos como compressores dinâmicos ou Turbos.

No entanto, esses dois grupos de compressores também apresentam divisões, que levam em conta características construtivas e o processo de compressão no interior do equipamento. Para facilitar a compreensão dessas divisões e a visualização subgrupos existentes, observe a Figura 03.

Não é do escopo deste trabalho apresentar todas as particularidades de cada grupo e subgrupo dos compressores, sendo assim, apenas serão apresentadas as duas divisões dos compressores volumétricos, os chamados compressores alternativos e rotativos, com suas principais características. Posteriormente, será apresentado o grupo dos compressores Turbo (Dinâmicos) e o subgrupo dos compressores axiais, pertencentes ao mesmo grupo dos compressores centrífugos, alvo deste estudo. Para os compressores centrífugos será apresentado um estudo mais detalhado sobre suas principais características, suas particularidades construtivas e sua manutenção.

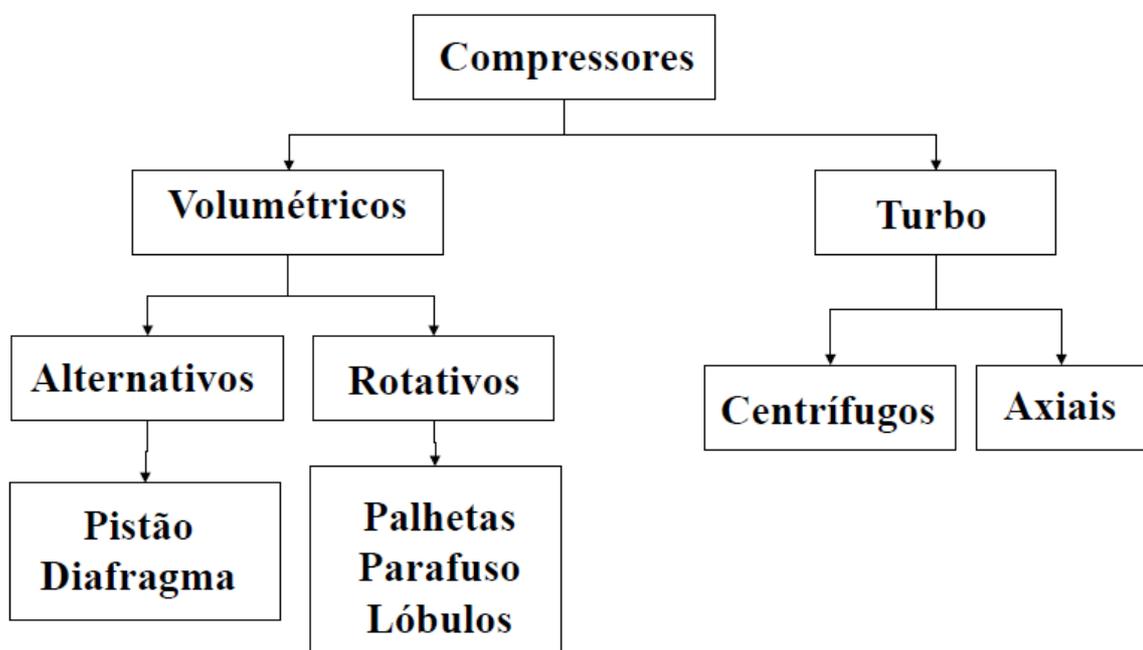


Figura 03: Classificação dos Tipos de Compressores. Fonte: VALADÃO, 2002 – UN-RIO / ATP-MLS / TBM – Compressores Centrífugos

2.9.1.1 – Compressores Volumétricos

Nos compressores do tipo volumétrico, o processo de compressão do fluido de trabalho dá-se num espaço confinado, definido na fase de projeto do equipamento, cujo volume é reduzido por ação mecânica, podendo ser através do movimento de um êmbolo (para os compressores alternativos) ou de engrenagens, palhetas e lóbulos (para os compressores rotativos), a cada ciclo. (MECABÔ, 2007)

Devido à questão de operar com a compressão em um espaço confinado, esse grupo de compressores possui uma capacidade constante, mesmo quando opera com diferentes pressões de descarga. Deve-se, também, considerar o processo executado por essas máquinas como intermitente, no qual a compressão propriamente dita é efetuada em sistema fechado, isto é, sem qualquer contato com a sucção e a descarga. (VALADÃO, 2002)

É importante ressaltar que a capacidade de um compressor é a taxa de fluxo em volume de gás comprimido e liberado referido às condições de pressão, temperatura e composição do gás na sucção do compressor. (BRASKEM – Manual de Operação, 2013).

2.9.1.1.1 – Compressores Alternativos

Nos compressores alternativos, um sistema de transmissão biela-manivela torna o movimento rotativo de um motor de acionamento, em movimento retilíneo alternativo de um êmbolo ou de um pistão. (HENN, 2006)

De acordo com Mecabô (2007 apud Juliani, 2003), estes compressores diferenciam-se dos compressores dinâmicos (centrífugos e axiais) por serem capazes de atingir altas taxas de compressão em contraposição a uma vazão mais limitada e a um fluxo pulsante. Embora os compressores alternativos exijam um maior espaço físico para a sua instalação, eles apresentam algumas vantagens em relação aos compressores dinâmicos.

- Menores custos de aquisição e manutenção (em relação à mão-de-obra especializada e logística);
- Maior simplicidade operacional;
- Maior flexibilidade em termos de capacidade e razão de compressão;
- Menor sensibilidade a variações nas condições do gás veiculado;
- Geralmente não requerem sistemas de refrigeração separados.

2.9.1.1.2 – Compressores Rotativos

São compressores nos quais um elemento rotativo deslocará um volume fixo a cada ciclo do sistema, ou seja, a cada rotação. É considerado o grupo de compressores mais econômico entre todos, sendo, também, considerados muito silenciosos e de manutenção mais prática. Muitas vezes, são comparados aos compressores alternativos, visto que pertencem ao mesmo grupo de compressores de deslocamento positivo, levando vantagens devido à sua compressão contínua que dispensa o uso de muitas partes móveis. (HENN, 2006)

- Menores custos de aquisição e manutenção (em relação à mão-de-obra especializada e logística);
- Baixos Níveis de Vibração;
- Tamanho reduzido para mesmos níveis de vazão;
- Podem ser usados como compressores ou bombas de vácuo;
- Fluxo contínuo.

2.9.1.2 – Compressores Turbos (Dinâmicos)

Os compressores dinâmicos podem ser descritos como sendo aqueles em que o aumento da energia do fluido de trabalho não se dá por redução do volume, e sim, através ação dinâmica de palhetas ou impulsores rotativos (conhecidos como impelidores), que imprimem velocidade ao fluido de trabalho e, posteriormente, através da ação do difusor, elevam a pressão do gás variando a velocidade do mesmo. Nesta categoria estão incluídos os compressores centrífugos e os axiais. (VALADÃO, 2002)

O acionamento desse tipo de equipamento pode ser feito por meio de turbinas a vapor ou a gás ou, ainda, através de motores elétricos. Estes equipamentos são indicados para trabalhar com grandes volumes, e, geralmente, a médias razões de compressão (RC) (relação entre a pressão de descarga e a pressão de sucção). (VALADÃO, 2002)

O princípio construtivo dos compressores dinâmicos envolve a utilização de dois componentes mencionados anteriormente: impelidor e difusor. O impelidor é um componente rotativo que está munido de pás que impelem ao gás energia cinética e energia de pressão, como pode ser observado na Figura 04. Posteriormente, o fluxo contínuo de gás é direcionado ao difusor, componente fixo cuja função é promover a transformação da energia cinética, fornecida ao gás pelo impelidor, em aumento de entalpia, com conseqüente aumento da pressão. (NÓBREGA, 2008)

Caso o aumento de pressão ocorrido seja suficiente para vencer a pressão reinante à saída do difusor em qualquer estágio, a operação do compressor é normal, ou seja, o fluxo de gás continua em seu sentido “correto” até a descarga final para a tubulação de processo. (JULIANI, 2003)

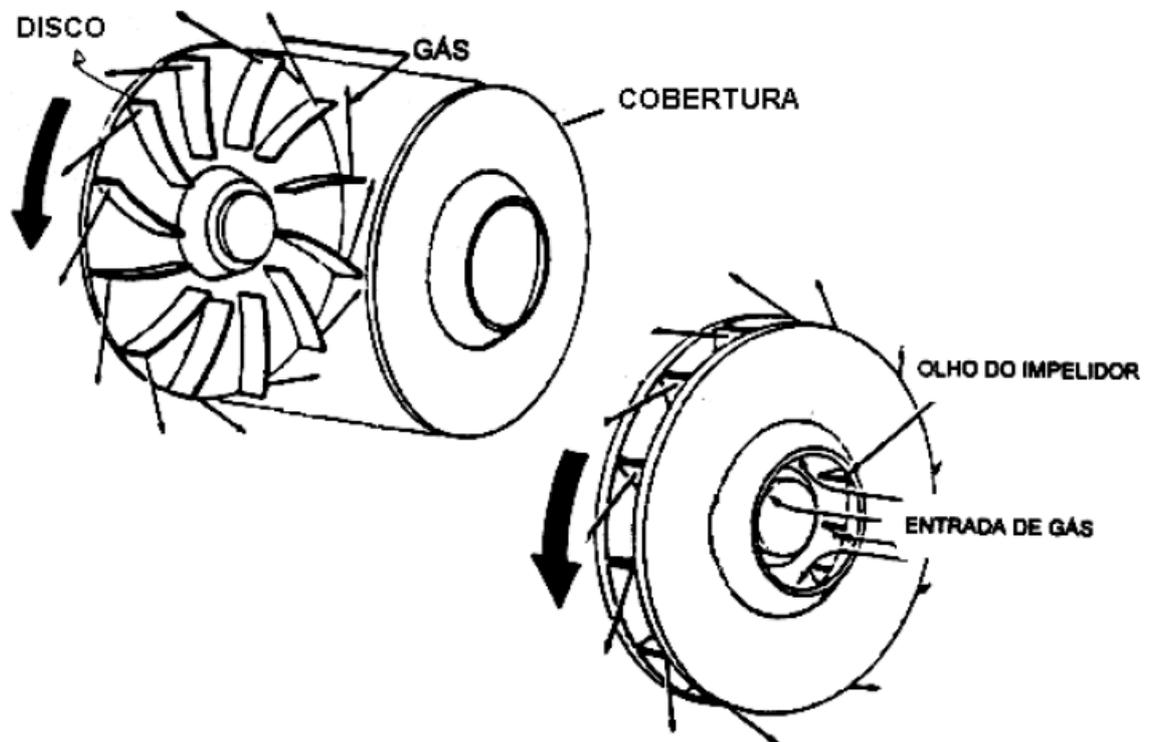


Figura 04: Ilustração de um Impelidor. Fonte: VALADÃO, 2002 – UN-RIO / ATP-MLS / TBM – Compressores Centrífugos

Os compressores dinâmicos efetuam o processo de compressão através de um fluxo contínuo, ver Figura 05, com a passagem extremamente rápida do gás pelo seu interior. Assim, pode-se dizer que esta é uma compressão adiabática, ou seja, sem troca com o ambiente. De fato, ocorre uma pequena troca, pois a carcaça aquece consideravelmente e está em contato com a atmosfera, mas a troca por unidade de massa pode ser considerada desprezível devido à vazão ser elevada para essas máquinas. (NÓBREGA, 2008)

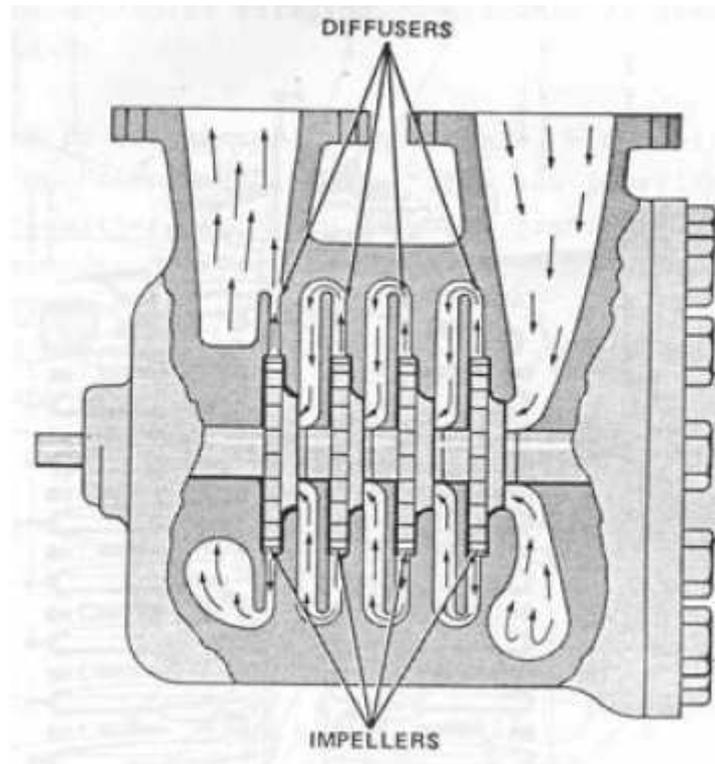


Figura 05: Fluxo do gás dentro de um compressor centrífugo. Fonte: DRESSER-RAND, 2001

Podem-se listar algumas vantagens que os compressores dinâmicos têm em relação aos compressores volumétricos, são elas:

- Menor custo de instalação - devido aos menores esforços e vibrações, as fundações não necessitam ser tão grandes e estruturadas como para os alternativos;
- Menor custo de manutenção;
- São mais otimizados do ponto de vista de espaço ocupado, ou seja, para uma mesma capacidade, ocupam menos espaço que os compressores volumétricos;
- Possuem maior eficiência para Razão de Compressão (RC) < 2.

2.9.1.2.1 – Compressores Axiais

São compressores em que o sentido do fluxo do gás é paralelo ao eixo do rotor do compressor. Os compressores axiais diferenciam-se dos centrífugos não só pelo sentido predominante do fluxo de trabalho (que nos centrífugos predomina o fluxo radial), mas também pela vazão e pressão de trabalho utilizada nestes tipos de máquinas. Outra diferença ocorre para o acionamento majoritário pelas turbinas a gás, particularmente, as de maior capacidade. (JULIANI, 2003)

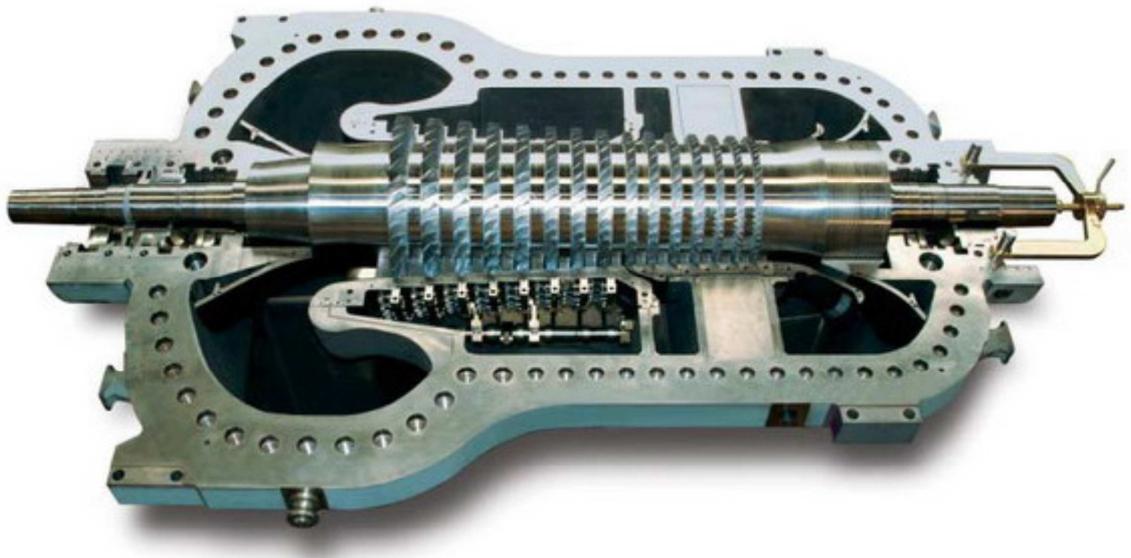


Figura 06: Compressor axial aberto – 15 estágios. Fonte: GE, 2015

Em comparação com os compressores centrífugos, os compressores axiais apresentam taxas de compressão menores, em compensação, nestes últimos as vazões de trabalho são bem maiores. Geralmente estes tipos de compressores são construídos com múltiplos estágios, sendo assim, costumam apresentar entre 8 e 16 estágios, a Figura 06 apresenta um típico compressor axial com 15 estágios. Apresentam, ainda, a característica de serem mais sensíveis às variações de fluxo, ou seja, pequenas variações de vazão podem produzir elevadas variações de pressão (JULIANI, 2003)

- Vazões entre 20 e 400 mil pés cúbicos por minuto (ICFM);
- Possuem eficiência maior que os compressores centrífugos para mesmas condições de funcionamento;
- Menores dimensões podendo ser aplicado em mais setores e requerem menores fundações;
- Alto investimento inicial mas que pode ser compensado pela economia operacional;
- Possuem um “range” de estabilidade mais estreito que os compressores centrífugos, característica para compressores sensíveis as pequenas variações de vazão.

2.9.1.2.2 – Compressores Centrífugos

Conforme mencionado anteriormente, os compressores centrífugos são o alvo deste estudo, serão apresentadas as principais considerações a este tipo de equipamento neste momento, que apresenta uma vasta aplicação em todas as áreas industriais.

Os compressores centrífugos também são chamados de compressores radiais, devido ao sentido tomado pelo fluido de trabalho no interior do equipamento. Sendo assim, tais compressores se caracterizam pela sucção possuir um escoamento paralelo ao eixo do rotor e a descarga apresentar escoamento perpendicular ao mesmo. (VALADÃO, 2002)

Os compressores centrífugos são os mais adequados quando se precisa trabalhar numa faixa mais ampla de fluxo mássico (variável). Este tipo de compressor é mais adequado para baixas e médias pressões, as razões de compressão variam de 3 a 4,5 por estágio. (VALADÃO, 2002)

Estes compressores podem ser construídos com muitas configurações diferentes, podendo ser um compressor de um simples estágio, observar a Figura 07, ou chegando até configurações de dez estágios em série, o que permite a amplificação da razão de compressão. Tradicionalmente, os compressores

centrífugos eram construídos com um estágio apenas, com um impelidor e um difusor. (MECABÔ, 2007)

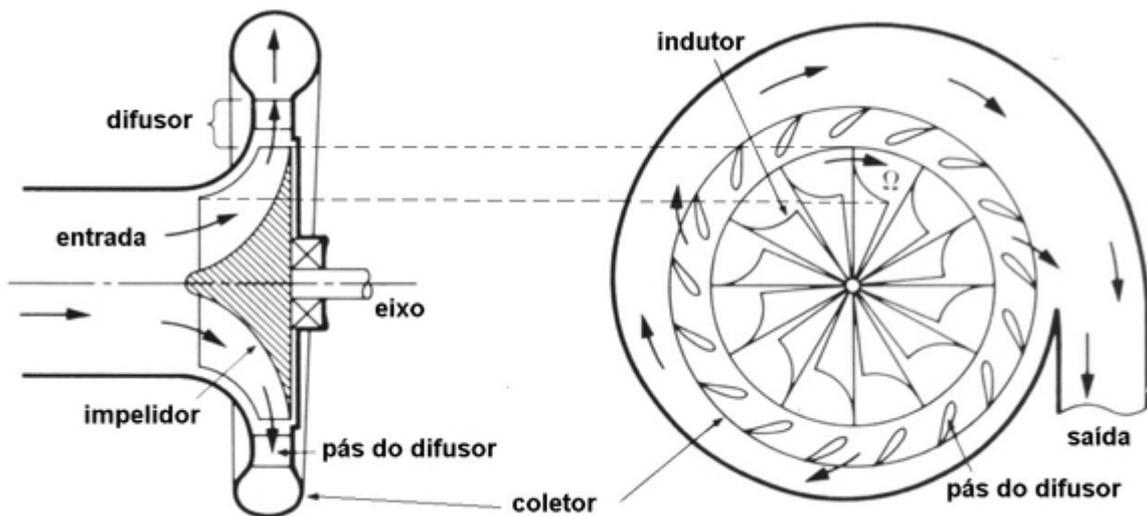


Figura 07: Compressor centrífugo de um estágio. Fonte: Canal Piloto, 2015

2.9.1.2.2.1 – Formas Construtivas

Além de serem caracterizados pelo número de estágios existentes, existem três configurações básicas usadas em compressores centrífugos, baseando-se na linha de corte de sua carcaça: cortados na horizontal, observar a Figura 08; na vertical, Figura 09. Esses compressores também conhecidos como tipos M e B, respectivamente, e, ainda possui, um terceiro tipo, o gear type.

As carcaças de compressores centrífugos com bipartições horizontais são mais comuns, tendo como maior benefício a facilidade para a realização de intervenções durante as operações de manutenção. Entretanto, sua maior região de selagem, torna-as mais vulneráveis a possíveis vazamentos. Esta configuração, geralmente, é utilizada em compressores com menores níveis de pressão e com gases que apresentem maior peso molecular. Entre as vantagens deste tipo de máquina, podem-se citar: menor custo de manutenção, melhor acesso aos componentes internos, maior facilidade de montagem, etc. Entretanto, estas vantagens só se fazem presentes quando os bocais de sucção e descarga estão

voltados para baixo, daí a razão da grande maioria destas máquinas apresentar tal configuração. (NÓBREGA, 2008)

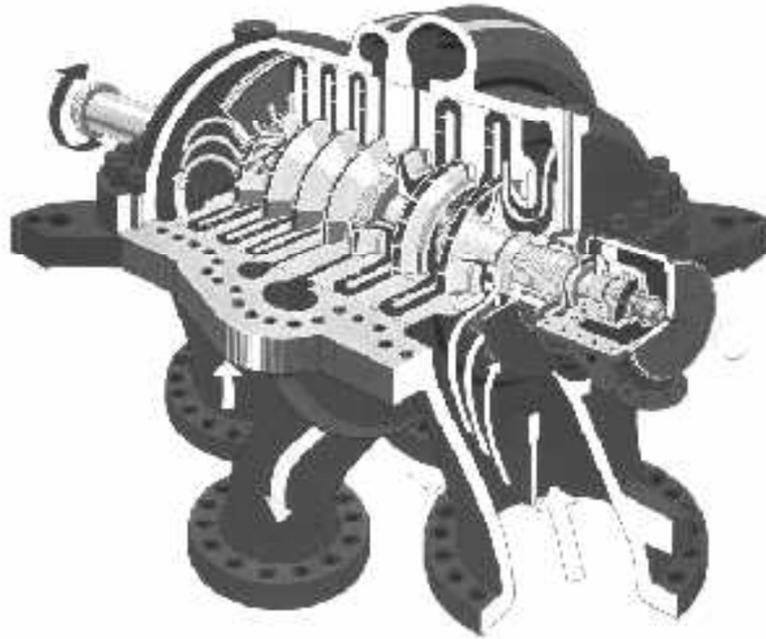


Figura 08: Carcaça de compressor centrífugo com corte horizontal. Fonte: Juliani, 2003

Para Brown (2005), as máquinas cortadas na vertical, também conhecidas como barril, observar Figura 09, possuem duas carcaças: a externa, acondicionando todo o conjunto, e a interna, acondicionando o jogo de diafragmas. A carcaça dividida verticalmente oferece melhores condições de vedação, não só pela menor seção de selagem, mas, também, por estar sujeita a menores tensões. Podem-se citar algumas vantagens desta configuração: podem operar com maiores níveis de pressão, podem operar com gases de menor peso molecular; menores possibilidades de vazamento e etc. Como desvantagens, podem-se citar: a dificuldade para a remoção da carcaça interna; mais suscetíveis a erros quanto à distribuição de folgas axiais (overlap) e em carcaças maiores, o peso total do pacote interno pode ser um problema para a manutenção, caso seja preciso retirá-lo.

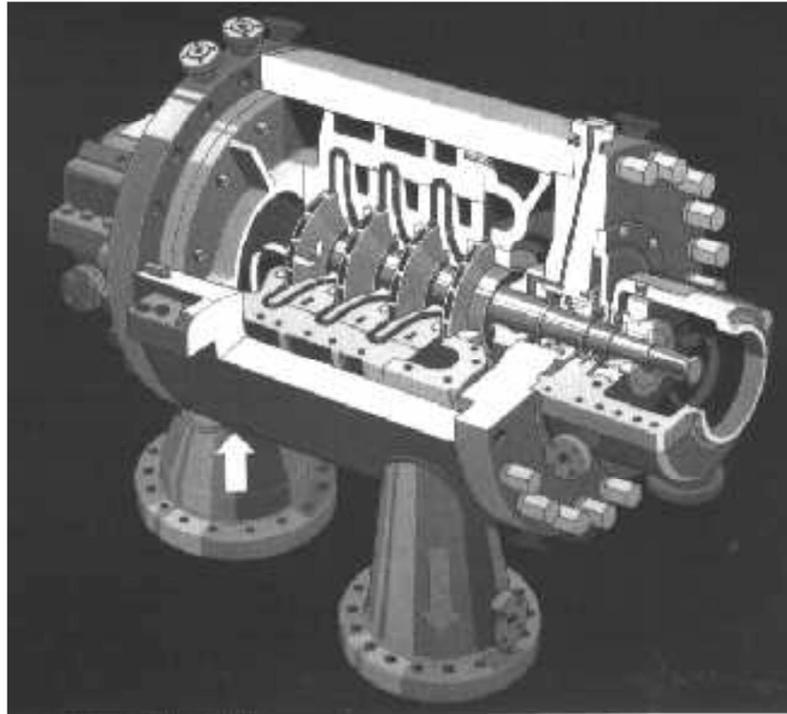


Figura 09: Carcaça de compressor centrífugo com corte vertical Fonte: Juliani, 2003

A última configuração disponível para os compressores centrífugos é denominada “Gear Type”, é possível observar um exemplo na Figura 10. Estes também são conhecidos como “integrally geared centrifugal compressor”, foram inicialmente desenvolvidos e patenteados pela Mannesmann DEMAG em 1949. Estes compressores são constituídos por uma engrenagem motriz de baixa rotação (coroa) que aciona duas ou mais engrenagens de alta rotação (pinhões) montadas em eixos em cujas extremidades localizam-se rodas de compressor.

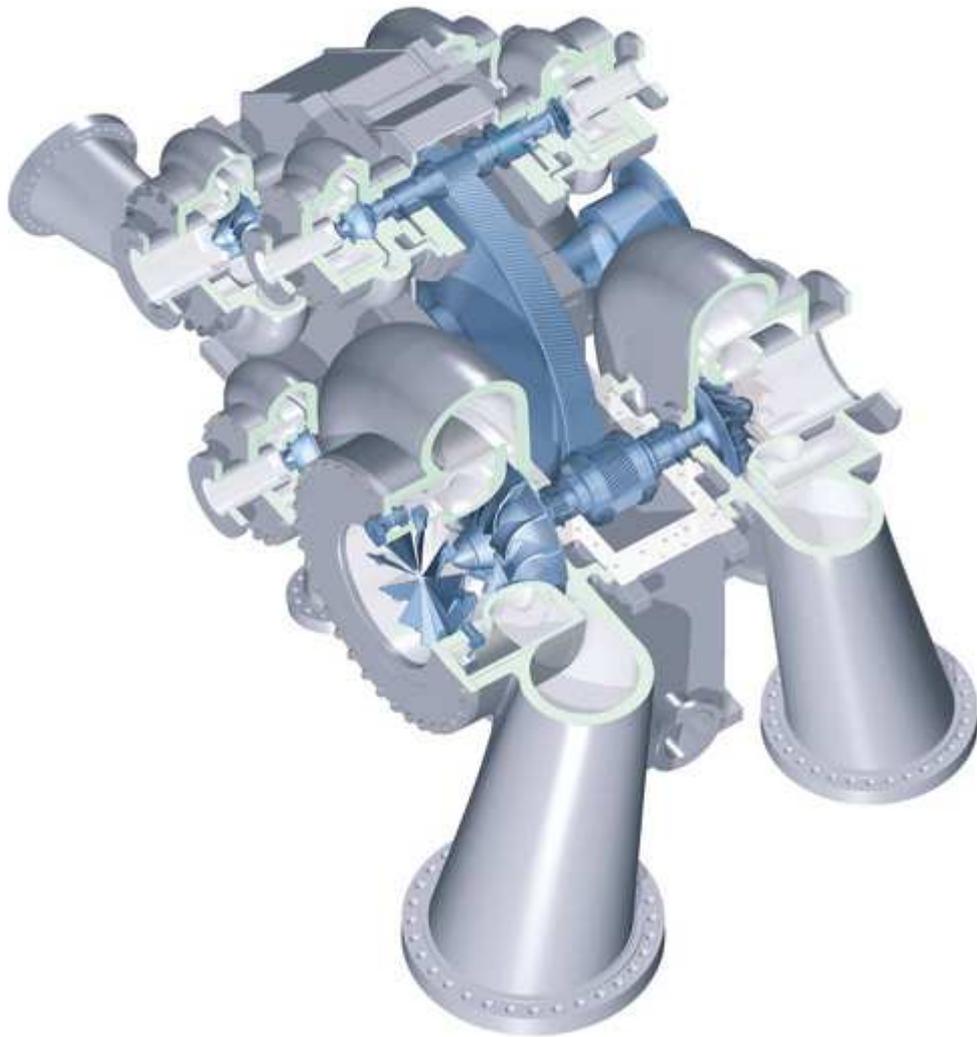


Figura 10: Carcaça de compressor centrífugo “Gear Type”. Fonte: Siemens, 2015

Este tipo de configuração apresenta características bastante interessantes, entre as quais podem-se citar:

- tamanho compacto;
- resfriamento após cada estágio (melhor rendimento);
- possibilidade de controle individual para cada estágio;
- baixo custo comparativo;
- alta confiabilidade.

2.9.1.2.2 Principais Componentes e Sistemas dos Compressores Centrífugos

Os principais elementos aerodinâmicos de um compressor centrífugo podem ser observados na Figura 11, estes se resumem a: o bocal de entrada na sucção, as palhetas-guia da entrada (fixas ou móveis), os impelidores do eixo rotor, os diafragmas (no caso de mais de um estágio) com os difusores radiais e os canais de retorno (com ou sem palhetas-guia fixas), a voluta coletora e o bocal de descarga. Os impelidores, que podem ser fechados ou abertos, são montados sobre o eixo do rotor e isolados entre si por meio de selos labirinto interestágio, que são buchas com lâminas circunferenciais que apresentam folga mínima em relação ao eixo, formando câmaras de expansão do gás que minimizam sua fuga, fixados normalmente aos diafragmas no caso da configuração multiestágios. (MECABÔ, 2007)

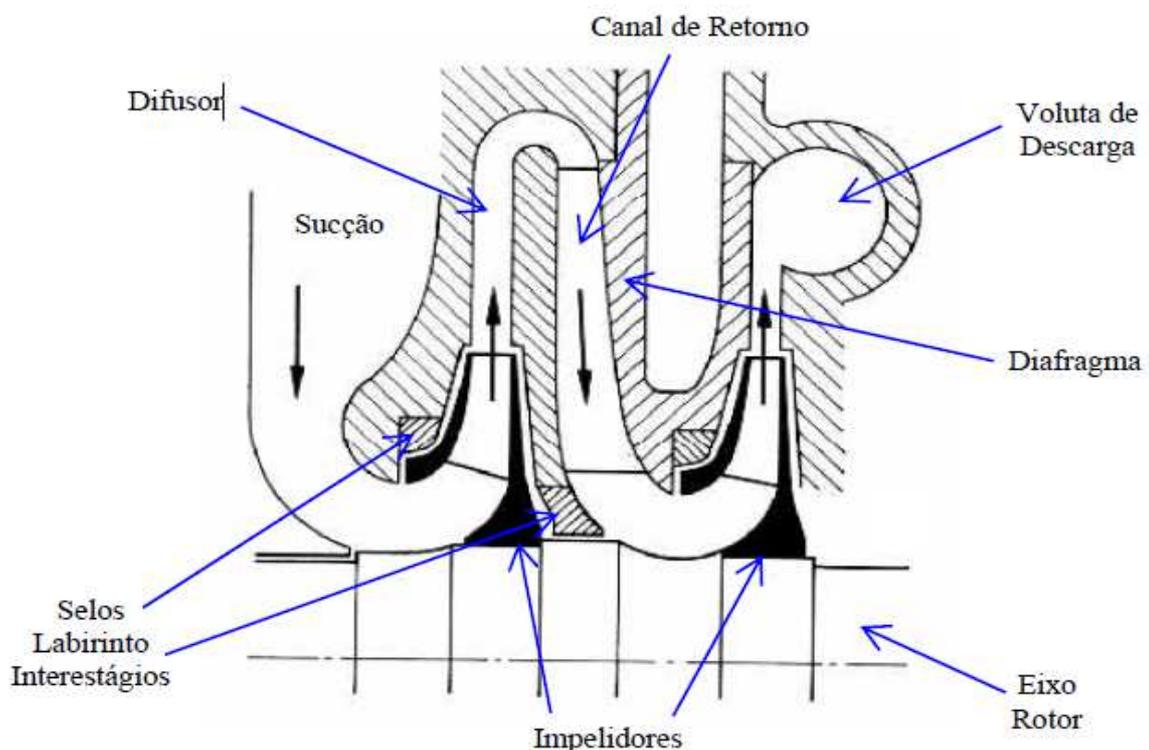


Figura 11: Fluxo Interno de gás em um compressor centrífugo de dois estágios em corte longitudinal. Fonte: Mecabô, 2007

A selagem externa (shaft end) também pode ser por meio de “labirintos”, selos mecânicos com anéis de carvão flutuantes ou ainda os selos de gás seco (dry gas seals) que dispensam o uso de óleo de selagem utilizando gás de barragem (o compressor de estudo utiliza este sistema de selagem e usa o Nitrogênio como gás de barragem). Os danos que podem ocorrer à selagem vão depender do tipo de sistema de selagem utilizado, os que são originados por contato mecânico têm como principal causa vibrações anormais do eixo (JULIANI, 2003).

Existem ainda os selos do tambor de balanceamento, este componente deve ser utilizado em carcaças de compressores em que as características construtivas permitam a existência de forças axiais. Carcaças que possuam a sucção pela extremidade e a descarga pelo meio ou vice-versa, dispensam este componente, como pode ser visto na Figura 12. Esta construção facilita a distribuição das cargas dinâmicas do equipamento, como a pressão de descarga é maior que a sucção, este delta de pressão tende a “empurrar” o conjunto rotativo na direção da sucção. Com a distribuição da sucção / descarga, as forças se anulam. (BRASKEM, 2015)

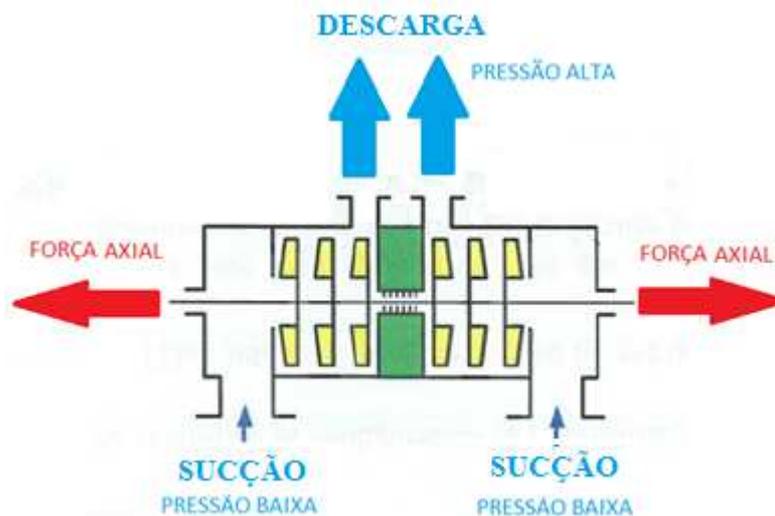


Figura 12: Carcaça de compressor com sucção pelas extremidades e descarga central. Fonte: Braskem – IT_1-GB-201_Tambor de Balanceamento, 2015

Para as carcaças com sucção e descarga nas extremidades, todos os rotores são alocados em um mesmo lado, “empurrando” o conjunto rotativo para uma única direção, observar a Figura 13.

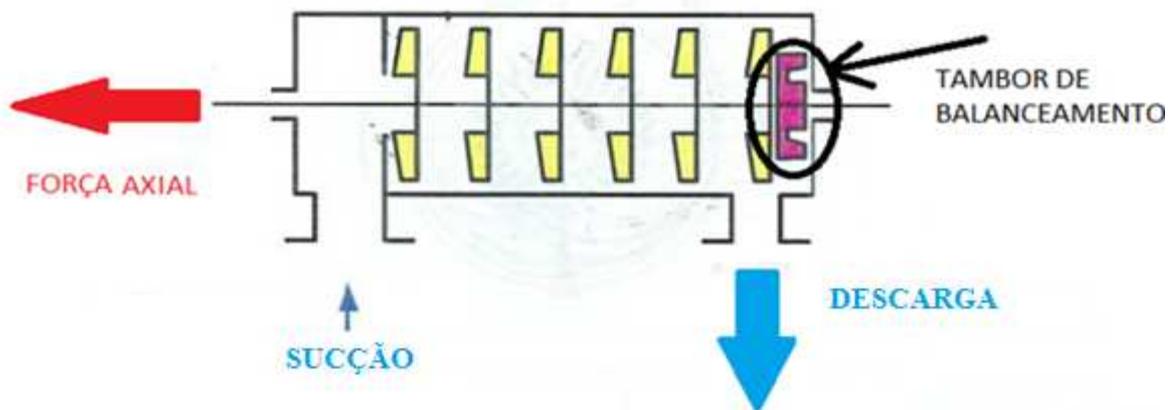


Figura 13: Carcaça com sucção e descarga nas extremidades. Fonte: Braskem – IT_1-GB-201_Tambor de Balanceamento, 2015

Por esta razão, compressores que apresentam essa configuração necessitam deste componente, sendo ele o responsável por dar equilíbrio ao conjunto rotativo através de uma linha de gás que sai da descarga do compressor e é direcionada para uma câmara no tambor de balanceamento. Este, ao ser pressurizado, empurra o conjunto rotativo no sentido contrário ao da força axial produzida, tendendo a anular as forças e por o conjunto em equilíbrio. Uma das vantagens desse elemento é que ao ser instalado permite a seleção de mancais axiais menores, o que resulta em menores perdas de potência no eixo. (BRASKEM, 2015)

Observando o processo de compressão pelas leis da termodinâmica, percebe-se a necessidade de criação de um sistema de resfriamento e isto pode ser explicado pelo fato que qualquer processo de compressão a volume constante resultará num aumento da temperatura do gás ou mistura gasosa. Para os compressores dinâmicos, por mais que não exista um volume fixo para ser considerado constante, a compressão também resulta em aumento da temperatura. Nos casos de compressores que operam com altas taxas de compressão, esse fator torna-se crítico, podendo afetar o equipamento construtivamente e reduzir sua eficiência. (FALCO, 2009).

Para estas situações, realiza-se um processo de resfriamento do fluido de trabalho entre os estágios, podendo esse ser realizado interna ou externamente ao compressor. No resfriamento interno, os diafragmas que separam dois estágios sucessivos são providos de camisas d'água. (FALCO, 2009).

Para situações em que o resfriamento precisa ser mais eficaz, o resfriamento externo é o mais adequado e é feito em trocadores de calor chamados intercoolers. O objetivo do resfriamento é reduzir a potência e é abaixar a temperatura de descarga. Permitindo a continuidade do processo de compressão. Em comparação com compressores não resfriados, o resfriamento permite a redução do tamanho ou rotação dos impelidores, ou ainda, em compressores com menores números de estágios. A razão deste fato está em que o resfriamento, aumentando a densidade do gás, não afeta o head (o conceito de head é definido no próximo parágrafo) produzido, contudo para uma mesma relação de compressão, um menor head é necessário. (FALCO, 2009)

O head de um compressor pode ser definido como o trabalho requerido para comprimir uma unidade de massa de gás desde as condições de temperatura e pressão de sucção até a pressão de descarga (energia por unidade de peso que o compressor é capaz de ceder ao fluido a ser comprimido). (BRASKEM – Manual de Operação, 2013)

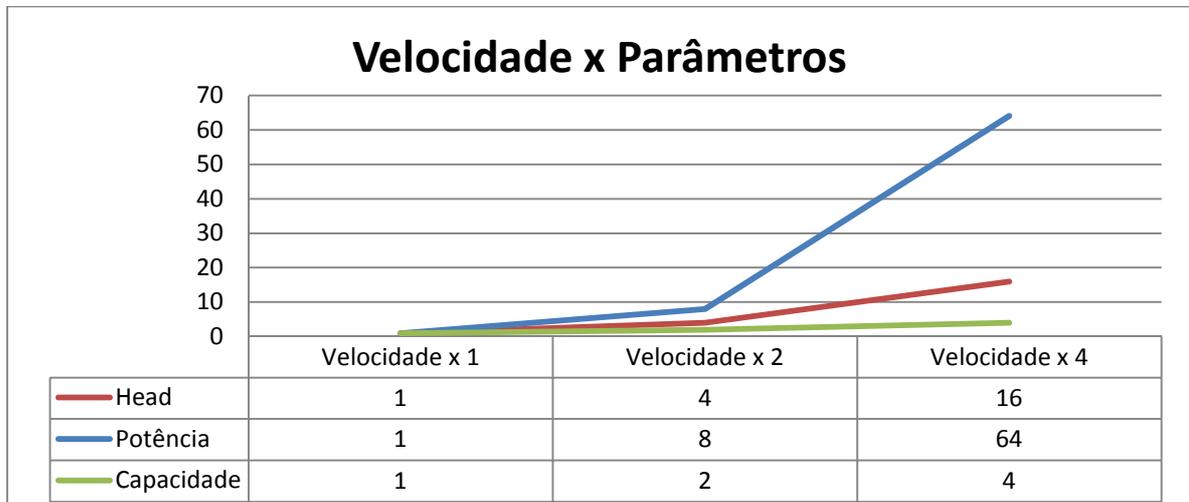
2.9.1.2.2.3 – Influência dos Parâmetros Operacionais nas Condições de Compressão

De acordo com a Braskem – Manual de Operação (2013), é possível relacionar alguns parâmetros operacionais com as condições de compressão e verificar seus efeitos diretos no estado de funcionamento dos compressores centrífugos.

- Velocidade: se a velocidade de um compressor centrífugo variar, sua capacidade variará diretamente com ela; o head deste compressor variará com o quadrado da variação velocidade e a potência, com o cubo. A eficiência é a relação entre a energia real e a energia requerida no processo de compressão, e permanecerá quase constante, mesmo para grandes variações de velocidade. Observar Tabela 01.

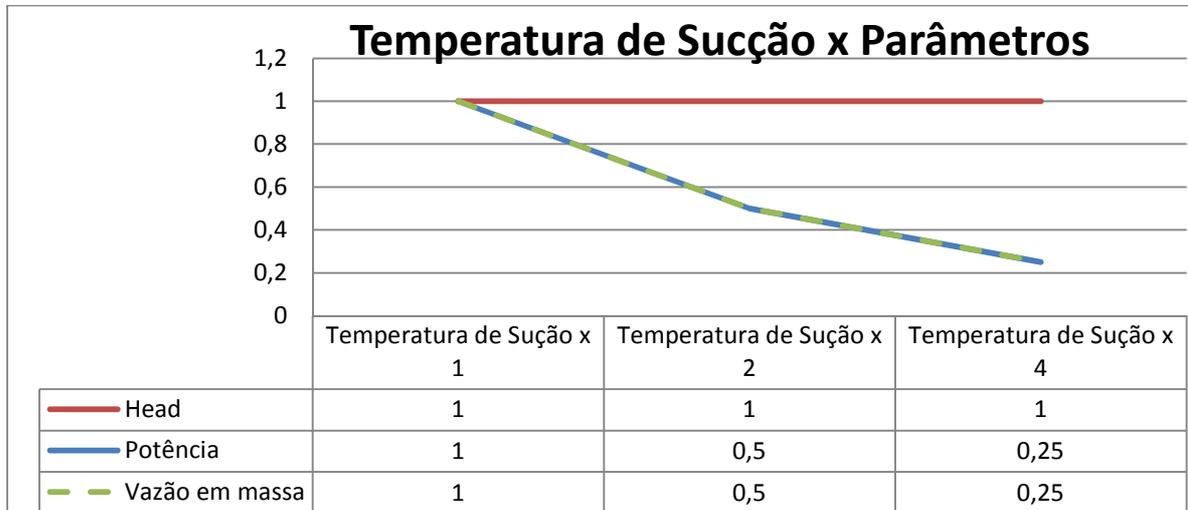
Tabela 01: Influência da Velocidade nos Parâmetros Operacionais.

Fonte: BRASKEM – Manual de Operação, 2013)



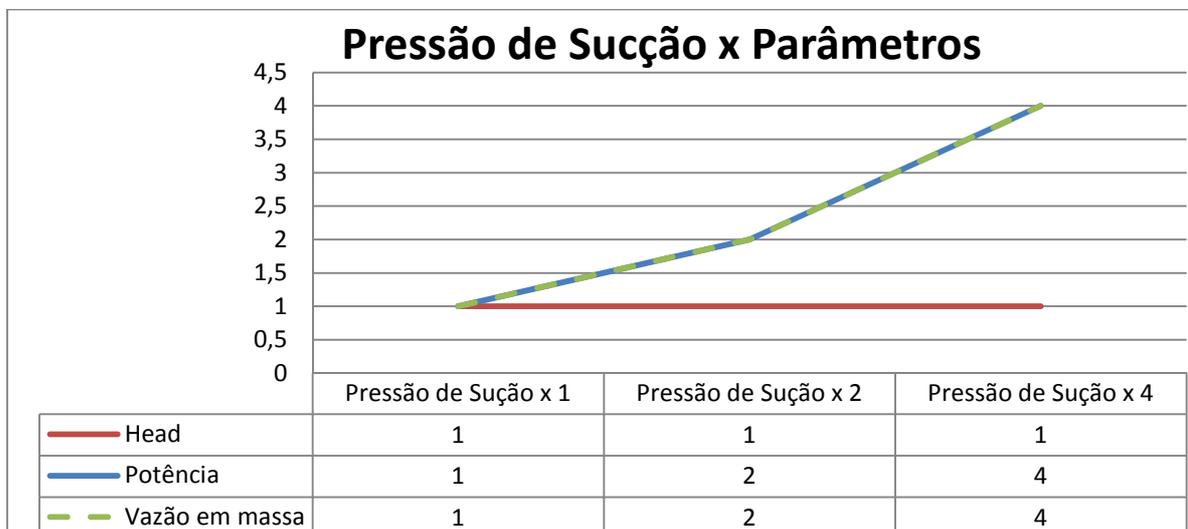
- Temperatura de sucção: se a temperatura de sucção de um compressor centrífugo variar, sob condições constantes de volume de carga, a vazão em massa para o compressor variará inversamente com a variação de temperatura absoluta da carga; o head desenvolvido é independente da temperatura; uma vez que a potência, de modo simplificado, é o produto da vazão mássica pelo head e sendo este último constante, a potência variará inversamente com a temperatura absoluta. Sendo assim, pode-se dizer que um aumento na temperatura de sucção causará menores relações de compressão, vazão em massa e potência, e maior temperatura de descarga. Observar Tabela 02.

Tabela 02: Influência da Temperatura de Sucção nos Parâmetros Operacionais. Fonte: BRASKEM – Manual de Operação, 2013)



● Pressão de sucção: se a pressão de sucção de um compressor centrífugo variar, esta variação afetará a massa específica do gás. Sob condições constantes de volume de carga, a vazão mássica variará diretamente com a pressão de sucção; o head desenvolvido é independente da pressão de sucção; para a potência será utilizada a mesma simplificação, sendo considerada o produto da vazão mássica pelo head e sendo este último constante, a potência variará diretamente com a densidade na sucção. Observar Tabela 03.

Tabela 03 : Influência da Pressão de Sucção nos Parâmetros Operacionais



2.9.1.2.2.4 – Tipos de Compressão Efetuadas em um Compressor Centrífugo

Ainda de acordo com a Braskem – Manual de Operação (2013), existem dois tipos de compressão para os compressores centrífugos, a compressão adiabática e a politrópica.

Para os compressores centrífugos, que não são resfriados internamente ou nos inter-estágios, a compressão é denominada adiabática e irreversível. Estes compressores operam com altas vazões, causando altas velocidades no gás, fazendo com que o calor cedido por unidade de massa ao ambiente seja bastante reduzido, e como as pressões de descarga para esses compressores não são muito altas (característico de compressores centrífugos), as temperaturas atingidas pelo gás também não serão muito elevadas, então, como a transferência de calor ao meio ambiente é muito pequena, praticamente desprezível, diz-se que é adiabática. (BRASKEM – Manual de Operação, 2013)

Por outro lado, as mudanças de direção, atritos e choques do gás em altas velocidades, ocasionam as perdas e são os responsáveis pela irreversibilidade, ou seja, não será possível reaproveitar a mesma quantidade de energia cedida pelo acionador com o gás no estado pressurizado (na descarga) ao ser levado para as condições de sucção. (BRASKEM – Manual de Operação, 2013)

As perdas internas (atritos e choques) causam um aumento de temperatura do gás. Quando o compressor possui resfriamento a compressão se faz com perda de calor do gás para o meio ambiente e nesse caso não é adiabática, sendo aproximado a uma transformação politrópica. A eficiência politrópica constitui a eficiência hidráulica do impelidor, independentemente do gás a ser comprimido ou das condições de serviço, sendo apenas função da vazão em volume na sucção, para uma determinada rotação. (BRASKEM – Manual de Operação, 2013)

As transformações politrópicas são características por um coeficiente "n" e a partir deste são estabelecidas as diversas correlações entre as variáveis antes e depois da compressão. (BRASKEM – Manual de Operação, 2013)

2.9.1.2.2.5 – Manutenção em Compressores Centrífugos

De acordo com Juliani (2003), os compressores centrífugos são, de um modo geral, equipamentos de elevada confiabilidade, podendo operar continuamente por longas campanhas de operação. Isto é possível graças à sua concepção mecânica relativamente simples, com, praticamente, ausência de partes móveis em contato com partes estacionárias. Pode-se, ainda, dizer que são equipamentos de tecnologia avançada que incorporam desenvolvimentos de engenharia com vistas a torná-las cada vez mais confiáveis e eficientes. Periodicamente, entretanto, dever-se-á efetuar uma revisão geral no equipamento visando à verificação detalhada de seu estado interno.

Ainda de acordo com Juliani (2003), os intervalos para execução dessa manutenção geral dependem muito das condições de operação da máquina e do gás veiculado. Se, por exemplo, o gás contiver muitos elementos contaminantes, recomenda-se a realização de inspeções mais frequentes, em prazos de 2 a 3 anos de operação, devido ao fenômeno de incrustação. Para essa tomada de decisão é recomendado que sejam analisados, periodicamente, os níveis de vibração e a eficiência do compressor. Com “gases limpos”, as campanhas de operação podem ser maiores; nesses casos, o ideal seria efetuar-se uma revisão completa a cada 5 ou 6 anos de operação para se verificar o desenvolvendo de anormalidades nas partes estacionárias.

É desejável que durante uma parada da máquina para a inspeção sejam analisados todos os itens que possam estar desenvolvendo uma anormalidade e todos os que possuam desgaste natural. Sendo algum deles os Mancais, Filtros de ar e óleo, acoplamentos, sistema de selagem, válvulas, impelidor(es) e difusor(es)

De um modo geral, os compressores apresentam no mínimo os seguintes sistemas de monitoração:

- Temperatura dos mancais radiais e axial;
- Deslocamento axial do eixo;
- Vibração de eixo;

- Proteção contra o “surge”;
- Temperaturas e pressões de trabalho do gás durante sua passagem pelo compressor

Tais sistemas devem estar funcionando adequadamente para que sejam analisadas possíveis anormalidades e para o acompanhamento do funcionamento do compressor.

2.10 – Considerações Finais

Conforme foi mencionado no início deste capítulo, o objetivo do mesmo é servir como base a fundamentação da arquitetura de monitoramento e apresentar o mundo dos compressores, mesmo que superficialmente. Pode-se dizer que a questão central deste trabalho é, portanto, determinar de forma mais precisa o estado físico e o processo termodinâmico do equipamento de estudo. Auxiliando nas decisões de intervenção e de alteração de parâmetros operacionais e servir como instrumento de diagnóstico para possíveis falhas em desenvolvimento. Serão utilizadas técnicas de manutenção preditiva para avaliar o estado interno do compressor baseado nos dispositivos de instrumentação existentes. O desempenho termodinâmico do equipamento poderá ser acompanhado em tempo real, servindo como um grande indicativo de possíveis inconformidades, como aumento de ruído, vibração e temperatura dos mancais.

Ainda assim, existem técnicas de manutenção preventiva, a serem realizados periodicamente, que não serão contemplados por esta arquitetura, mas que podem ser úteis ao diagnóstico de falhas. A política da Manutenção Centrada na Confiabilidade visa à utilização dos pontos fortes de cada técnica de manutenção, mas também defende a ideia de que muitos modos de falha possuem efeitos de aviso que podem ser identificados pelas sensações humanas de um operador, por exemplo. Além destas, existem análises que podem ser feitas fora da organização, como análise de óleo e análise de partículas, que não entram no escopo deste trabalho.

Capítulo 3

3 – Análise de Correspondência - Conceitos

O objetivo deste capítulo é transmitir o conceito necessário sobre Análise de Correspondência (AC) e sua interpretação geométrica para embasar as análises apresentadas no capítulo 6.

3.1 – Principais Conceitos

A AC é uma técnica de análise exploratória de dados adequada para analisar a relação entre variáveis qualitativas, quando dispostas em tabelas de duas ou de múltiplas entradas, levando em conta medidas de correspondência entre linhas e colunas. (GREENACRE, 2010)

O objetivo desta técnica é a exibição de forma geométrica das variáveis, suas categorias e dos objetos observados na base de dados. Em um espaço de baixa dimensão, exibe-se a associação entre as colunas e as linhas através da proximidade existente entre os pontos no gráfico. (GREENACRE, 2010)

Ainda de acordo com Greenacre & Hastie (1987), o objetivo da AC é achar um subespaço que melhor ajuste o conjunto (nuvem) de pontos no espaço euclidiano. Este ajuste é feito pelo método de quadrado mínimo ponderado onde a distância euclidiana é utilizada em um sistema de massas pontuais.

A AC mostra como as variáveis dispostas em linhas e colunas estão relacionadas e não somente se a relação existe. Embora seja considerada uma técnica descritiva e exploratória, a AC simplifica dados complexos e produz análises exaustivas de informações que suportam conclusões a respeito das mesmas. (CZERMAINSKI, 2004)

A sua natureza multivariada permite revelar relações que não seriam detectadas em comparações aos pares das variáveis. É altamente flexível quanto a

pressuposições sobre os dados: o único requisito é o de uma matriz retangular com entradas não negativas. (CZERMAINSKI, 2004)

A Análise de Correspondência Simples (ACS) (AC de Tabelas de Contingência) em sua forma básica consiste na aplicação de tabelas de contingência de dupla entrada. Para estes casos as linhas são exibidas como as categorias de uma variável, as colunas como as categorias de outra variável e as células as frequências observadas. (GREENACRE, 2007).

Em Análise de Correspondência Múltipla (ACM) (AC de matrizes indicadoras e/ou matrizes de Burt), consiste na aplicação feita em tabelas multidimensionais, onde as linhas representam os objetos (casos) observados e as colunas as diferentes categorias de diferentes variáveis. (GREENACRE, 2007).

As matrizes indicadoras e as matrizes de Burt são as duas formas mais usuais para apresentação de dados para a aplicação da ACM. De acordo com Naito (2007), as duas abordagens são equivalentes e os gráficos resultantes, via matriz indicadora ou matriz de Burt, são análogos, diferenciando-se apenas nas escalas de cada variável.

3.1.1 – Matriz indicadora

A exibição mais simples dos dados para a execução da ACM é sob a forma de uma matriz indicadora, onde as linhas representam os objetos e as colunas representam as categorias das variáveis de estudo. (PRADO, 2012)

3.1.2 – Nuvem de pontos

Como o principal objetivo da AC é a representação gráfica das relações entre as categorias de cada variável estudada, torna-se necessário representar as categorias de linha e coluna em um mesmo espaço multidimensional. Essa representação ocorre na forma de uma nuvem de pontos que é definida como um conjunto finito de pontos em um espaço geométrico. (NAITO, 2007)

A dimensão de uma nuvem de pontos é dada pelo número de informações de cada linha, ou coluna, menos um.

3.1.3 – Análise de correspondência e dados longitudinais

No universo da AC, a pesquisa longitudinal refere-se à coleta e análise de dados ao longo do tempo. Sendo assim, para a realização desse tipo de pesquisa, os dados são coletados para cada variável em dois ou mais períodos de tempo distintos, os itens analisados ou são os mesmos ou são, pelo menos, comparáveis entre um período e outro. (PRADO, 2012)

Esse tipo de pesquisa permite descrever padrões de mudanças, proporções e estabelecer direções às relações causais. Como ocorre em outras análises estatísticas, a avaliação gráfica de dados longitudinais provê ao usuário da técnica capacidade de reconhecer as características mais influenciadoras do processo ao longo do tempo. (PRADO, 2012)

3.1.4 – Exemplo

Suponha que seja necessário elaborar um estudo sobre os hábitos de fumar de diferentes funcionários de uma empresa. O seguinte conjunto de dados é apresentado por Greenacre (1984, p 55.); esta tabela também é fornecida no arquivo de dados exemplo Smoking.sta do Software STATISTICA®.

Tabela 04 : Categoria de Fumantes

Grupos	Categorias de Fumantes				Total
	Não-Fuma	Leve	Médio	Muito	
Gerentes Sênior	4	2	3	2	11
Gerentes Júnior	4	3	7	4	18
Funcionários Sênior	25	10	12	4	51
Funcionários Júnior	18	24	33	13	88
Secretárias	10	6	7	2	25
Total	61	45	62	25	193

Ao imaginar que cada um dos 4 valores de coluna em cada linha da Tabela 04 são como coordenadas em um espaço de quatro dimensões, pode-se calcular as distâncias (euclidianas) entre os 5 pontos de linha no espaço de 4-dimensional. As distâncias entre os pontos no espaço de 4-dimensional resumem todas as informações sobre as semelhanças entre as linhas na tabela acima. (STATISTICA, 2008)

Ao supor que se pode encontrar um espaço dimensional inferior, em que a posição dos pontos de linha retém toda, ou quase toda, a informação sobre as diferenças entre as linhas. Pode-se, então, apresentar todas as informações sobre as semelhanças entre as linhas (tipos de funcionários, neste caso) em um gráfico 1, 2, ou 3-dimensional simples. Isto pode parecer particularmente inútil para pequenas tabelas como a mostrada acima. No entanto, pode-se facilmente imaginar como a apresentação e interpretação de tabelas muito grandes poderia ser beneficiada com a simplificação que pode ser alcançada através da análise de correspondência. (STATISTICA, 2008)

3.1.4.1 – Massa

O conceito de massa dentro da A.C. será explicado baseando-se no exemplo apresentado. O programa irá calcular as frequências relativas para a tabela de frequência (Tabela 04), de modo que a soma de todas as entradas da tabela é igual

a 1 (cada elemento da Tabela 04 vai ser dividido pelo somatório das linhas da coluna total, ou seja, 193). (STATISTICA, 2008)

Tabela 05 : Frequências Relativas

Grupos	Categorias de Fumantes				Total
	Não-Fuma	Leve	Médio	Muito	
Gerentes Sênior	0,0207254	0,010363	0,015544	0,010363	0,056995
Gerentes Júnior	0,0207254	0,015544	0,036269	0,020725	0,093264
Funcionários Sênior	0,1295337	0,051813	0,062176	0,020725	0,264249
Funcionários Júnior	0,0932642	0,124352	0,170984	0,067358	0,455959
Secretárias	0,0518135	0,031088	0,036269	0,010363	0,129534
Totais	0,3160622	0,233161	0,321244	0,129534	1

Pode-se dizer que esta tabela mostra como a uma unidade de massa é distribuída entre as células. Na terminologia de análise de correspondência, os totais de linha e coluna da matriz de frequências relativas são chamados de massa de linha e massa de coluna, respectivamente.

3.1.4.2 – Inércia

O termo Inércia dentro da A.C. é utilizado de forma análoga à definição utilizada na matemática, aplicada ao "momento de inércia", que representa o somatório das massas vezes o quadrado da distância para o baricentro. (STATISTICA, 2008)

3.1.4.3 – Máximo Número de Dimensões

O número máximo de autovalores que podem ser extraídos a partir de uma tabela de duas entradas é igual ao número de colunas menos 1, e o número de linhas menos 1. Ao se escolher para interpretar o número máximo de dimensões, podem-se reproduzir exatamente todas as informações contidas na tabela, qualquer

escolha diferente desta, passa a reproduzir parcialmente as informações extraídas da tabela.

Capítulo 4

4 - Descrição do Funcionamento da UNIB4 e do Setor de Manutenção/Confiabilidade

4.1 – Descrição do Funcionamento da UNIB4

Devido à grande complexidade envolvida em uma planta petroquímica, somente será abordado neste estudo o funcionamento da UNIB04, concentrando-se no fluxo envolvido com o equipamento de estudo, o compressor de metano refrigerante.

Conforme mencionado anteriormente, a Unidade de Insumos Básicos – UNIB04, localizada em Duque de Caxias, opera 24 horas por dia e esteve em parada geral em junho de 2011, seus produtos eteno e propeno, são consumidos pelas unidades de polímeros de polietileno (PE9) e de polipropileno (PP5), que também estão alocadas em Duque de Caxias.

A UNIB04 consiste em Unidades de Processo ISBL e utilidades, foi projetada para produzir eteno grau polímero, propeno grau polímero e outros subprodutos inerentes ao processo como: hidrogênio de alta pureza, gasolina de pirólise hidrogenada, C4 bruto e produto C9+ tratado. Alguns destes podem ser processados em outras Unidade de Insumos Básicos da Braskem ou comercializados para outras empresas. (BRASKEM – Manual de Operação, 2013).

A Planta de Eteno é projetada para produzir em 8300 horas de operação as seguintes quantidades de eteno grau polímero para três casos operacionais

Caso 1: 520.000 MTA de Eteno Grau Polímero proveniente de carga fresca com 50% de Etano e 50% de Propano.

Caso 2: 500.000 MTA Eteno Grau Polímero proveniente da carga fresca de 100% de etano.

Caso 3: 535.000 MTA Eteno Grau Polímero proveniente da carga fresca com 50% (Futuro) de Etano e 50% de Propano mais o Etano e Eteno recuperado do processamento de 20.500 Nm³/h (a uma recuperação mínima de 85%) de uma corrente de gás combustível residual FCC.

O processo ocorre pelo craqueamento térmico de etano, propano, etano de reciclo, propano de reciclo e C4 de reciclo tratado.

Após o recebimento de etano/propano fresco, os gases são, separadamente, aquecidos e saturados com vapor de água, até que se atinja a relação desejada de vapor/hidrocarboneto. As duas cargas são divididas, a uma vazão controlada, em seis passes individuais por forno. (BRASKEM – Manual de Operação, 2013)

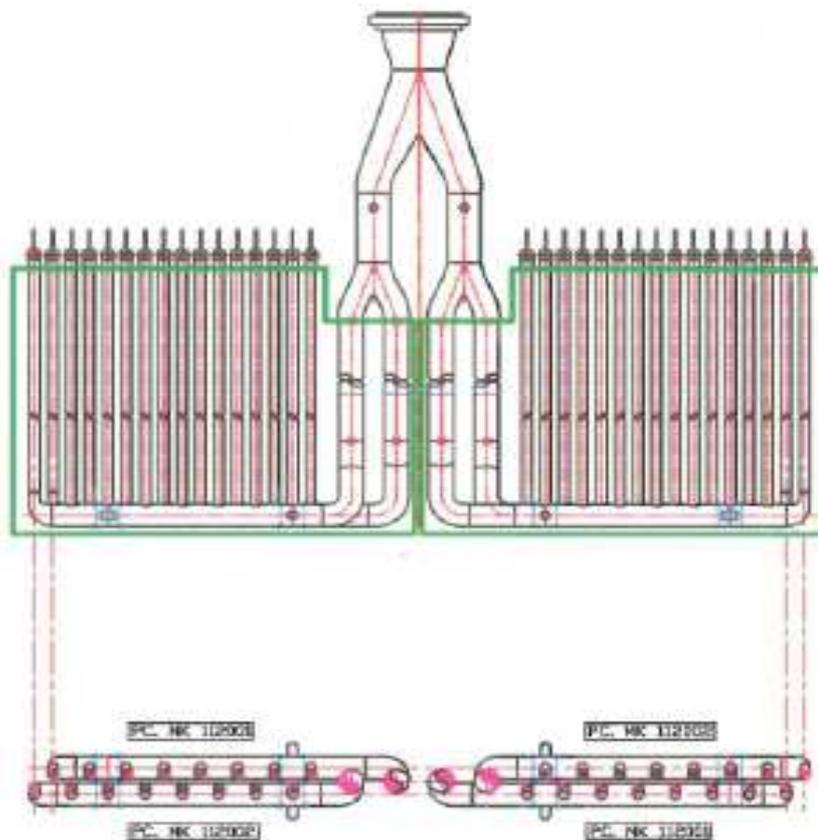


Figura 14: Conjunto de Serpentinas da seção de radiação. Fonte: BRASKEM - IT 5030-00164.

Ao todo são 6 fornos de pirólise modelo Lummus SRT V NF, cada forno tem 6 conjuntos de serpentinas na seção da radiação, a Figura 14 mostra 2 desses conjuntos, sendo que cada conjunto tem 2 passes e possui a seguinte configuração:

- Primeiro passe (entrada) – 16 tubos – Ø2”
- Segundo passe (saída) – 2 tubos – Ø5”

Após a passagem pela zona de radiação de cada forno, o gás craqueado é resfriado em trocadores de calor e enviado a uma torre de resfriamento. Nesse momento, o gás é parcialmente condensado pelo contato direto com água, e o vapor ainda existente, forma a corrente de topo, que é enviada ao primeiro estágio do compressor de Gás de Carga. (BRASKEM – Manual de Operação, 2013)

O Compressor de Gás de Carga, chamado de 1-GB-201, é um compressor turbinado centrífugo de quatro estágios da Mitsubishi, modelo 9H-6W/9G-6B/7H-6 com resfriamento entre os estágios usando Água de resfriamento. O compressor em condições normais de operação tem uma vazão de 146.453,0 kg/hr e os gases são comprimidos a 34,15 kg/cm² absolutos, onde 83% do gás é composto de uma mistura de Etileno, Etano, Metano e Propileno, em ordem decrescente de quantidade. (BRASKEM – Manual de Operação, 2013)

Após a passagem pelo 1-GB-201, o gás de carga necessita ser resfriado para que sejam separados o eteno e propeno dos outros produtos inerentes ao processo, com isso, o gás é encaminhado a um trem de resfriamento, onde sofrerá sucessivos resfriamentos até que se possam separar o hidrogênio e o metano do mesmo. O hidrogênio residual é posteriormente reaquecido pelo gás de carga em trocadores de calor e enviado à unidade de PSA (Pressure Swing Absorption). O hidrogênio de alta pureza proveniente da Unidade de PSA é então usado no Conversor de Acetileno, na Hidrogenação do C4 e nos Reatores de Hidrogenação de Gasolina de Pirólise e enviado ao limite de bateria para venda. (BRASKEM – Manual de Operação, 2013)

Já a corrente rica em metano residual é reaquecida e usada para regeneração, antes de finalmente ser enviada ao sistema de gás combustível. O processo de regeneração do metano é realizado para que se possa realizar com o gás algumas das trocas de calor que ocorrem no trem de resfriamento com o gás de carga, mencionadas anteriormente, que visam separar do gás de carga do metano e do hidrogênio. Ou seja, o próprio metano que antes foi separado do gás de carga

através de sucessivos resfriamentos, participa do resfriamento do gás de carga. (BRASKEM – Manual de Operação, 2013)

Todo este processo ocorre na Demetanizadora que tem como principal objetivo separar metano do gás de carga e de algum líquido residual. O metano se divide em duas partes. Uma corrente é enviada para a câmara fria como metano refrigerante; a outra parte é aquecida, comprimida pelo compressor de metano refrigerante, chamado de 1-GB-301 e, em seguida, resfriada para realizar novas trocas de calor até que, finalmente, é enviada para o sistema de gás combustível. (BRASKEM – Manual de Operação, 2013)

O compressor de metano refrigerante (1-GB-301) é um compressor turbinado centrífugo de dois estágios, observar Figura 15, que é utilizado para fornecer metano refrigerante para a câmara fria para obter o balanço geral de calor. A descarga do primeiro estágio é enviada para o resfriador intermediário do compressor de metano refrigerante (1-EA-322), e, em seguida, é enviada para o segundo estágio onde é comprimida até a pressão de descarga de 46,15 kg/cm²g. A descarga do segundo estágio é enviada para o resfriador posterior do compressor de metano refrigerante (1-EA-323). (BRASKEM – Manual de Operação, 2013)

O volume de controle do presente trabalho se restringe a esse sistema de compressão, contendo desde a sucção do 1-GB-301 até a saída do segundo Trocador de Calor 1-EA-323.



Figura 15: Fotografia do Compressor 1-GB-301. Fonte: Fotografia retirada na BRASKEM.

4.2 – Setor de Manutenção/Confiabilidade

A Manutenção possui como principal atribuição a conservação e melhoria contínua de todos os equipamentos da organização, visando manter o máximo de disponibilidade operacional, com confiabilidade e segurança. Este setor possui função estratégica para a companhia, atuando sempre em conjunto com a Operação, sua principal cliente.

4.2.1 – A Equipe

A Manutenção possui uma equipe de 78 funcionários, que estão subdivididos em Gerência, Mecânica, Elétrica, Instrumentação, Caldeiraria, Inspeção e

Planejamento, na Figura 16 é apresentado o organograma da equipe. Estes devem responder ao Gerente de Manutenção e este ao Gerente das plantas do Sudeste. Todos trabalham em horário próximo ao comercial, ou seja, das 07h30min às 16h45min, com meia hora de almoço, com exceção dos estagiários, que trabalham até às duas horas da tarde.

Ainda existem os terceirizados que realizam funções complementares à equipe de manutenção, como execução das atividades planejadas, montagem de andaimes, movimentação de carga, entre outros.

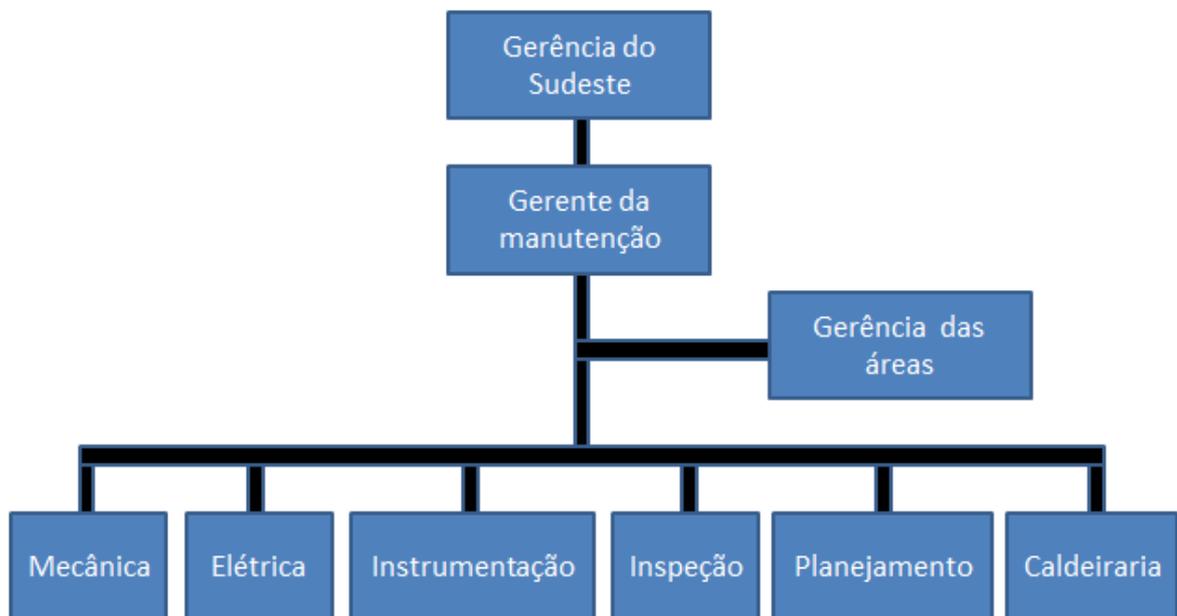


Figura 16: Organograma do Setor Manutenção/Confiabilidade.

As áreas de manutenção de Mecânica, Elétrica, Instrumentação e Caldeiraria, são responsáveis por seus respectivos equipamentos e itens instalados na área industrial. O setor de Inspeção é responsável por realizar inspeções em itens de Mecânica e Caldeiraria em que caibam inspeções de metalografia, termografia, ultrassom, radiografia e etc. O Planejamento responde as demandas de todos os setores da manutenção, sendo responsável por alocação de insumos e mão de obra terceirizada. Os serviços realizados pela manutenção são planejados de acordo com a criticidade e com as ordens de serviço geradas pelo SAP. Software de gerenciamento utilizado em todos os setores da Braskem.

Assim que uma demanda é criada por qualquer um dos setores da manutenção, ela deve ser registrada como uma Nota de Serviço ao setor responsável através do SAP. O técnico especialista do setor notificado deve verificar a real existência desta demanda na área industrial e caso a constate, deve transformar a Nota em Ordem de Serviço. Com este nível de registro, a mesma passa a estar sob responsabilidade do planejamento, que deve julgar a criticidade da mesma junto do setor responsável e programá-la assim que possível, disponibilizando os insumos e a mão de obra terceirizada necessárias para a realização do serviço. Ao fim, a Ordem de Serviço deverá ser fechada e caso tenha sido detectada a ocorrência de uma falha, deverá ser realizado um estudo para a mitigação da mesma.

Capítulo 5

5 – Descrição da Arquitetura de Monitoramento e Ferramentas utilizadas

O capítulo fornecerá uma “descrição da arquitetura de monitoramento”. Será apresentado o software utilizado – PI Process Book® e algumas de suas ferramentas, o banco de dados gerado através do software, os cálculos que foram necessários para produzir as principais informações e o layout das telas de monitoramento produzidas, também será feita uma validação do Sistema de Monitoramento realizando uma comparação com informações fornecidas pelo Data Sheet do equipamento.

5.1 – PI Process Book®

O PI Process Book®, geralmente chamado de PI, é uma ferramenta de software para visualização de dados do processo de forma gráfica, através de informações extraídas de instrumentos instalados no sistema a ser monitorado, que ficam armazenadas no servidor da Braskem.

Para ter acesso a este software o colaborador necessita solicitar a equipe de TI (Tecnologia da Informação) que habilite o acesso a este usuário e instale em seu computador a plataforma do PI. As informações podem ser estáticas ou dinâmicas do processo, podendo estar dispostas em vários displays configurados pelos próprios usuários e serem visualizadas através de gráficos ou de valores com unidades padrões.

O software possui a possibilidade de se comunicar com outros programas como Excel, permitindo a extração de informações para a produção de bancos de dados ou a elaboração de estatísticas e tendências. Podendo-se comunicar com o

Microsoft Visual Basic for Applications (VBA), para otimizar e automatizar algumas tarefas da rotina da manutenção ou do processo.

Existem dois modos básicos de exibição para o PI, sendo um para a execução com o objetivo de abrir e executar displays e o segundo modo para a construção com o objetivo de editar ou criar novos displays e funções.

De acordo com o Manual de Treinamento do PI, versão 2.31, têm-se algumas características do PI:

- Ferramenta eficiente para exibição de dados on-line e históricos que residem no PI e outras fontes;
- Capacidade de criar exibições gráficas interativas que podem ser salvas e compartilhadas com outras pessoas;
- Capacidade de edição de displays de forma simples e ágil;
- Possibilidade de escrever scripts que automatizam exposições e tendências utilizando o Microsoft Visual Basic for Applications.

A seguir, na Figura 17, é apresentada a tela inicial do PI, onde podem ser observadas algumas de suas ferramentas e seu Layout. Basicamente a tela inicial é composta de um display em branco, caixa de ferramentas, opções de configuração do software e imagem.

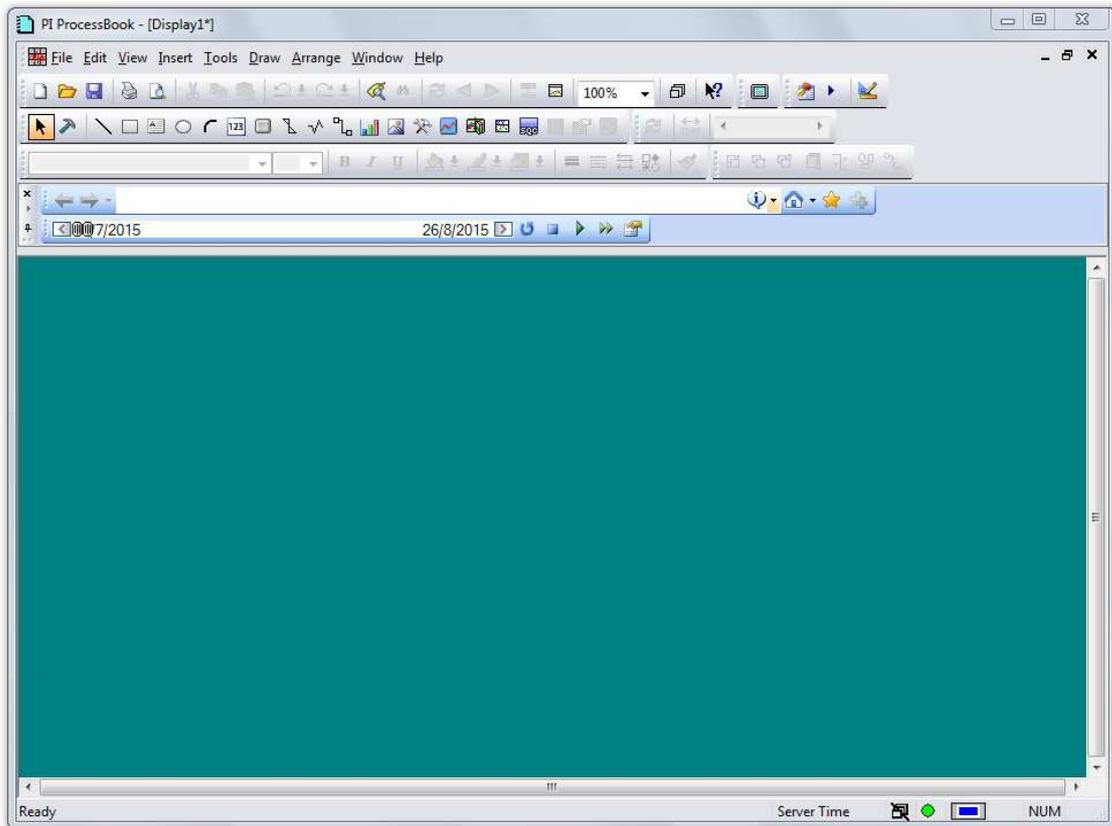


Figura 17: PI – Tela Inicial.

Na Figura 18, é apresentada uma tela utilizada pelos técnicos da Braskem para monitorar alguns dos principais sistemas da planta. Pode-se observar a divisão entre as duas áreas de UNIB4 (as áreas de ISBL e OSBL) e a unidade de PE9. A partir desta tela, pode ser feita uma navegação nos principais sistemas e equipamentos da planta, exibindo informações do processo e do estado de funcionamento dos mesmos. Além disso, é possível se obter uma rápida leitura dos equipamentos em operação naquele momento, os que apresentam a cor verde estão operando, enquanto que, os que apresentam a cor vermelha estão inoperantes.

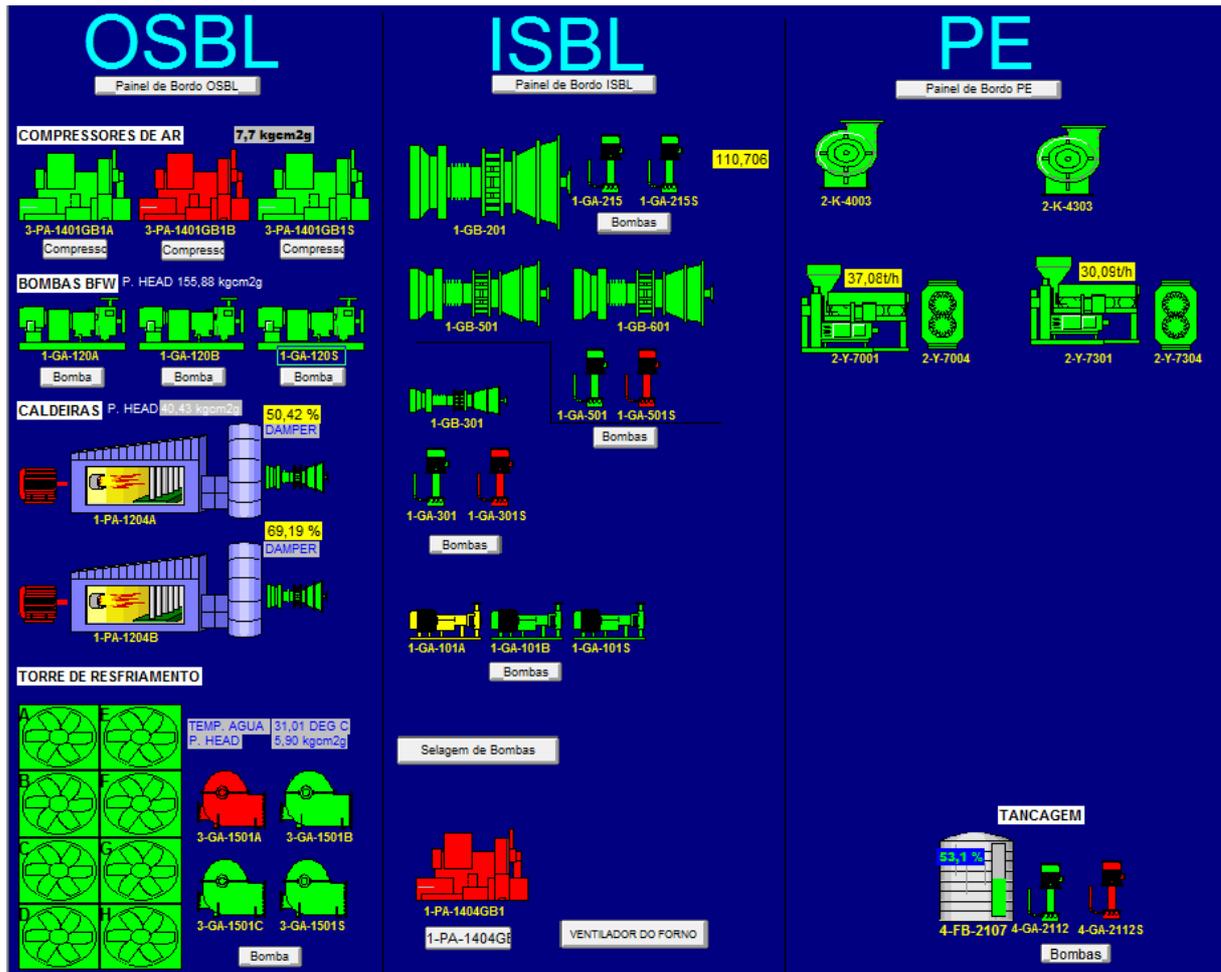


Figura 18: PI – Sistema de monitoramento de UNIB4 e PE9.

Como pode ser observado na Figura 18, o PI possui uma biblioteca interna de figuras que remetem ao ambiente fabril, mas não somente a este, estendendo-se para setores como meios de transporte, mineração, sinalização, pessoas, natureza, entre outros. Esta ferramenta provê ao software a capacidade de participar dos mais diversos setores da economia, abrangendo todo o processo produtivo, desde o recebimento da matéria prima até o momento do ensaue.

Trata-se de uma ferramenta capaz de em um único display monitorar as principais informações de todo o processo produtivo, como pode ser observado na Figura 19. Pensando na dinâmica da rotina dos operadores e no grande fluxo de informações contido neste tipo de tela, configuram-se alarmes para que os operadores tenham atenção no que é mais importante para a planta naquele

momento e registram-se todas as informações captadas na área industrial para futuras consultas.

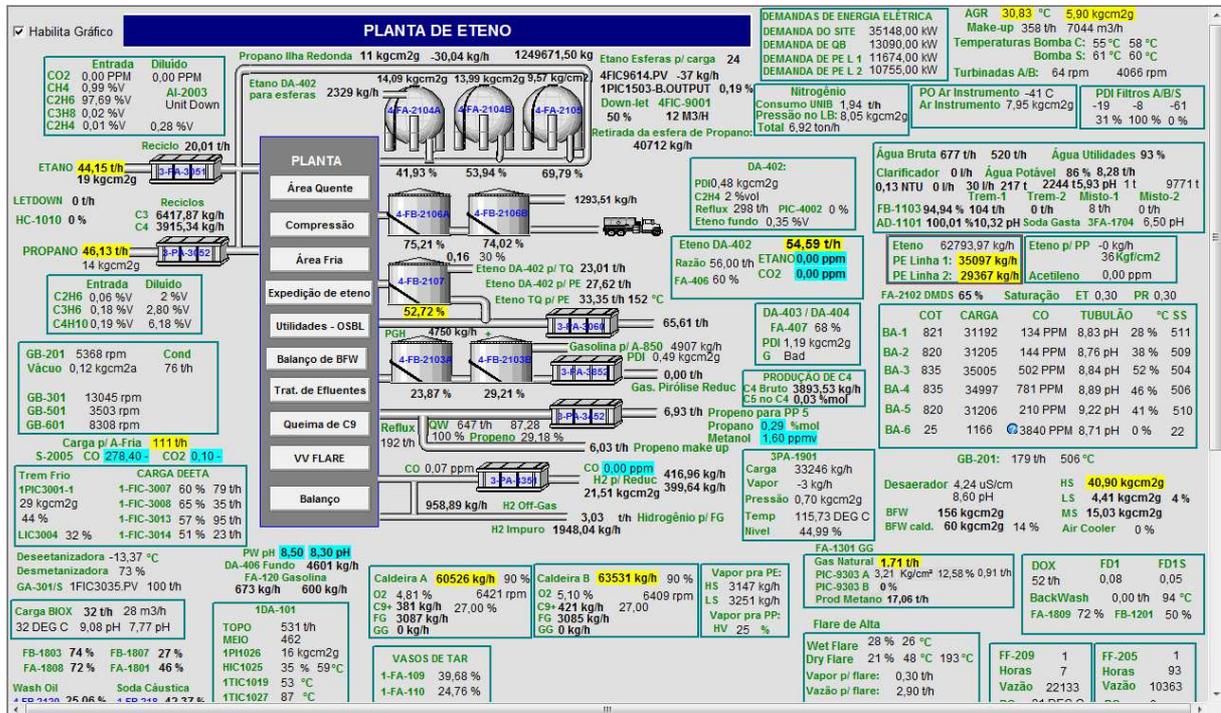


Figura 19: PI – Sistema de monitoramento do processo produtivo da planta de eteno (UNIB4).

No caso de uma consulta sobre o histórico de operação de um determinado equipamento, existem duas formas de se obter esse registro. A primeira delas pode ser vista nas Figuras 20 e 21, essa representação gráfica é conhecida como Trend de um instrumento e pode ser observada dentro do próprio PI. É um registro que demonstra a informação fornecida pelo instrumento e o momento que ela foi coletada.

É possível realizar uma configuração de Trend que permita a comparação entre diversas informações do processo ou do equipamento, permitindo que se observe a influência de um ou mais valores em uma determinada variável. Na Figura 20 é demonstrado o Trend das temperaturas dos mancais do compressor 1-GB-301, podendo-se observar uma tendência de estabilidade para essa situação.

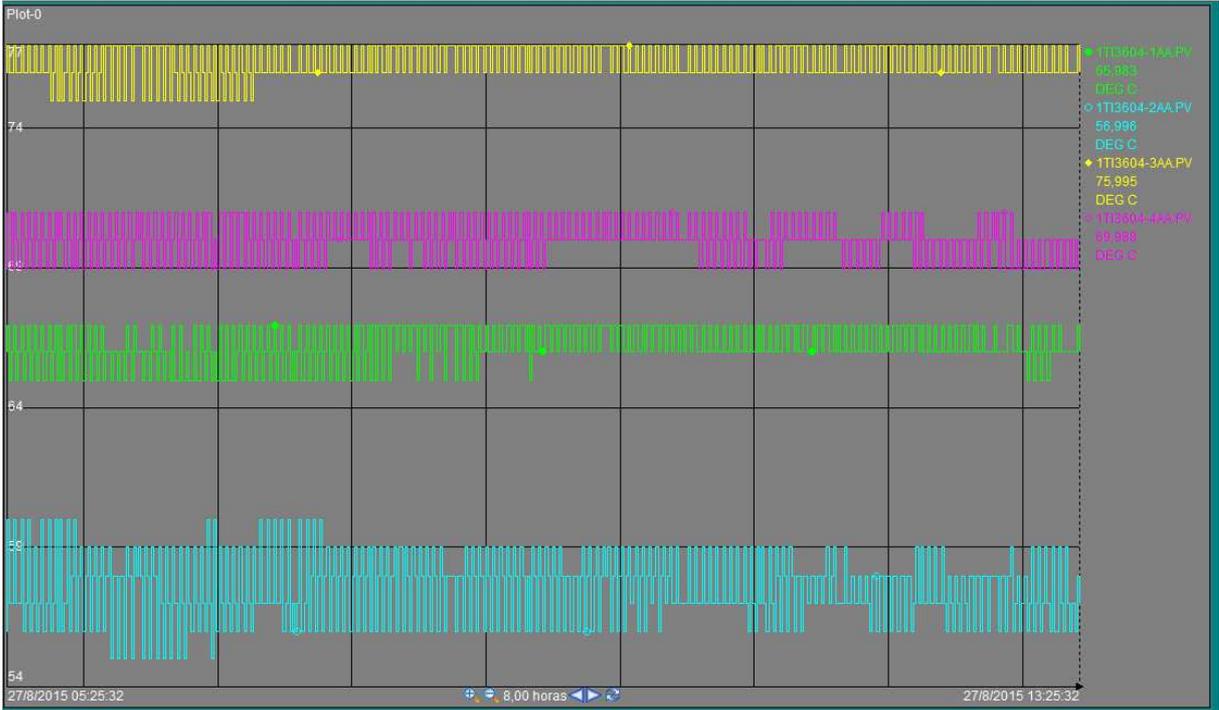


Figura 20: PI – Temperatura dos Mancais do 1-GB-301

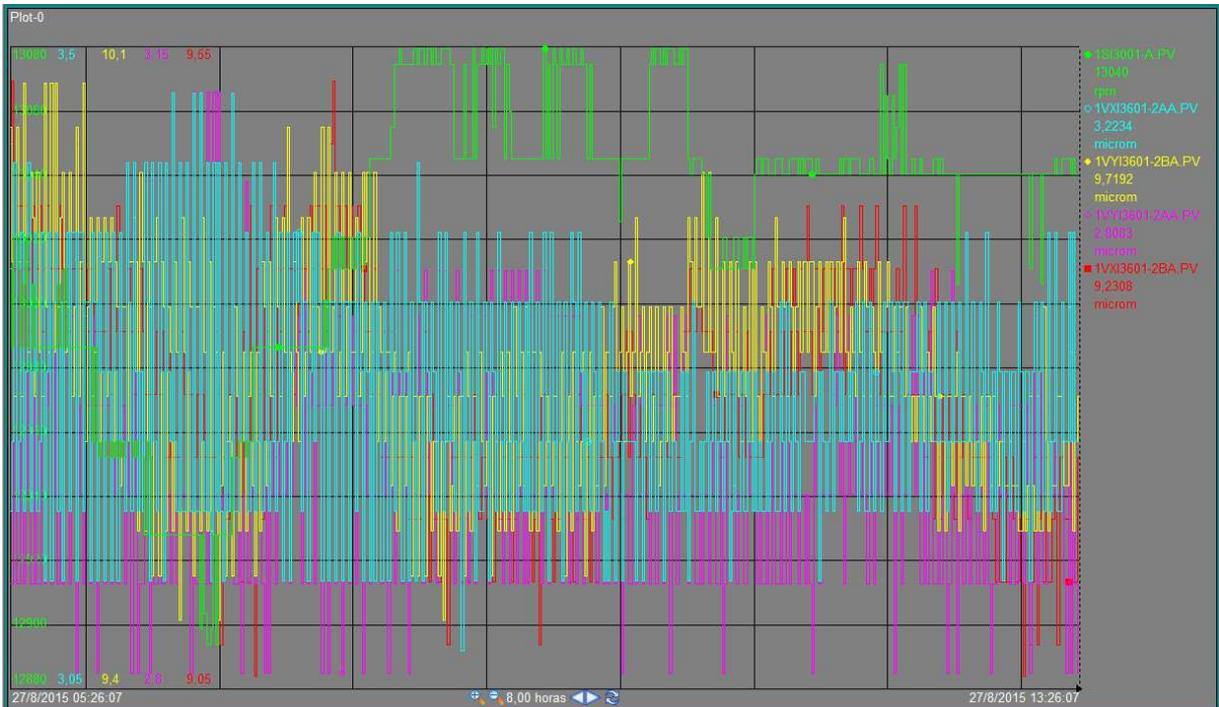


Figura 21: PI – Níveis de Vibração x Velocidade do 1-GB-301

Já para a Figura 21, a relação estabelecida está entre a vibração dos mancais e a velocidade do compressor 1-GB-301. Através deste Trend os técnicos da manutenção podem acompanhar como o compressor respondeu mecanicamente as passagens pelas zonas críticas de velocidade durante uma partida ou teste de velocidade.

A segunda forma de se obter um registro de operação de um determinado equipamento é exportando esses dados para algum programa que permita a análise e interpretação dos mesmos.

5.2 – Banco de Dados

Conforme foi mencionado anteriormente, o PI tem a possibilidade de se comunicar com outros softwares, um deles é o Microsoft Excel. Este suplemento do PI provê aos usuários do Microsoft Excel a habilidade de transmitir dados do servidor da Braskem, provenientes dos instrumentos instalados na planta, direto para as planilhas. Além de permitir também o fluxo inverso, ou seja, executar a inserção de dados das planilhas no servidor do PI. (PI SYSTEM – Manual de Treinamento – Versão 3.0.2)

Valendo-se dessa ferramenta será construído um banco de dados a partir de informações de instrumentos instalados no compressor 1-GB-301. Este banco de dados será elaborado para alimentar o método de cálculo utilizado e avaliar o desempenho do compressor ao longo dos anos de campanha. O primeiro passo para construir um banco de dados robusto e confiável é levantar todos os instrumentos que pertencem ao sistema de compressão 1-GB-301 e que possuam conexão com o servidor da Braskem.

Esse levantamento foi feito através dos PID's (Process and Instrumentation Diagram) da planta, estes são mapas de fluxo e equipamentos da planta. Trata-se de esquemas que mostram todos os equipamentos, instrumentos e fluxos da planta, e como estes compõem o sistema produtivo.

Tendo em mente que a Arquitetura de Monitoramento a ser desenvolvida deve envolver os parâmetros de operação e mecânicos do equipamento, foram

escolhidos para compor o banco de dados os instrumentos apresentados nas Tabelas 06 e 07.

Tabela 06: Instrumentos Analisados - Operação

Vazão dos Gás (t/h)	1º estágio			
	Sucção		Descarga	
	Temperatura do Gás (°C)	Pressão do Gás (Kgf/cm ² g)	Temperatura do Gás (°C)	Pressão do Gás (Kgf/cm ² g)
1FI3031.PV	1TI3052-A.PV	1PI3013-A.PV	1TI3055.PV	1PI3012.PV

Vazão dos Gás (t/h)	2º estágio			
	Sucção		Descarga	
	Temperatura do Gás (°C)	Pressão do Gás (Kgf/cm ² g)	Temperatura do Gás (°C)	Pressão do Gás (Kgf/cm ² g)
1FI3031.PV	1TI3610.PV	1PI3012.PV	1TI3061-A.PV	1PI3011-A.PV

Tabela 07: Instrumentos Analisados - Mecânica

Temperatura dos Mancais °C			
1TI3604-5AA	1TI3604-5BA	1TI3604-6AA	1TI3604-6BA
1TI3604-7AA	1TI3604-7BA	1TI3604-8AA	1TI3604-8BA
Vibração dos Mancais			
1VXI3601-2AA	1VYI3601-2AA	1VXI3601-2BA	1VYI3601-2BA
Deslocamento do Eixo		Velocidade	
1ZI3601-1CA	1ZI3601-1DA	1SI3001-AA	

Ao fim da etapa de levantamento dos instrumentos é preciso garantir que cada instrumento esteja calibrado e que sua informação chegue até o servidor de forma correta. Para garantir esta etapa é necessário que os certificados de calibração estejam dentro da validade e que a comunicação entre o instrumento e o servidor esteja preservada.

Neste momento será preciso definir qual período de operação será observado para construir o banco de dados. Considerando o grande número de variáveis a serem analisadas e a complexidade dos cálculos, optou-se por produzir um banco de dados com o maior número possível de entradas. Sendo assim, decidiu-se que o banco de dados terá data início em 01/01/2006 e data fim em 11/06/2015.

A planta de Duque de Caxias entrou em operação no ano de 2005 e ficou durante um ano em período de ajustes para que se atingissem as condições de projeto, por isso não se utilizará a data de partida da planta como data de início do banco de dados.

Durante a exportação dos dados do servidor da Braskem para o Excel torna-se necessário definir o intervalo entre as medições. Devido ao grande período analisado, medições em intervalos curtos de tempo tornam-se desnecessárias, optando-se por um intervalo de 8 horas entre cada medição.

Com todas as informações necessárias definidas, cada instrumento que irá compor o banco de dados tem suas informações exportadas para o Excel, produzindo cada um 10.346 entradas para o banco de dados. O próximo passo é filtrar o banco de dados para que a etapa de cálculo leve em consideração somente momentos em condições normais de operação.

Esse filtro será necessário pois em várias situações a planta encontrou-se fora de operação ou em momentos de instabilidade, também é preciso garantir que a etapa de cálculo não leve em consideração nenhum instrumento que esteja fora de operação. Essa etapa não deve ser enxergada como o momento de definir os ranges de operação do equipamento, essa definição só será possível após a construção da Arquitetura de Monitoramento. Neste momento deve-se garantir que não existam leituras de situações que não representem as condições normais de operação, objetivando ter a etapa de cálculo livre dessas inconformidades.

O filtro será aplicado nos instrumentos de sucção do primeiro estágio e do segundo estágio, ao eliminar dados que estejam zerados, com erro ou que tendam a ser extremos e fujam da tendência, garante-se que o banco de dados não esteja contaminado inconformidades.

5.3 – A Metodologia de Cálculo

Neste item será discutida a metodologia de cálculo utilizada, com todas as hipóteses adotadas, as equações necessárias para se quantificar o desempenho do

compressor 1-GB-301, os resultados obtidos e, por fim, uma validação da metodologia através da comparação com o Data-Sheet do equipamento.

5.3.1 – Hipóteses Adotadas

Para que a metodologia de cálculo utilizada se aproxime o máximo possível do caso real, é necessário garantir que as propriedades físicas do gás, propostas por esse método, estejam de acordo com o processo de compressão que ocorre dentro do equipamento. Para isso, durante o processo de caracterização do fluido de trabalho foi utilizada a hipótese de gás ideal.

A adoção desta hipótese só foi possível pois o processo de compressão provê ao gás características muito semelhantes as de um gás ideal. Esta solução além de atender as necessidades do método de cálculo, simplifica a caracterização do fluido de trabalho e o cálculo exigido pela metodologia.

Para que se possa afirmar que o fluido de trabalho se comporta como um gás ideal e assumir essa hipótese para fins de cálculo, é necessário realizar uma verificação do fator de compressibilidade (Z). O fator de compressibilidade pode ser entendido como uma medida do desvio do comportamento de gás ideal podendo ser calculado para uma determinada temperatura e pressão. (ÇENGEL & BOLES, 2006)

Para os gases ideais têm-se que $Z = 1$, para os gases reais este valor pode ser maior ou menor que uma unidade. Quanto mais distante Z estiver de uma unidade, mais o gás se desviará do comportamento de gás ideal. A Figura 22 demonstra o fator de compressibilidade de alguns gases de acordo com suas respectivas pressões e temperaturas reduzidas. (ÇENGEL & BOLES, 2006)

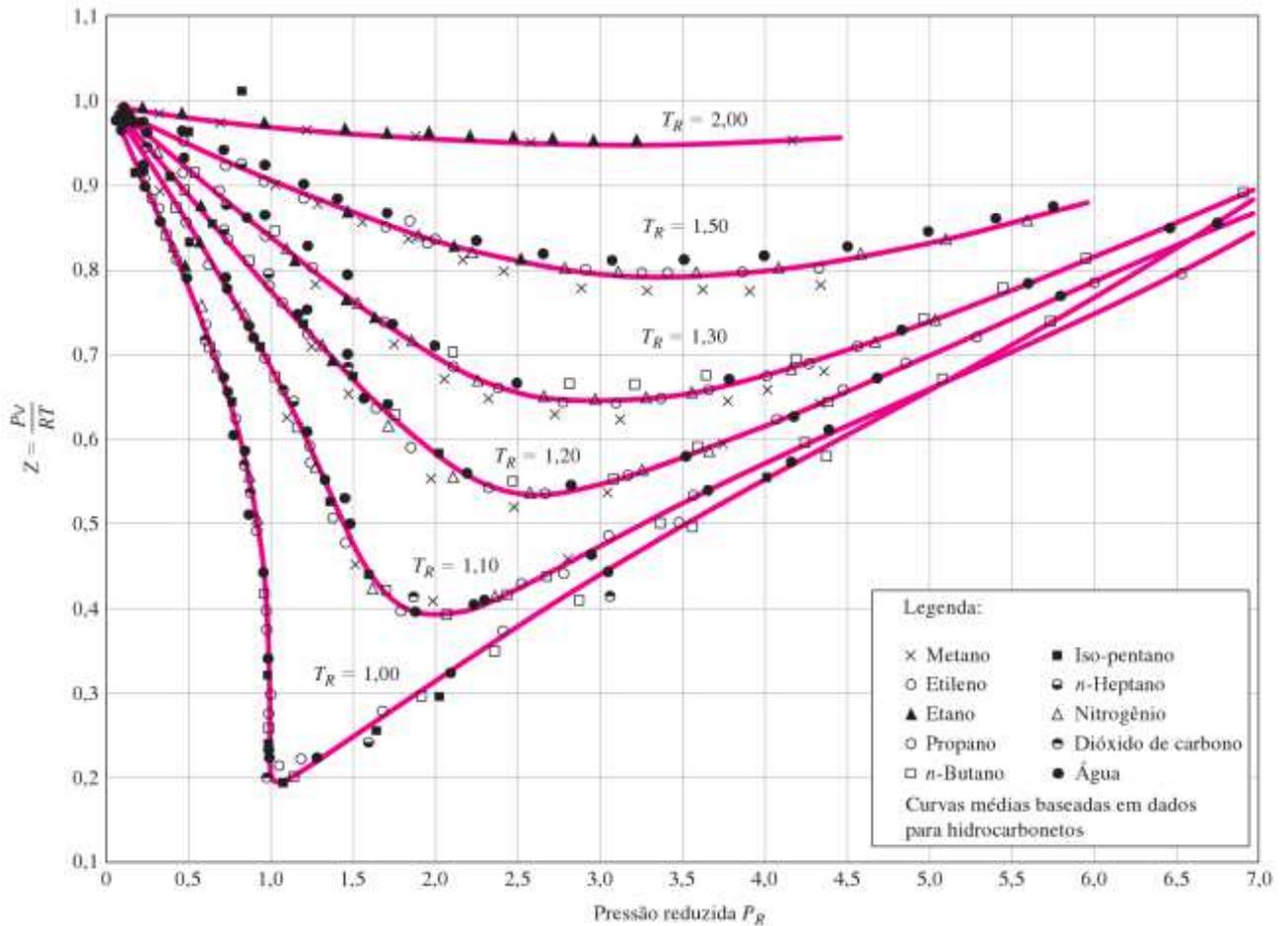


Figura 22: Comparação dos Fatores Z para diversos gases. Fonte: ÇENGEL & BOLES, 2006 – Termodinâmica

Os gases se comportam de modo diferente a uma determinada temperatura e pressão. Entretanto, eles se comportam de modo muito parecido quando comparados através de suas temperaturas e pressões reduzidas. É possível determinar as pressões e temperaturas reduzidas dos gases quando suas temperaturas e pressões são normalizadas em relação às temperaturas e pressões críticas. A normalização é realizada através das Equações 1 e 2.

$$P_r = \frac{P}{P_{cr}} \quad (1)$$

e

$$T_r = \frac{T}{T_{cr}} \quad (2)$$

Sendo:

P_r - Pressão reduzida

T_r - Temperatura reduzida

P – Pressão real

T – Temperatura real

P_{cr} – Pressão crítica

T_{cr} - Temperatura crítica

O fator de compressibilidade Z para todos os gases é aproximadamente igual à mesma pressão e temperatura reduzida. Por esta razão é utilizado pressão e temperatura reduzida na composição do gráfico da Figura 22. As pressões e temperaturas críticas utilizadas na normalização correspondem às pressões e temperaturas do gás no ponto crítico. Na Termodinâmica, o ponto crítico corresponde ao ponto no qual não existem limites de fase. (ÇENGEL & BOLES, 2006)

Massa molar, constante do gás e propriedades do ponto crítico

Substância	Fórmula	Massa molar, M kg/kmol	Constante do gás, R kJ/kg K*	Propriedades do ponto crítico		
				Temperatura, K	Pressão, MPa	Volume, m ³ /kmol
Ar	—	28,97	0,2870	132,5	3,77	0,0883
Amônia	NH ₃	17,03	0,4882	405,5	11,28	0,0724
Argônio	Ar	39,948	0,2081	151	4,86	0,0749
Benzeno	C ₆ H ₆	78,115	0,1064	562	4,92	0,2603
Bromo	Br ₂	159,808	0,0520	584	10,34	0,1355
n-Butano	C ₄ H ₁₀	58,124	0,1430	425,2	3,80	0,2547
Dióxido de carbono	CO ₂	44,01	0,1889	304,2	7,39	0,0943
Monóxido de carbono	CO	28,011	0,2968	133	3,50	0,0930
Tetracloreto de carbono	CCl ₄	153,82	0,05405	556,4	4,56	0,2759
Cloro	Cl ₂	70,906	0,1173	417	7,71	0,1242
Clorofórmio	CHCl ₃	119,38	0,06964	536,6	5,47	0,2403
Diclorodifluorometano (R-12)	CCl ₂ F ₂	120,91	0,06876	384,7	4,01	0,2179
Diclorofluorometano (R-21)	CHCl ₂ F	102,92	0,08078	451,7	5,17	0,1973
Etano	C ₂ H ₆	30,070	0,2765	305,5	4,48	0,1480
Álcool etílico	C ₂ H ₅ OH	46,07	0,1805	516	6,38	0,1673
Etileno	C ₂ H ₄	28,054	0,2964	282,4	5,12	0,1242
Hélio	He	4,003	2,0769	5,3	0,23	0,0578
n-Hexano	C ₆ H ₁₄	86,179	0,09647	507,9	3,03	0,3677
Hidrogênio	H ₂	2,016	4,1240	33,3	1,30	0,0649
Kriptônio	Kr	83,80	0,09921	209,4	5,50	0,0924
Metano	CH₄	16,043	0,5182	191,1	4,64	0,0993
Álcool metílico	CH ₃ OH	32,042	0,2595	513,2	7,95	0,1180
Clorometano	CH ₃ Cl	50,488	0,1647	416,3	6,68	0,1430
Neônio	Ne	20,183	0,4119	44,5	2,73	0,0417
Nitrogênio	N ₂	28,013	0,2968	126,2	3,39	0,0899
Óxido nítrico	N ₂ O	44,013	0,1889	309,7	7,27	0,0961
Oxigênio	O ₂	31,999	0,2598	154,8	5,08	0,0780
Propano	C ₃ H ₈	44,097	0,1885	370	4,26	0,1998

Figura 23: Propriedades do ponto crítico. Fonte: ÇENGEL & BOLES, 2006 – Termodinâmica

Sabendo a temperatura e pressão crítica do Metano, observar a Figura 23, pode-se normalizar a pressão e a temperatura de sucção e descarga de cada estágio. Neste momento, foram utilizadas as temperaturas e pressões de projeto (ver Anexo I – Data Sheet), para os valores reais, considerando que a operação do equipamento tende estar próxima desta condição.

Seguindo com a aplicação da hipótese, resta verificar o ponto de interseção entre os eixos de pressão e temperatura reduzida da sucção e descarga de cada estágio para conhecer o ponto em que o metano mais se afasta da condição de gás ideal.

Após a verificação conclui-se que a sucção do 2º estágio é a que mais se afasta da condição de gás ideal, em aproximadamente 2%. O valor encontrado satisfaz a necessidade da metodologia de cálculo, considerando que erros de até 5% são aceitáveis pela equipe de confiabilidade da Braskem para esses equipamentos.

5.3.2 – O Cálculo

Este item do capítulo é destinado para a exibição das fórmulas utilizadas para se quantificar o desempenho do equipamento. Além disso, será demonstrada a validação do método através de comparação com o Data Sheet do equipamento e, por fim, será exibido o desempenho do equipamento através de gráficos.

5.3.2.1 – Formulação

Neste momento serão apresentadas todas as fórmulas utilizadas para se quantificar o desempenho do equipamento. Será feito uma apresentação sequencial do método de cálculo para que o mesmo tenha uma lógica matemática.

Inicialmente as informações recebidas através dos instrumentos instalados no equipamento devem ter suas unidades convertidas para o Sistema Internacional de Unidades. A pressão deve ser convertida de kgf/cm^2 para Megapascal (MPa) , a

temperatura de graus Celsius (°C) para Kelvin (K) e a vazão mássica de tonelada por hora (t/h) para quilograma por hora (kg/h). Além disso, é preciso realizar uma segunda conversão com as informações de pressão, os instrumentos instalados no campo apresentam leitura manométrica e é preciso que a informação esteja em pressão absoluta.

A potência requerida pelo compressor para realizar o processo de compressão pode ser encontrada na Equação 3.

$$P = \frac{V \cdot Hp}{367200 \cdot \eta_p} \quad (3)$$

P – Potência Requerida (kW)

V – Vazão Mássica (kg/h)

Hp – Trabalho Politrópico (kg.m/kg)

η_p – Eficiência Politrópica

A Eficiência Politrópica (η_p) pode ser vista através da Equação 4, é o critério mais verdadeiro para avaliar a perfeição com que um impelidor efetua a cessão de energia ao fluido, pois ela compara a energia que foi cedida ao fluido com a energia que deveria ser cedida em um processo reversível entre os mesmos estados de sucção e descarga. (FALCO, 2009)

$$\eta_p = \frac{Hp}{hd - hs} \quad (4)$$

h_d – Entalpia de descarga (kJ/kg)

h_s – Entalpia de sucção (kJ/kg)

As equações para definição das entalpias de descarga e sucção são calculadas a partir do software Computer Aided Thermodynamic Tables 3 - CATT, este programa está disponível para download como material de apoio do livro Van Wylen – Fundamentos da Termodinâmica , Editora Blucher.

A partir do banco de dados coletou-se uma amostra de 50 entradas e simulou-se no programa com os valores pressão e temperatura para se obter as entalpias de sucção e descarga. Após essa etapa utilizou-se uma técnica conhecida como regressão múltipla para conhecer qual equação rege o cálculo das entalpias para a compressão do equipamento.

A entalpia de sucção pode ser calculada a partir da Equação 5.

$$h_s = 567,3299 + 2,265654 * (T_s) - 9,07855 * (P_s) \quad (5)$$

T_s – Temperatura de Sucção (°C)

P_s – Pressão de Sucção (MPa)

A entalpia de descarga pode ser calculada a partir da Equação 6.

$$h_d = 531,1495 + 2,620982 * (T_d) - 4,63706 * (P_d) \quad (6)$$

T_d – Temperatura de Descarga (°C)

P_d – Pressão de Descarga (MPa)

O Trabalho Politrópico (H_p) é definido como a energia que realmente é cedida ao fluido pelo impelidor. Seu equacionamento é apresentado em seguida pela Equação 7.

$$H_p = Z_s \cdot R \cdot T_s \cdot \frac{n}{n-1} \cdot \left[\left(\frac{P_d}{P_s} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (7)$$

Z_s – Fator de compressibilidade na sucção pela eq. de estado de Lee-Kesler

R – Constante do gás (kJ/kg.K)

T_s – Temperatura de sucção (K)

n – Coeficiente politrópico

P_d – Pressão de descarga (MPa) absoluto

P_s – Pressão de sucção (MPa) absoluto

O Fator de compressibilidade (Z) pela equação de estado de Lee-Kesler é encontrado na Equação 8. É necessário utilizar a equação de estado de Lee-Kesler, pois para cada entrada do banco de dados será necessário realizar o cálculo do Fator de Compressibilidade (Z), inviabilizando a utilização do gráfico da Figura 22.

$$Z_s = \frac{Pr \cdot \frac{v}{T_c}}{R \cdot \frac{T_c}{P_c}} \quad (8)$$

Pr – Pressão reduzida

v – Volume específico (m³/kg)

T_c – Temperatura crítica (K)

P_c – Pressão crítica (MPa)

Tr – Temperatura reduzida

O processo politrópico é aquele em que um determinado gás passa por transformações de pressão e volume, onde o produto dessas duas variáveis elevadas a um coeficiente é constante. Esse coeficiente é conhecido como

Coeficiente Politrópico (n) e pode aparecer em diversas equações, envolvendo estados iniciais e finais de algum processo, como sucção e descarga de um processo de compressão. Uma das equações apresentadas por Falco (2009) é a Equação 9.

$$\left(\frac{P_d}{P_s}\right)^{\frac{n-1}{n}} = \frac{T_d}{T_s} \quad (9)$$

Ao se aplicar logaritmo nos dois lados da equação e realizar algumas operações matemáticas, chega-se a expressão da Equação 10.

$$n = \frac{\log\left(\frac{P_d}{P_s}\right)}{\log\left(\frac{P_d \cdot T_s}{P_s \cdot T_d}\right)} \quad (10)$$

T_d – Temperatura de descarga (K)

Com as Equações apresentadas é possível quantificar o desempenho do equipamento e perceber como este se comportou ao longo da campanha. No próximo item do capítulo 5, será apresentada a validação do método através de comparação direta com o Data-sheet do equipamento.

5.3.2.2 – Comparação com o Data-Sheet

Para que o método de cálculo utilizado tenha validade é imprescindível que; ao ser comparado com o data-sheet do equipamento, o erro encontrado seja razoavelmente pequeno. Não é objetivo deste trabalho apresentar o método de cálculo mais preciso na quantificação do desempenho do equipamento, e sim, um sistema de monitoramento que permita acompanhar o comportamento do equipamento. Por este motivo, erros próximos a 5%, valor definido pela equipe de confiabilidade da Braskem, serão aceitáveis.

Para realizar a validação do método, basta que os valores utilizados nos testes de performance do fabricante sejam replicados ao método do trabalho e verificar o erro apresentado em cada situação. O fabricante do equipamento realizou 3 testes, simulando os 3 casos de operação que a planta foi projetada, para operação em 8300 horas.

Os resultados de cada teste podem ser vistos na Tabela 08.

Tabela 08: Validação do Método Utilizado

Casos de operação	1º estágio						Comparação		
	Variáveis de Entrada			Temp. Desc. (°C)	Pressão Desc. (kgf/cm ² g)	Eficiência Politrópica (%)	Eficiência Politrópica pelo Manual (%)	Erro (%)	
	Vazão GG (t/h)	Temp. Sucção (°C)	Pressão Sucção (kgf/cm ² g)						
Caso 1	13,782	34,9	6,4	137,9	17,475	74,86000851	76,6	2,27%	
Caso 2	12,94	34,9	6,4	139,9	17,513	73,60197255	75,8	2,90%	
Caso 3	16,633	34,9	6,4	135,8	17,377	75,96903933	77,5	1,98%	

Casos de operação	2º estágio						Comparação		
	Variáveis de Entrada			Temp. Desc. (°C)	Pressão Desc. (kgf/cm ² g)	Eficiência Politrópica (%)	Eficiência Politrópica pelo Manual (%)	Erro (%)	
	Vazão GG (t/h)	Temp. Sucção (°C)	Pressão Sucção (kgf/cm ² g)						
Caso 1	13,782	37,8	17,275	159,1	47,7	62,86457306	64,3	2,23%	
Caso 2	12,94	37,8	17,313	161,9	47,7	61,3330169	63,1	2,80%	
Caso 3	16,633	37,8	16,633	156,5	47,7	66,43951684	66,3	-0,21%	

A partir dos valores expostos na Tabela 06 pode-se concluir que o método de cálculo apresentado atende as necessidades da equipe de confiabilidade e pode ser utilizado de forma satisfatória para a construção da arquitetura de monitoramento.

5.4 – A Arquitetura de Monitoramento

Neste momento será apresentada a Arquitetura de Monitoramento produzida dentro do PI Process Book®, o layout é construído em torno de uma tela central que apresenta todas as principais informações de processo e alarmes que garantem a continuidade da operação do equipamento dentro de parâmetros pré-estabelecidos pela equipe de confiabilidade.

5.4.1 – Os Alarmes

Os parâmetros de operação para a criação dos alarmes foram obtidos de duas formas, através de informações extraídas do manual, onde era apresentada a faixa de operação da vibração e temperatura dos mancais do compressor e através de informações extraídas do banco de dados.

O banco de dados produziu um histórico de operação que, depois de serem filtrados os momentos de instabilidade e paradas do equipamento, permitiu traçar os limites de funcionamento para todos os parâmetros do equipamento. Esta atitude foi necessária pois o manual do equipamento não continha informação de todos os alarmes necessários para a operação do mesmo de forma segura, isto porque, o compressor 1-GB-301, é centrífugo, e que por operar em uma larga faixa de operação.

Os alarmes criados são configurados para cada instrumento e possuem uma faixa de operação ótima, quando a informação extraída pelo instrumento no equipamento sai dessa faixa de operação, o alarme emite um aviso sonoro, muda a cor da informação na tela de monitoramento e exibe a informação de forma

intermitente, essa configuração se manterá até que o Engenheiro ou Técnico reset o alarme.

5.4.2 – As Telas de Monitoramento

Neste tópico serão apresentadas as telas de monitoramento, as funções mais pertinentes em cada uma delas e como podem auxiliar a rotina da equipe de confiabilidade e manutenção.

A primeira tela apresentada será a tela central da arquitetura de monitoramento, nela podem ser observadas as principais informações de processo, um resumo de alarmes que informam alterações nos principais parâmetros do equipamento e botões que permitem a navegação entre todas as telas disponíveis.

A Figura 24 apresenta a tela central da arquitetura de monitoramento, ela foi desenvolvida com o intuito de facilitar a rotina da equipe de confiabilidade, permitindo em apenas um display acompanhar as principais informações e perceber alguma alteração importante.

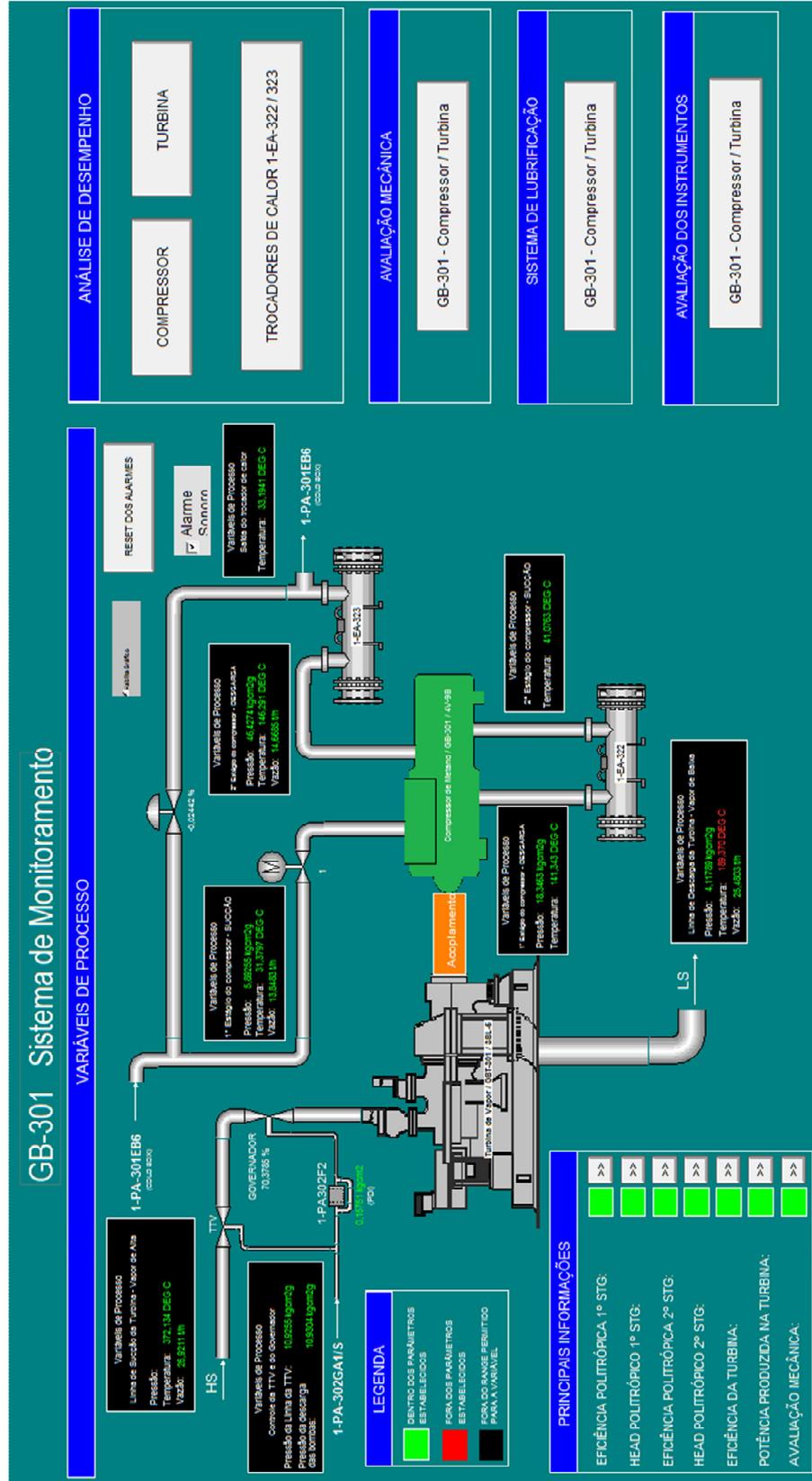


Figura 24: Tela Central – Arquitetura de Monitoramento

A próxima tela exibida na Figura 25 apresenta a análise de desempenho do compressor, nesta tela serão apresentadas as variáveis de entrada, os cálculos intermediários utilizados para se obter a eficiência politrópica de cada estágio, os valores de projeto do equipamento e as equações utilizadas para se obter cada dado.

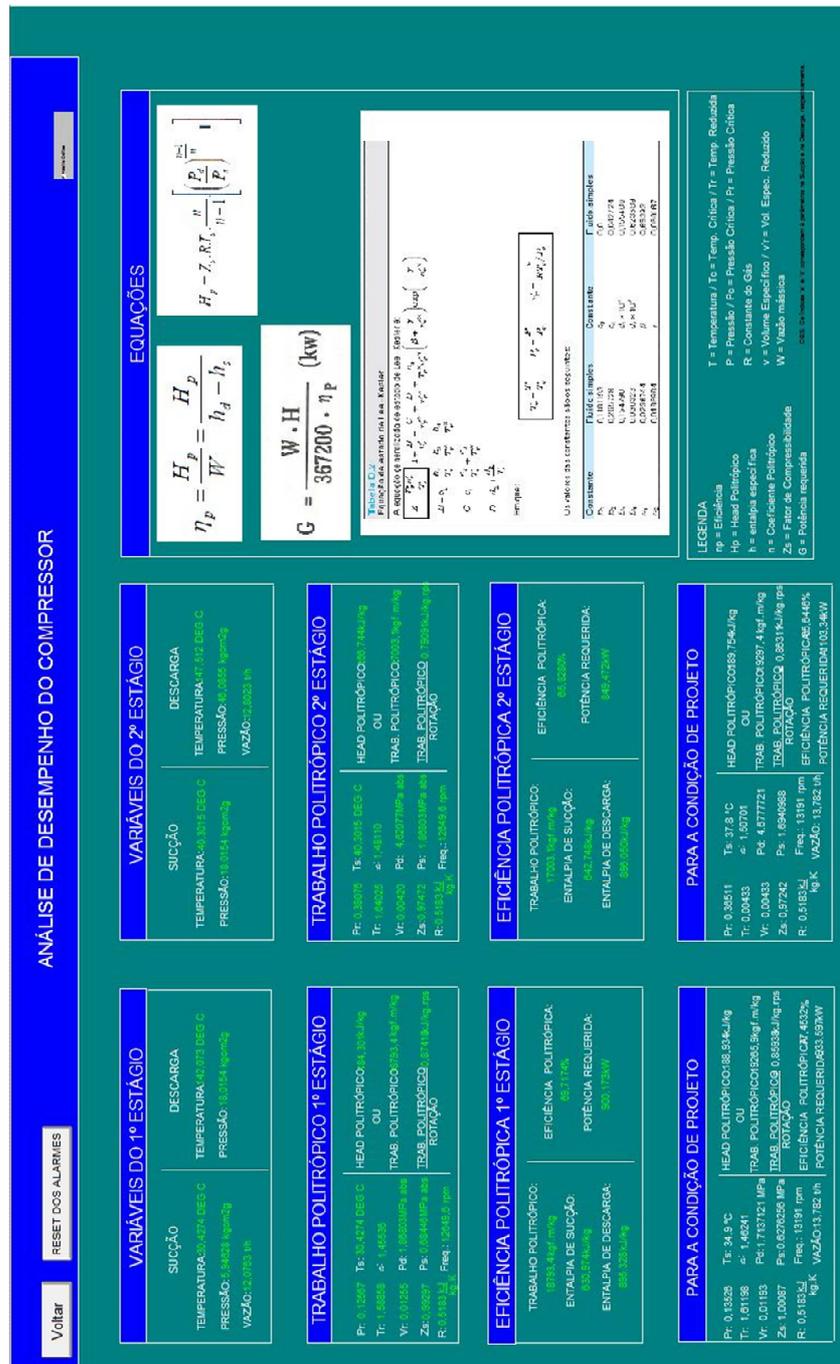


Figura 25: Análise de Desempenho do Compressor – Arquitetura de Monitoramento

O objetivo desta tela é apresentar ao usuário a metodologia de cálculo utilizada para futuras consultas e permitir ao mesmo investigar mais a fundo possíveis causas de perda de eficiência através de uma tela mais detalhada que possui alarmes em todos os dados apresentados na coloração verde. A mesma metodologia se aplica para a próxima tela.

A Figura 26 apresenta a análise de desempenho da turbina utilizada no compressor 1-GB-301. Nesta tela são exibidos os principais parâmetros operacionais da turbina e a quantificação do seu desempenho. Apresentando as mesmas funções já listadas na tela de desempenho do compressor.

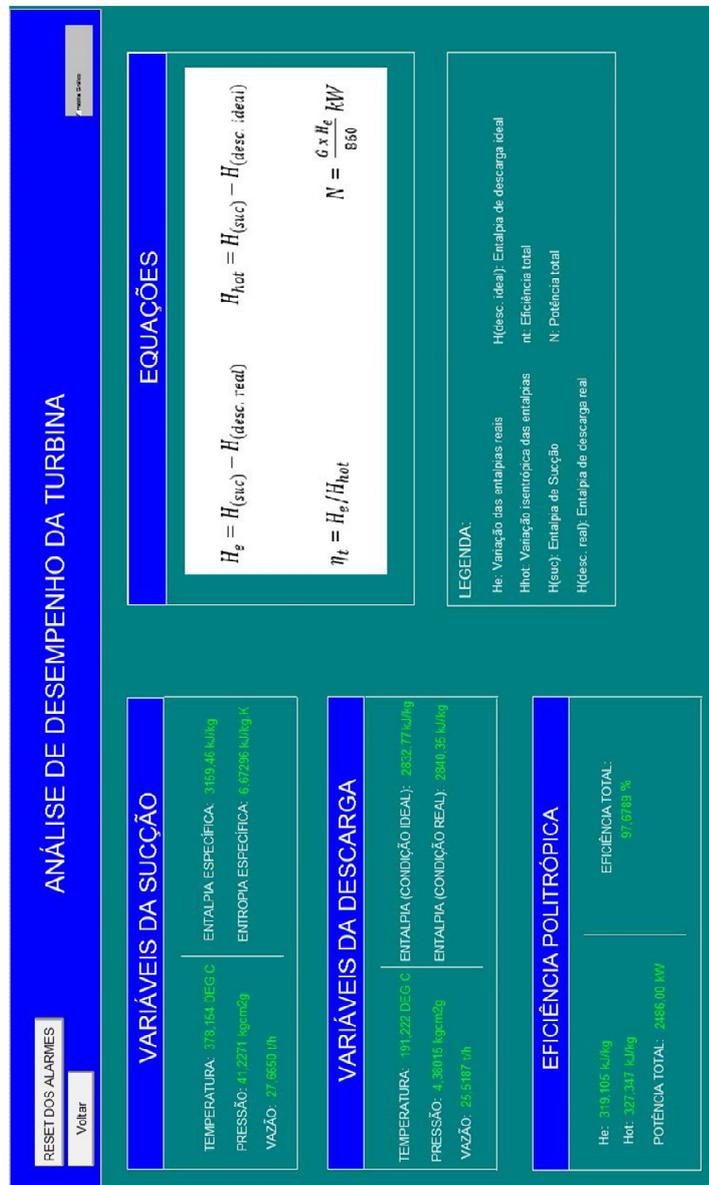


Figura 26: Análise de Desempenho da Turbina – Arquitetura de Monitoramento

A próxima figura apresenta a análise de eficiência dos trocadores de calor interestágios do compressor. O objetivo desta tela é fornecer à equipe de confiabilidade a capacidade identificar possíveis incrustações nos trocadores de calor através da perda de eficiência.

Este tipo de perda de eficiência é mais comum em trocadores de calor que operam com fluidos considerados sujos, contudo, naturalmente existe uma tendência de perda de eficiência ao longo da campanha que deve ser acompanhada para garantir a confiabilidade do equipamento. A Figura 27 exhibe as condições operacionais e a análise de desempenho de cada trocador de calor separadamente.



Figura 27: Análise de Desempenho dos Trocadores de Calor – Arquitetura de Monitoramento

Na próxima figura será exibida a avaliação mecânica do conjunto do compressor, com a turbina e o acoplamento. A Figura 28 apresenta as condições de operação do compressor do ponto de vista mecânico, abordando a temperatura e os níveis vibracionais em cada mancal, o deslocamento do eixo e a velocidade de rotação.

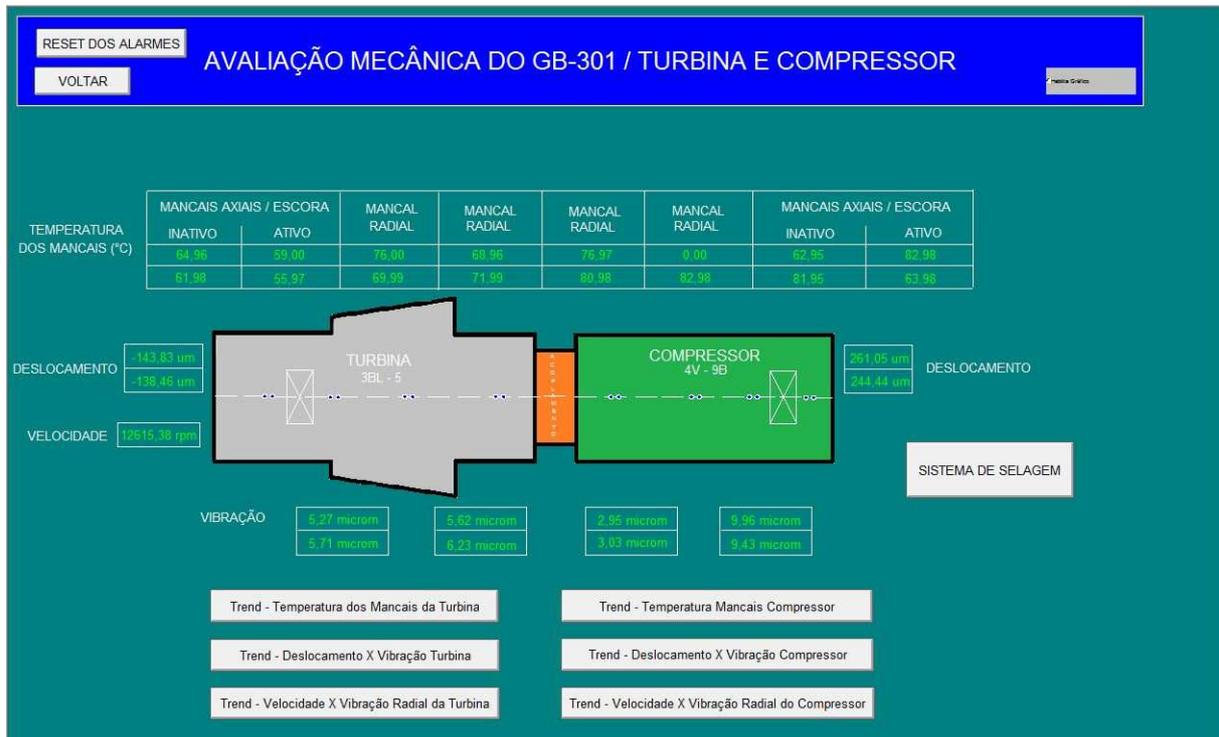


Figura 28: Avaliação Mecânica – Arquitetura de Monitoramento

Nesta tela de monitoramento, também, é exibido um conjunto de *trends* que fazem comparação entre cada parâmetro citado no parágrafo anterior, possibilitando o acompanhamento de partidas e paradas do equipamento por parte da equipe técnica, a realização de análises de espectro vibracional de cada mancal e o estudo da influência de cada parâmetro mecânico na operação do equipamento.

Como exemplo do que foi dito, a Figura 29 apresenta um trend de comparação entre os níveis vibracionais do compressor e a velocidade de rotação do conjunto. Pode se observar a ocorrência de uma parada e, em seguida, a partida do compressor e como esse fenômeno afeta variação dos níveis vibracionais com o aumento da velocidade.

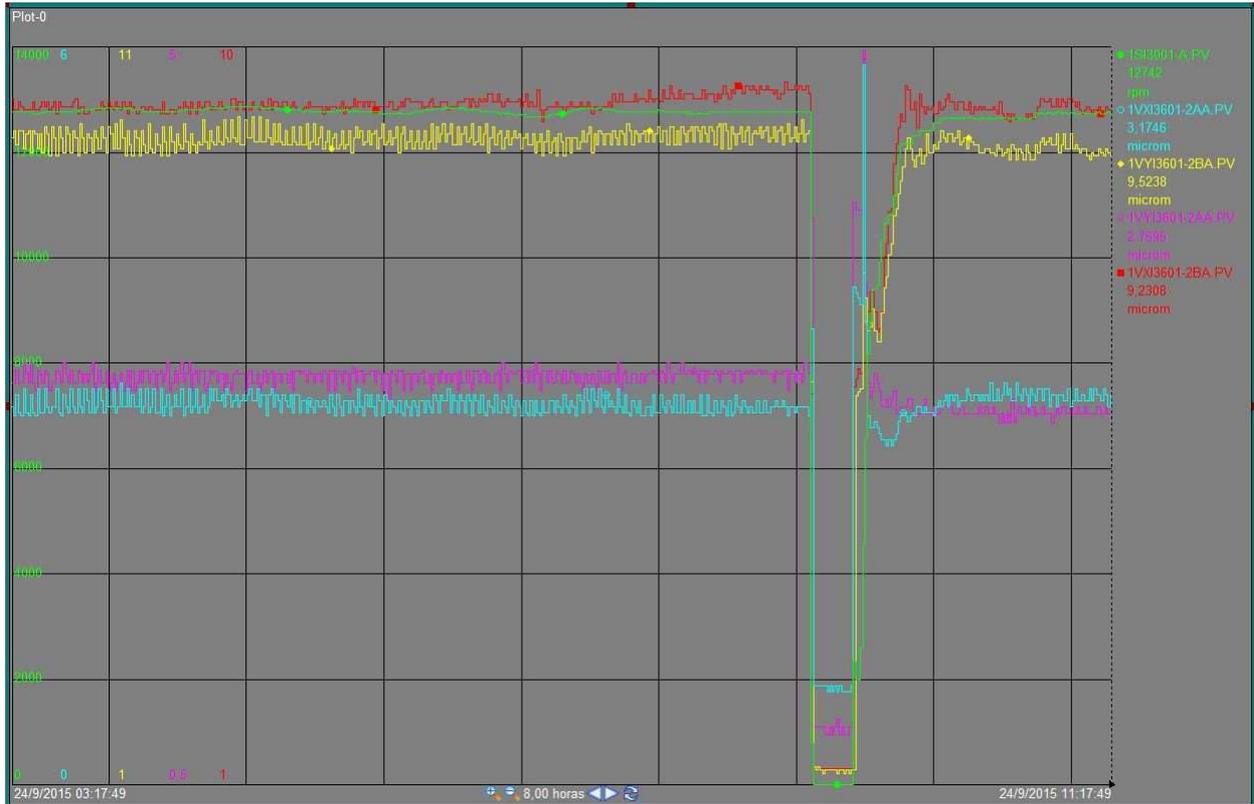


Figura 29: Velocidade x Níveis Vibracionais – Arquitetura de Monitoramento

Será apresentada neste momento a tela responsável por monitorar o sistema de lubrificação do compressor, o sistema é composto por duas bombas, dois trocadores de calor e um filtro. As bombas e os trocadores de calor estão em redundância para garantir que o sistema de lubrificação esteja sempre disponível para o equipamento.

Na tela da Figura 30 é apresentado o layout do sistema de lubrificação, os parâmetros operacionais e a eficiência dos trocadores de calor. Na tela é exibido o nível do tanque de óleo lubrificante, sendo possível verificar qual bomba e qual trocador de calor está operando, assim como identificar a saturação do filtro de óleo através da queda de pressão no mesmo.

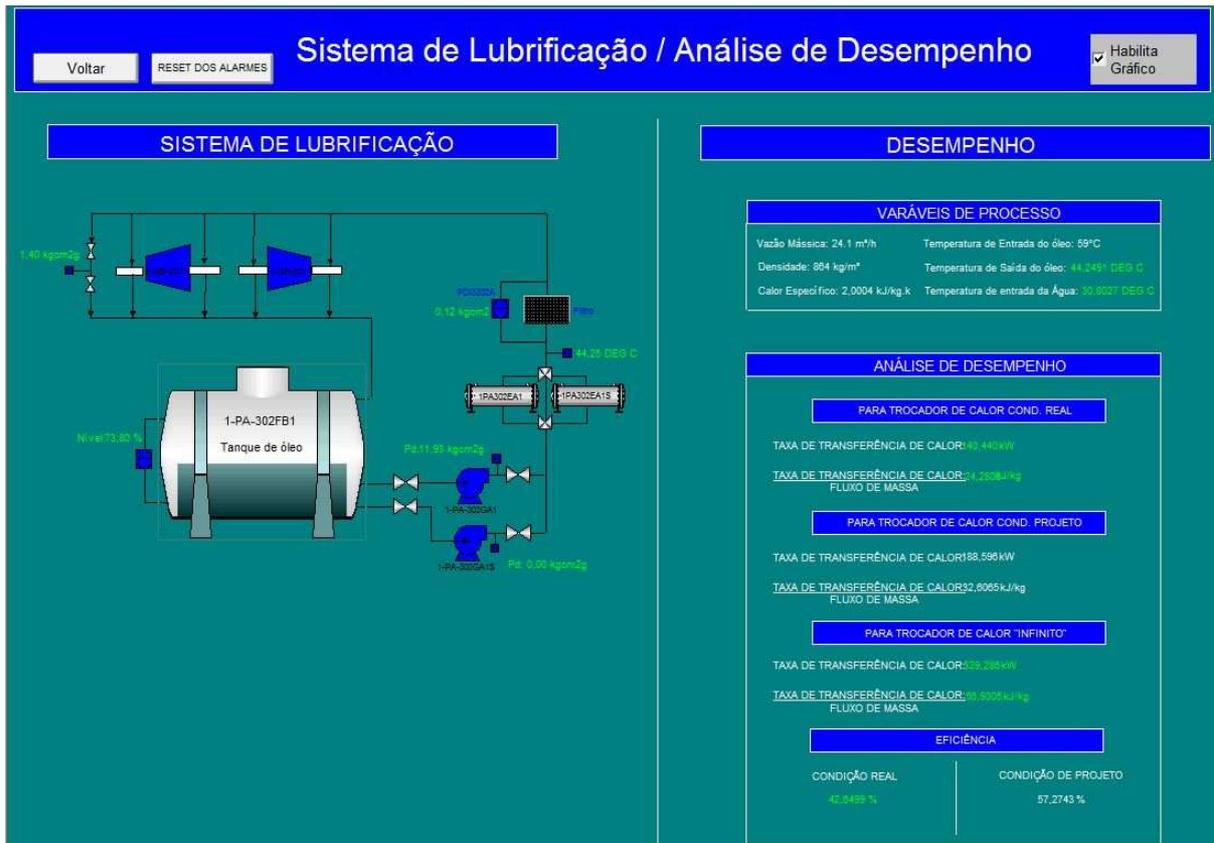


Figura 30: Sistema de Lubrificação – Arquitetura de Monitoramento

Para que todos esses parâmetros e componentes possam ser analisados é necessário que exista confiabilidade nas informações extraídas pelos instrumentos, visando à essa condição, foi criada uma última tela que apresenta o funcionamento dos instrumentos. A base para a criação desta tela é a ocorrência de falsas leituras que, geralmente, apresentam valores que destoam do padrão operacional do instrumento.

Duas relações foram utilizadas para capturar uma falsa leitura, a primeira delas utiliza como base para os alarmes o banco de dados, que nos fornece um histórico de operação normal para este instrumento. A segunda é uma relação entre instrumentos da mesma família e do mesmo estágio de compressão, ou seja, os instrumentos do primeiro estágio que medem pressão na sucção e na descarga serão relacionados entre si e os de temperatura da mesma forma.

A segunda relação também produz um padrão operacional para instrumentos da mesma família, pois variações na sucção produzem efeitos na descarga do estágio, caso esses efeitos não estejam sendo medidos pelos instrumentos, mesmo

para grandes variações, um dos instrumentos pode estar em falha e a equipe de instrumentação deve ser acionada para verificar a ocorrência. A Tela pode ser vista na Figura 31.

Módulo Gestão

Avaliação dos Instrumentos

Voltar

COMPRESSOR				
INSTRUMENTO ANALISADO	TAG	"VALOR MEDIDO" X "HISTÓRICO" (kk < xx.xx < yy)	RELACIONADO COM OUTRO INSTRUMENTO	
			DENOMINAÇÃO	COEFICIENTE DA RELAÇÃO
PRESSIONAMENTO DE SUÇÃO 1º STG	1P13012.PV	5,5 <= 5,69775 <= 6,2	PRESSIONAMENTO DE DESCARGA 1º STG	0,305 <= 0,33333 <= 0,34
PRESSIONAMENTO DE DESCARGA 1º STG	1P13013.A.PV	17,3 <= 18,259 <= 18,75	PRESSIONAMENTO DE SUÇÃO 1º STG	
TEMPERATURA DE SUÇÃO 1º STG	1T13055.PV	27,0 <= 34,0559 DEGS <= 37,0	TEMPERATURA DE DESCARGA 1º STG	0,195 <= 0,22222 <= 0,265
TEMPERATURA DE DESCARGA 1º STG	1T13052.A.PV	<= 149,0	TEMPERATURA DE SUÇÃO 1º STG	
VAZÃO MÁSSICA DE SUÇÃO 1º STG	1F13041.A.PV	11,0 <= 12,2592 <= 18,5	VAZÃO MÁSSICA DE DESCARGA 2º STG	0,325 <= 0,34333 <= 0,695
VAZÃO MÁSSICA DE DESCARGA 2º STG	1F13031.PV	11,5 <= 12,2635 <= 18,5	VAZÃO MÁSSICA DE SUÇÃO 1º STG	
TEMPERATURA DE SUÇÃO 2º STG	1T13010.PV	29,0 <= 35,5779 DEGS <= 43,0	TEMPERATURA DE DESCARGA 2º STG	0,2 <= 0,25556 <= 0,3
TEMPERATURA DE DESCARGA 2º STG	1T13010.PV	<= 150,0	TEMPERATURA DE SUÇÃO 2º STG	
PRESSIONAMENTO DE SUÇÃO 2º STG	1P13011.A.PV	17,2 <= 18,259 <= 18,65	PRESSIONAMENTO DE DESCARGA 2º STG	0,38 <= 0,33333 <= 0,42
PRESSIONAMENTO DE DESCARGA 2º STG	1P13012.PV	45,5 <= 48,2593 <= 47,5	PRESSIONAMENTO DE SUÇÃO 2º STG	

TURBINA				
INSTRUMENTO ANALISADO	TAG	"VALOR MEDIDO" X "HISTÓRICO" (kk < xx.xx < yy)	RELACIONADO COM OUTRO INSTRUMENTO	
			DENOMINAÇÃO	COEFICIENTE DA RELAÇÃO
PRESSIONAMENTO DE SUÇÃO	1P13022.PV	39,0 <= 41,4275 <= 42,0	PRESSIONAMENTO DE DESCARGA	0,088 <= 0,10000 <= 0,12
PRESSIONAMENTO DE DESCARGA	1P13022.PV	3,8 <= 10,3775 <= 4,4	PRESSIONAMENTO DE SUÇÃO	
TEMPERATURA DE SUÇÃO	1T13023.PV	300 <= 38,334 DEGS <= 390	TEMPERATURA DE DESCARGA	0,4 <= 0,60004 <= 0,6
TEMPERATURA DE DESCARGA	1T13022.PV	<= 195	TEMPERATURA DE SUÇÃO	
VAZÃO MÁSSICA DE SUÇÃO	1F13019.PV	20,0 <= 25,258 <= 33,0	VAZÃO MÁSSICA DE DESCARGA	0,8 <= 0,8481 <= 1,1
VAZÃO MÁSSICA DE DESCARGA	1F13019.PV	23,0 <= 25,258 <= 30,0	VAZÃO MÁSSICA DE SUÇÃO	

Figura 31: Avaliação dos Instrumentos – Arquitetura de Monitoramento

5.5 – Primeiras conclusões

Neste momento serão apresentados os gráficos de performance do equipamento para que se visualize como o equipamento se comportou ao longo das duas campanhas, a primeira com início em 2005 e fim em 2011 e a segunda com fim previsto para 2017. Além dos gráficos de desempenho, serão apresentados inicialmente alguns gráficos que mostram o comportamento do equipamento ao longo do período.

Inicialmente será demonstrada a sazonalidade da temperatura e as flutuações das pressões de sucção e descarga que o compressor está exposto, os gráficos apresentados são referentes ao 1º estágio, no entanto, o mesmo ocorre com o 2º estágio do equipamento.

Nos gráficos da Figura 32, pode se observar como a temperatura varia ao longo do ano, os verões podem ser identificados pelos picos presentes no gráfico e os invernos pelos vales. Já os gráficos da Figura 33 apresentam as flutuações da pressão que ocorreram durante a operação do equipamento, pode-se observar uma característica de se comportar de forma constante ao longo da campanha.

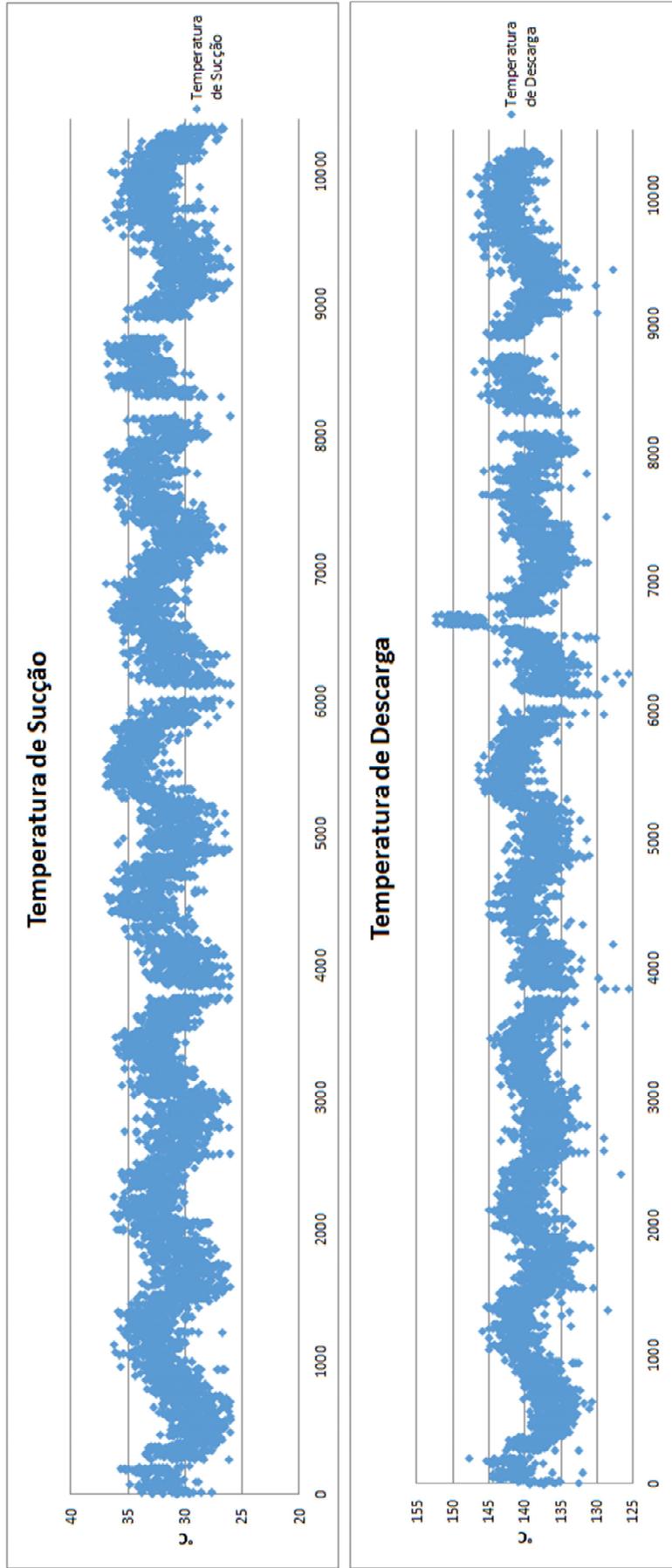


Figura 32: Sazonalidade das temperaturas de sucção e descarga do 1º estágio

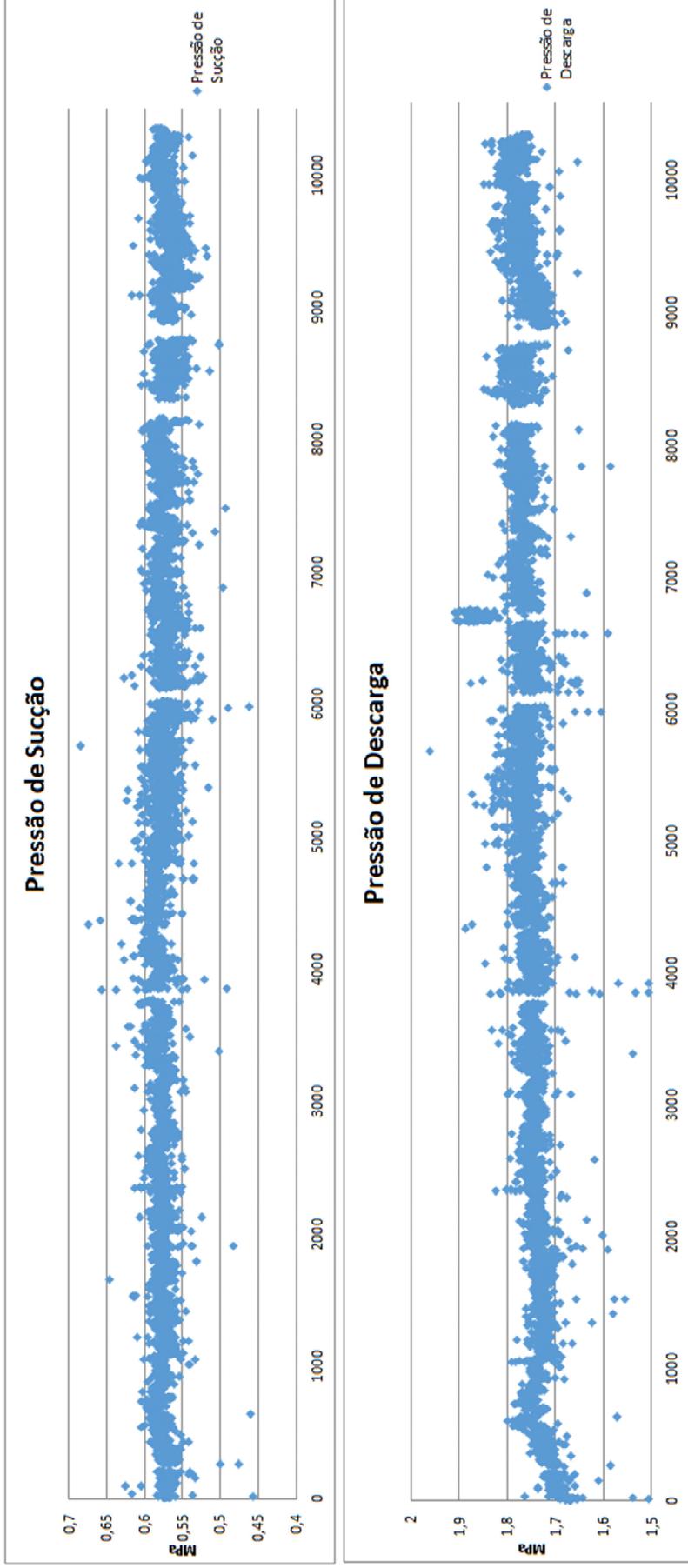


Figura 33: Pressão de sucção e descarga do 1° estágio

Pode-se observar pelos gráficos da Figura 32 que as temperaturas de sucção e descarga do compressor são afetadas diretamente pelas estações do ano. Contudo, como o compressor está sendo igualmente afetado por essas flutuações da temperatura, não se observa uma relação direta entre as estações do ano e a eficiência do compressor. As Figuras 34 e 35 irão apresentar a eficiência politrópica do equipamento ao longo das duas campanhas e poder-se-á confirmar a relação descrita acima.

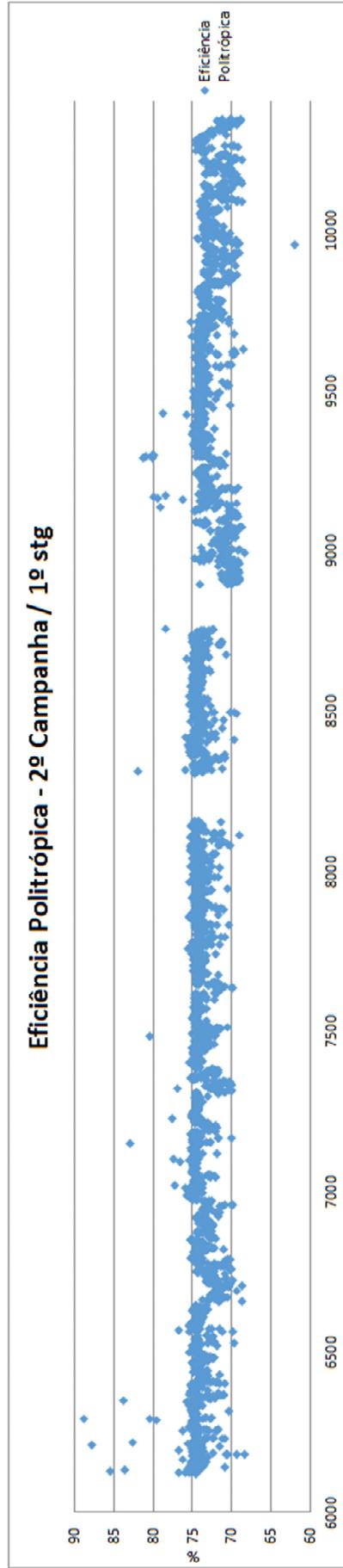
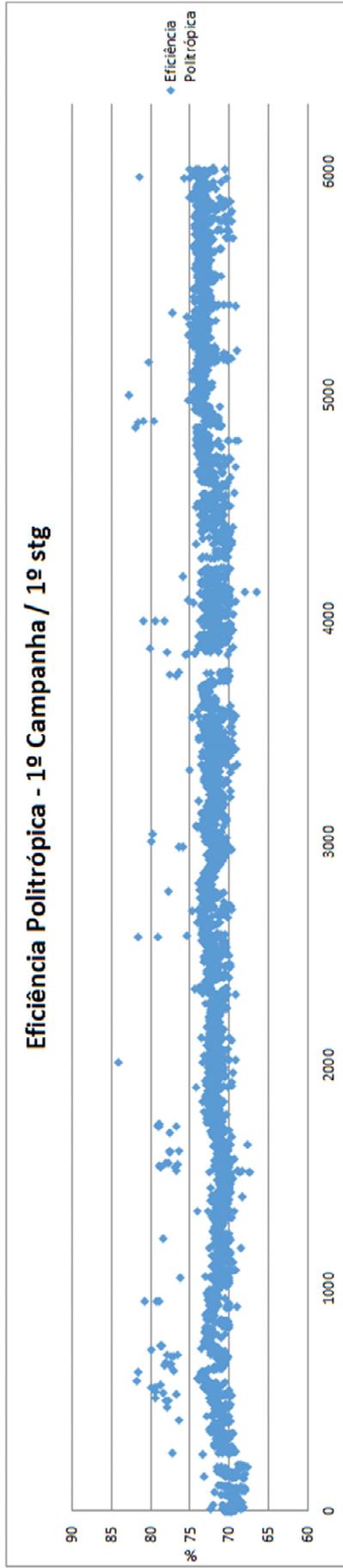


Figura 34: Eficiência Poltrópica 1º e 2º Campanha - 1º stg

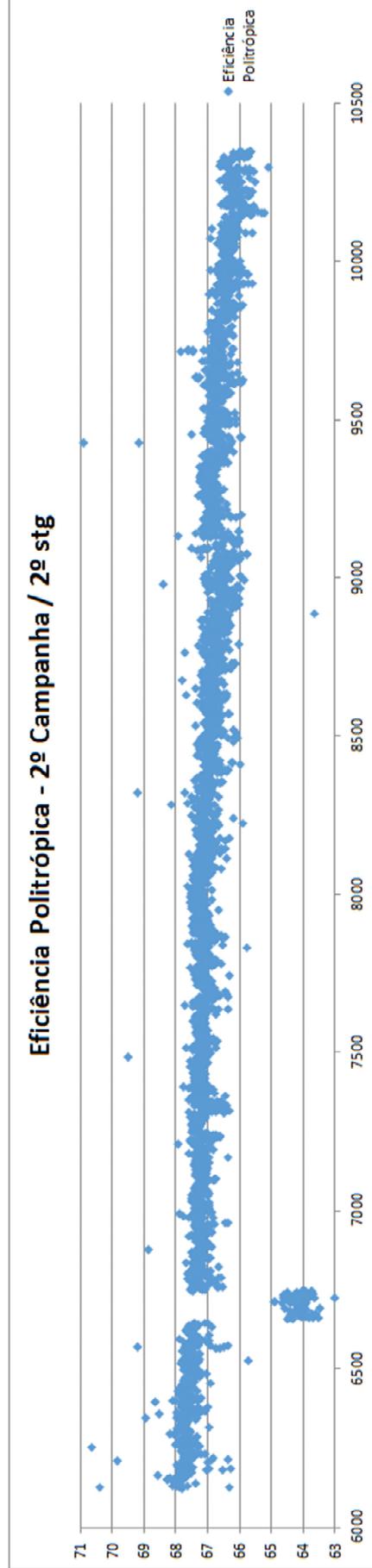
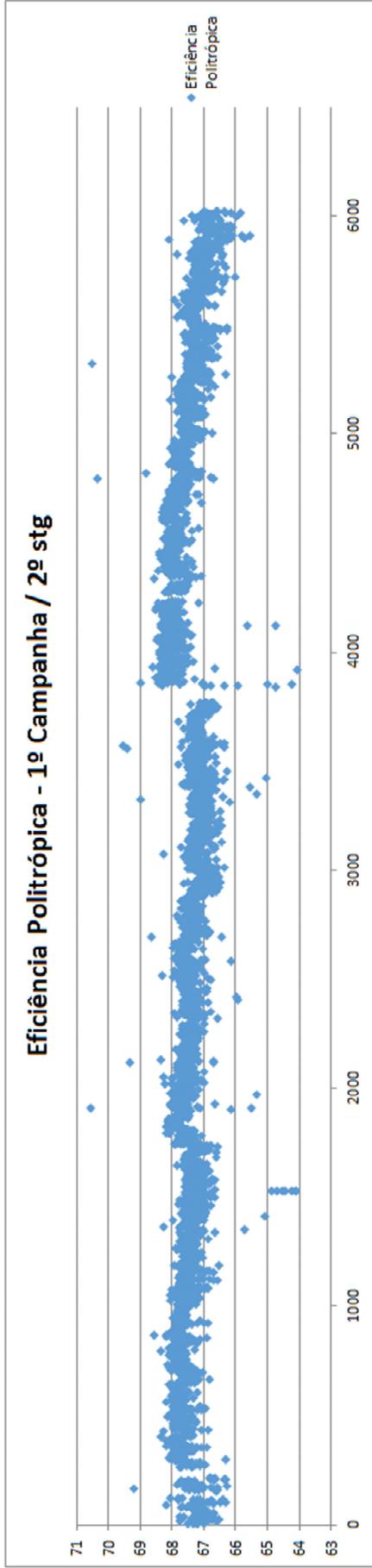


Figura 35: Eficiência Politrópica 1º e 2º Campanha - 2º stg

Através dos gráficos apresentados nas Figuras 34 e 35, tem-se a constatação que o compressor possui uma discreta tendência a perder desempenho ao longo de campanha. Este fato torna-se curioso quando observam-se outros compressores em planta petroquímicas durante tempo de campanha semelhante. Enquanto a maioria dos equipamentos apresentam grandes perdas de eficiência, o compressor analisado praticamente não exibe estes sinais. Isto pode ser explicado por se tratar de um compressor de metano refrigerante e este ser considerado um gás limpo, que apresenta pouca tendência de incrustar nas superfícies do equipamento, não afetando de forma significativa a operação do mesmo.

Seguindo com o raciocínio do parágrafo anterior, a eficiência politrópica do Compressor 1-GB-301 tem tendência a estar "constante" ao longo da operação do equipamento. Essa tendência comprova a relação descrita anteriormente, em que a sazonalidade da temperatura de sucção e descarga de cada estágio não produz, isoladamente, perda de eficiência. No entanto, não é possível garantir que o desempenho deste compressor não seja afetado por variações exclusivas nas temperaturas de sucção ou nas temperaturas de descarga, ou ainda, por flutuações simultâneas de pressão e temperatura. Por esta razão, se faz necessário utilizar uma metodologia que permita identificar os principais influenciadores no desempenho do equipamento.

O próximo capítulo apresenta a metodologia de Análise de Correspondência para a caracterização dos principais influenciadores no desempenho do equipamento.

Capítulo 6

6 – Análise de Correspondência e Resultados

Conforme foi apresentado no capítulo anterior, existe a necessidade de se conhecer os principais parâmetros operacionais capazes de prover alterações significativas no desempenho do equipamento. Pode-se entender que os parâmetros operacionais que apresentarem maior correlação com o desempenho do equipamento, são os mais prováveis de afetá-lo.

Sendo assim, o objetivo deste capítulo é utilizar a ferramenta de A.C. para caracterizar dentre os parâmetros operacionais analisados quais possuem maior afinidade, ou seja, maior correlação com a eficiência do compressor.

6.1 – Premissas

Para o desenvolvimento da A.C. é necessário que, inicialmente, o banco de dados seja refinado, a fim de produzir uma matriz indicadora que melhor represente as condições operacionais do equipamento. A matriz indicadora é uma matriz que dispõe as variáveis nas colunas e os casos (objetos) nas linhas.

As variáveis serão as informações extraídas de todos os instrumentos (ver Tabelas 06 e 07), dispostos em três casos; baixo, médio e alto. A divisão entre baixo, médio e alto, se faz necessária para produzir uma análise mais refinada. Já os casos, ou objetos, são todas as medições que foram geradas ao longo dos anos de operação e que compõem o banco de dados.

Para a construção da matriz indicadora a partir do banco de dados é necessário garantir que este esteja próprio para ser analisado estatisticamente, sendo assim, faz-se necessário realizar as seguintes ações:

- O banco de dados não pode possuir informações zeradas e negativas, os casos que apresentarem essas ocorrências devem ser excluídos (devido à natureza do processo e às características da máquina, casos com dados zerados ou negativos são entendidos como equipamento parado ou erro de instrumento);
- O banco de dados não pode apresentar informações que não sejam numéricas, casos como esses deveriam ser excluídos (existem ocorrências que a comunicação do instrumento com o servidor apresentou falha, exibindo a seguinte mensagem: “Valor = 0 / I/O Timeout”);
- Casos com vazões inferiores a 11 t/h e superiores a 18 t/h serão excluídos por não representarem as condições normais de operação do equipamento (casos como esses são vistos como momentos antes de parada de equipamento ou picos de operação, representam 2,5% do banco de dados);
- Os instrumentos de medição de temperatura e vibração dos mancais, assim como, os instrumentos de medição de deslocamento do eixo serão representados por suas médias. (Essa ação será importante mais adiante, pois irá reduzir o número de variáveis a serem analisadas, sem que haja prejuízo de informação, já que cada grupo [Temperatura dos mancais, Vibração dos mancais e Deslocamento do Eixo] apresenta leituras de forma semelhante e próxima).

Após essas medidas utilizou-se uma ferramenta estatística para avaliar a dispersão dos dados e verificar a qualidade do mesmo. O Coeficiente de Variação (C.V.) é uma ferramenta que utiliza o desvio padrão de cada variável e sua média para verificar a dispersão dos dados e avaliar se o conjunto pode ser analisado estatisticamente sem que a dispersão influencie os resultados. (CALADO, 2013)

$$C.V. = \frac{\text{Desvio - Padrão}}{\text{Média}} \quad (11)$$

Com auxílio da Equação 11 calculou-se o C.V. de cada variável do banco de dados, chegando aos seguintes valores:

Tabela 09: Coeficiente de Variação

Variáveis	C.V.
Vazão GG (t/h)	0,101
Temp. Sucção (°C)	0,065
Pressão Sucção (kgf/cm ² g)	0,021
Temp. Desc. (°C)	0,021
Pressão Desc. (kgf/cm ² g)	0,017
Média da Temperatura dos Mancais	0,025
Média da Vibração dos Mancais	0,071
Média do Deslocamento do Eixo	0,357
Velocidade de rotação	0,019
Np	0,021

Ainda de acordo com Calado (2013), tem-se a seguinte relação para o C.V.

Tabela 10: Coeficiente de Variação – Relação dos Resultados

Coef. De Variação	Estado
CV < 0,1	Ótimo (Baixa Dispersão)
0,1 < CV < 0,2	Bom (Média Dispersão)
0,2 < CV < 0,3	Ruim (Alta Dispersão)

Ao comparar as Tabelas 09 e 10 percebe-se que todas as variáveis apresentam baixa dispersão, exceto pela variável “Média do Deslocamento do Eixo”, esse parâmetro corresponde ao deslocamento do eixo do compressor. O deslocamento do eixo é afetado diretamente pelo desgaste dos mancais, sendo assim, quando existe a necessidade da troca do mancal, o eixo é reposicionado em sua posição inicial e existe uma grande variação desse parâmetro.

Durante a parada geral de 2011, foi feita uma revisão geral no compressor 1-GB-301, que inclui a troca de todos os mancais. Este fato explica a alta dispersão apresentada por esse parâmetro, que além variar continuamente com o desgaste do mancal é sensivelmente afetado na troca do mesmo.

6.2 – Construção da Matriz Indicadora

Após a execução das medidas mencionadas anteriormente, o banco de dados pode ser trabalhado para que se produza a matriz indicadora. Por escolha do autor, visando realizar uma análise estatística mais refinada, decidiu-se dividir o range de cada variável em 3 grupos; baixo, médio e alto. Sendo assim a Matriz Indicadora terá as seguintes variáveis:

Tabela 11: Nova Configuração das Variáveis

Variáveis Iniciais	Nova Configuração das Variáveis	Range	Código
Vazão GG (t/h)	Vazão - Baixa (t/h)	11 - 13.3	VZB
	Vazão - Média (t/h)	13.3 - 15.6	VZM
	Vazão - Alta (t/h)	15.6 - 18	VZA
Temp. Sucção (°C)	Temp. Sucção - Baixa (°C)	26 - 30.3	TSB
	Temp. Sucção - Média (°C)	30.3 - 34.6	TSM
	Temp. Sucção - Alta (°C)	34.6 - 39	TSA
Pressão Sucção (kgf/cm ² g)	Pressão Sucção - Baixa (kgf/cm ² g)	4.6 - 5.4	PSB
	Pressão Sucção - Média (kgf/cm ² g)	5.4 - 6.1	PSM
	Pressão Sucção - Alta (kgf/cm ² g)	6.1 - 6.9	PSA
Temp. Desc. (°C)	Temp. Desc. - Baixa (°C)	113 - 126.3	TDB
	Temp. Desc. - Média (°C)	126.3 - 139.6	TDM
	Temp. Desc. - Alta (°C)	139.6 - 153	TDA
Pressão Desc. (kgf/cm ² g)	Pressão Desc. - Baixa (kgf/cm ² g)	13.9 - 15.76	PDB
	Pressão Desc. - Média (kgf/cm ² g)	15.76 - 17.62	PDM
	Pressão Desc. - Alta (kgf/cm ² g)	17.62 - 19.5	PDA
Média da Temperatura dos Mancais (°C)	Média da Temperatura dos Mancais – Baixa	66 - 73.5	MTMB
	Média da Temperatura dos Mancais – Média	73.5 - 81.1	MTMM
	Média da Temperatura dos Mancais – Alta	81.1 - 88.6	MTMA
Média da Vibração dos Mancais (microns/s)	Média da Vibração dos Mancais – Baixa	5.2 - 6.2	MVMB
	Média da Vibração dos Mancais – Média	6.2 - 7.2	MVMM
	Média da Vibração dos Mancais – Alta	7.2 - 8.3	MVMA
Módulo da Média do Deslocamento do Eixo (microns)	Módulo da Média do Deslocamento do Eixo - Baixa	49.5 - 125.3	DEB
	Módulo da Média do Deslocamento do Eixo - Média	125.3 - 201	DEM
	Módulo da Média do Deslocamento do Eixo - Alta	201 - 277	DEA
Velocidade de Rotação (RPM)	Velocidade de Rotação – Baixa	11575 - 12332	RPMB
	Velocidade de Rotação – Média	12332 - 13089	RPMM
	Velocidade de Rotação – Alta	13089 - 13847	RPMA
Np (%)	Eficiência – Baixa	67.4 - 72	EFICB
	Eficiência – Média	72 - 75	EFICM
	Eficiência – Alta	75 - 81	EFICA

O range das variáveis foi definido através do banco de dados, a menor e a maior medição correspondem, respectivamente, ao limite inferior e o limite superior do range. Por fim, este foi dividido igualmente em três partes para cada variável, exceto pela variável eficiência que teve sua divisão baseada no data sheet do equipamento (Anexo I).

Tendo as variáveis definidas e os ranges que elas comportam, basta verificar para cada variável os casos existentes e compor a Matriz Indicadora. Em uma planilha do Excel, coloca-se lado-a-lado a matriz do banco de dados e futura matriz indicadora com suas variáveis, utilizando-se dos filtros do Excel é possível verificar as variáveis que cada caso se enquadra e para estas, coloca-se o número 1 na célula correspondente. Todas as células do caso analisado que ficarem em branco devem ser preenchidas com o número 0.

Após a conclusão desta etapa, a matriz indicadora está pronta para ser inserida no programa de análise escolhido.

6.3 – Statistica® 7

O programa utilizado para realizar a A.C. é o STATISTICA® 7, o software é um programa integrado para gerenciar análises estatísticas e Bases de Dados, caracterizando uma ampla seleção do processo analítico, do básico ao avançado, para as mais diversas áreas – Ciências Biomédicas, Biológicas, Engenharias, Ciências Sociais, Agrárias - permitindo a realização de Data Mining (Mineração de Dados). (OGLIARI & PACHECO, 2011)

O sistema não inclui somente procedimentos estatísticos e gráficos gerais, mas, também, módulos especializados (Análise de Regressão, Análise de Sobrevivência, Séries Temporais, Análise Fatorial, Análise Discriminante e diversos outros módulos). Difícilmente, o usuário necessitará de todos os módulos oferecidos pelo STATISTICA® para a análise do seu trabalho, e será, a partir de sua criatividade e conhecimento teórico, que chegará as respostas dos seus objetivos. (OGLIARI & PACHECO, 2011)

6.4 – Análise

6.4.1 – Análise Inicial / Definição das Variáveis

Antes de realizar a A.C. dentro do STATISTICA® 7, é interessante avaliar a Matriz Indicadora para identificar possíveis simplificações. A matriz indicadora inicial possui 30 variáveis (Tabela 11), dentre elas estão as variáveis correspondentes a eficiência do compressor (“Eficiência – Baixa” ; “Eficiência – Média” ; “Eficiência – Alta”).

Identificar os parâmetros que mais se correlacionam para que o compressor tenha um desempenho baixo ou médio, não é interessante do ponto de vista econômico e operacional, o foco do estudo será identificar os parâmetros que mais se correlacionam com um alto desempenho e, assim, identificar os parâmetros mais influenciadores.

Tendo em mente o que foi mencionado no parágrafo anterior, pode-se excluir da análise as duas variáveis correspondentes a “Eficiência – Baixa e Média”. Além disso, foi realizado um levantamento dos casos em que houve alto desempenho do equipamento (baseados na variável “Eficiência-Alta”) e verificado o número de casos que cada variável apareceu. Sendo observado para este levantamento que existem variáveis que não foram observadas em nenhum ou em pouquíssimos casos. Ou seja, existem variáveis que aparecem em menos que 2% dos casos de alto desempenho, indicando uma baixa relação entre eles.

Sendo assim, além das variáveis de “Eficiência – Baixa e Média”, serão excluídas da A.C. as variáveis de “Média das Temperaturas dos Mancais – Baixa e Média das Temperaturas dos Mancais – Alta” e “Pressão de Descarga – Baixa”. A matriz indicadora após esta análise preliminar possui 25 variáveis disposta nas colunas e 9.199 casos dispostos nas linhas.

6.4.2 – Inércia X Número de Dimensões

Para realizar a A.C. é necessário definir o número de dimensões a ser utilizado ou qual a inércia desejada. Essa etapa é necessária, pois, quanto maior o número de dimensões, maior a inércia e melhor a Análise de Correspondência representa a matriz Indicadora. No entanto, maior será o número de nuvens de pontos existentes e o tempo de processamento necessário.

Para auxiliar tal decisão é importante observar o gráfico da Figura 36, onde é possível observar a relação entre número de dimensões e a inércia de cada uma delas.

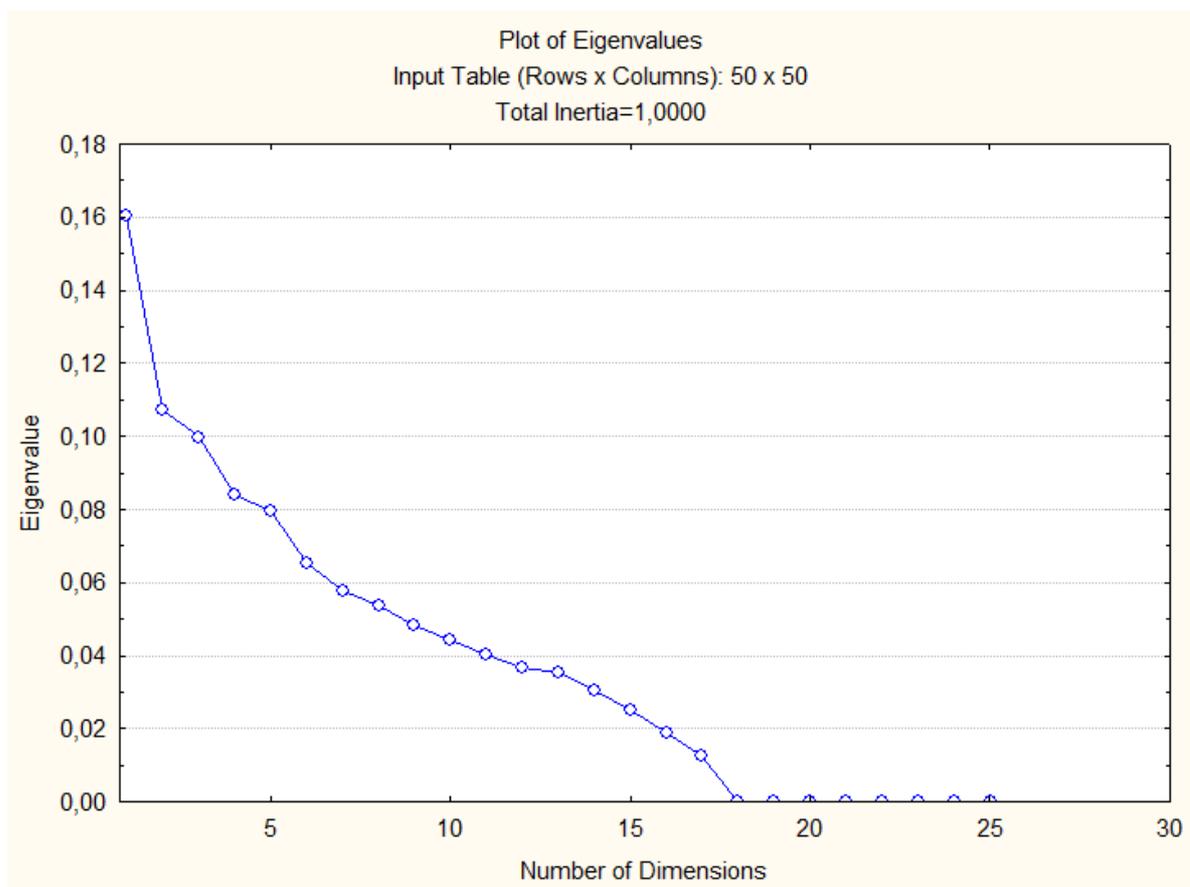


Figura 36: Inércia x Número de Dimensões

É possível observar que conforme o número de dimensões aumenta, a inércia individual da nova dimensão é menor, ou seja, não é interessante utilizar as 25

dimensões disponíveis pois elas representam um maior tempo de processamento e número de nuvens de pontos, sem corresponder a um ganho de efetivo de representação da Matriz Indicadora.

Sendo assim, deve-se optar por um número de dimensões ou valor de inércia que consiga representar de forma satisfatória a Matriz Indicadora, sem que para isso devam ser analisadas muitas dimensões. A escolha do autor é para uma inércia de 90% e este corresponde a utilização de 13 dimensões, como pode ser observado na Figura 37.

Eigenvalues and Inertia for all Dimensions (Matriz Indicadora para STATISTICA) Input Table (Rows x Columns): 50 x 50 (Burt Table) Total Inertia=1,0000					
Number of Dims.	Singular Values	Eigen-Values	Perc. of Inertia	Cumulatv Percent	Chi Squares
1	0,400337	0,160269	16,02693	16,0269	75267,19
2	0,327703	0,107389	10,73893	26,7659	50433,18
3	0,316093	0,099915	9,99150	36,7574	46923,05
4	0,289848	0,084012	8,40121	45,1586	39454,55
5	0,282367	0,079731	7,97311	53,1317	37444,05
6	0,255782	0,065425	6,54245	59,6741	30725,28
7	0,240455	0,057818	5,78184	65,4560	27153,23
8	0,232003	0,053825	5,38253	70,8385	25277,94
9	0,219850	0,048334	4,83342	75,6719	22699,16
10	0,210425	0,044279	4,42788	80,0998	20794,65
11	0,200217	0,040087	4,00867	84,1085	18825,88
12	0,191580	0,036703	3,67028	87,7788	17236,73
13	0,187802	0,035270	3,52695	91,3057	16563,61
14	0,174148	0,030328	3,03275	94,3385	14242,69
15	0,158192	0,025025	2,50248	96,8409	11752,38
16	0,137167	0,018815	1,88149	98,7224	8836,03
17	0,112529	0,012663	1,26627	99,9887	5946,76
18	0,010634	0,000113	0,01131	100,0000	53,11
19	0,000000	0,000000	0,00000	100,0000	0,00
20	0,000000	0,000000	0,00000	100,0000	0,00
21	0,000000	0,000000	0,00000	100,0000	0,00
22	0,000000	0,000000	0,00000	100,0000	0,00
23	0,000000	0,000000	0,00000	100,0000	0,00

Figura 37: Inércia Acumulada x Número de Dimensões

Com a escolha do número de dimensões a serem analisadas, todas as informações necessárias para executar a A.C. na Matriz Indicadora foram obtidas. O

próximo passo é realizar a A.C. e plotar as nuvens de pontos, que corresponde à combinação de todas as variáveis duas a duas.

6.4.3 – As Nuvens de Pontos

Serão produzidas todas as combinações possíveis para as 13 dimensões, ou seja, o programa irá criar uma nuvem de pontos, com todas as variáveis para cada combinação de dimensão, duas a duas. Produzindo um total de 78 nuvens de pontos semelhantes às exibidas nas Figuras 38, 39 e 40

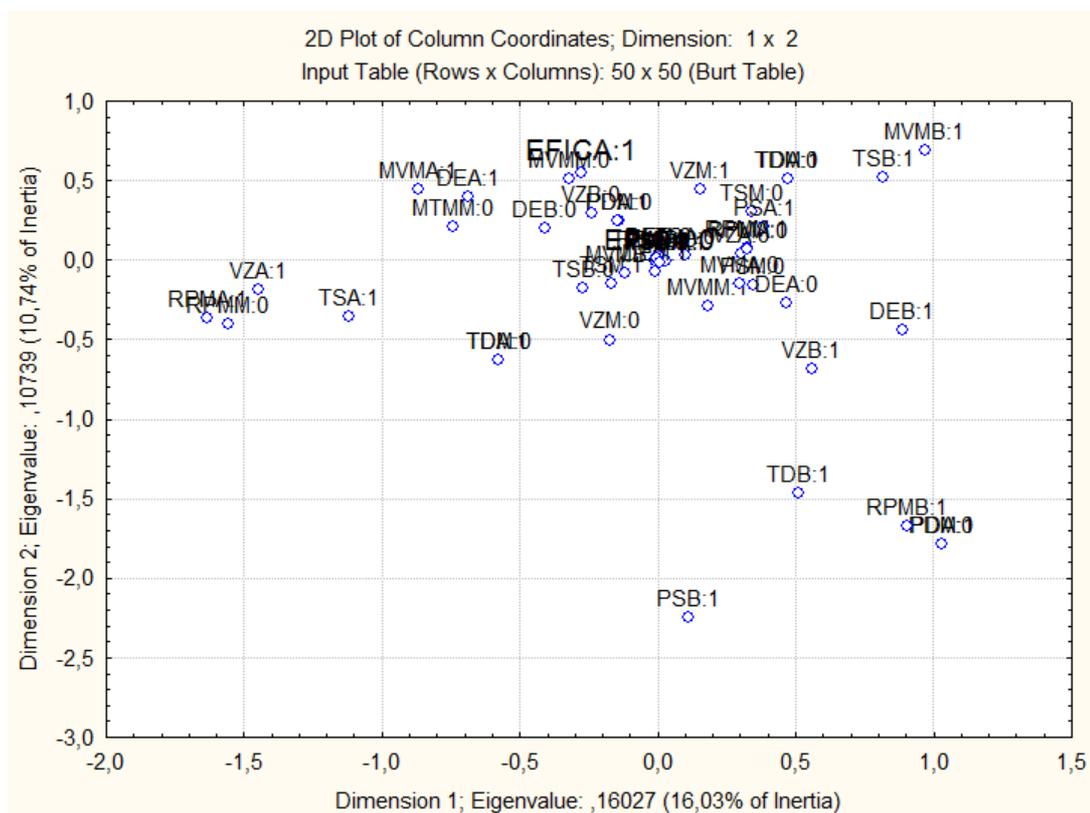


Figura 38: Nuvem de Pontos – 1 x 2

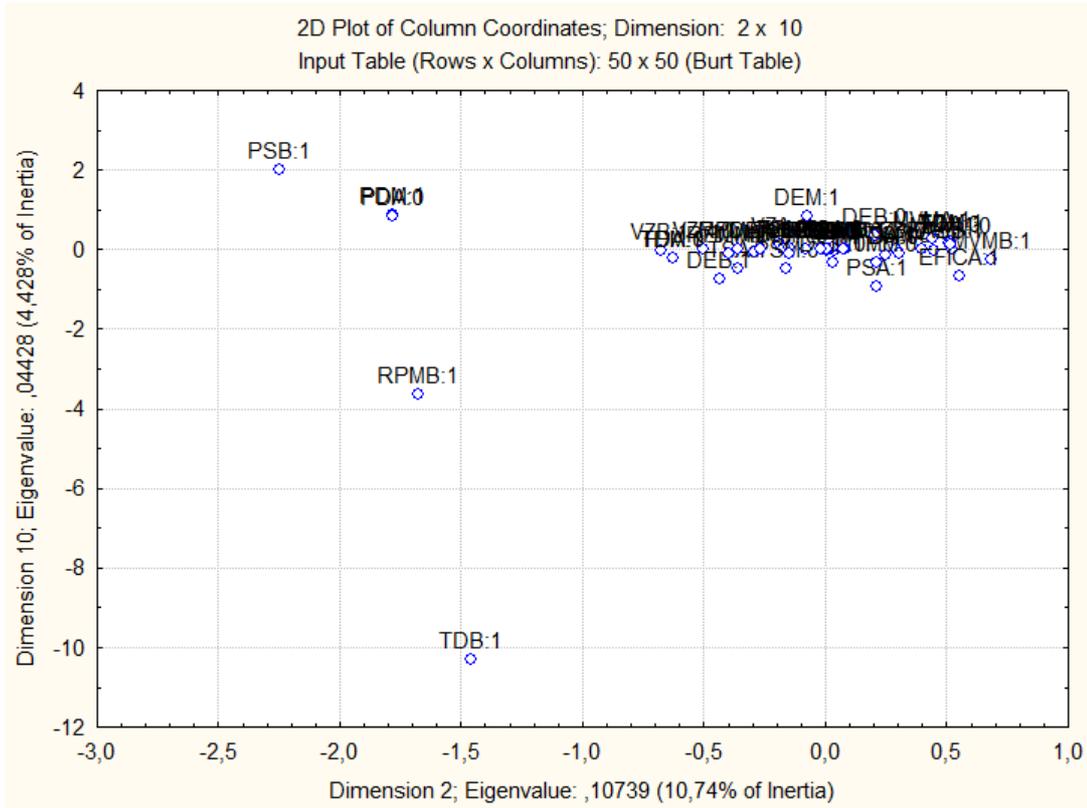


Figura 39: Nuvem de Pontos – 2 x 10

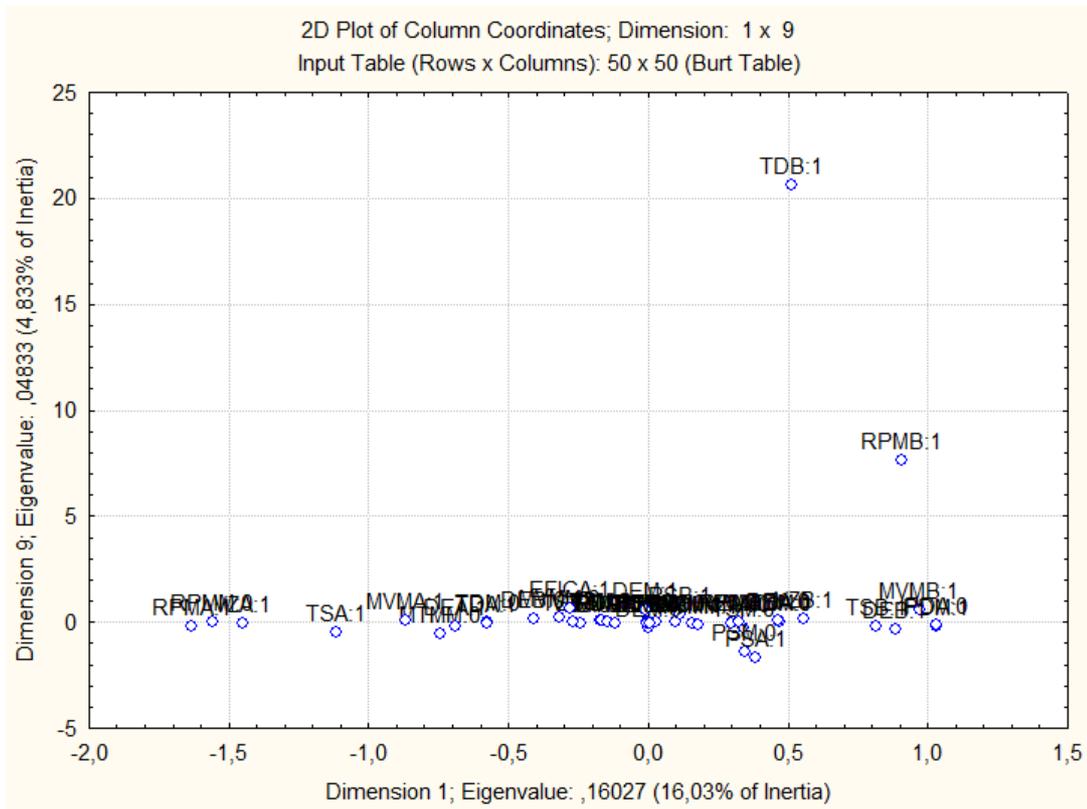


Figura 40: Nuvem de Pontos – 1 x 9

Como pode ser observado nas Figuras 38, 39 e 40, não é possível definir quais variáveis possuem maior correlação com a eficiência somente observando as nuvens de pontos. A cada nova combinação, a disposição das variáveis altera-se suficientemente para impedir a identificação de qualquer correlação.

Sendo assim, torna-se necessário utilizar uma metodologia para identificar as correlações existentes e as variáveis com maior possibilidade de influenciar o desempenho do equipamento. Optou-se por verificar as correlações existentes através das coordenadas de cada variável, em cada nuvem de pontos.

6.4.4 – Métrica euclidiana e Resultados

Uma menor ou maior distância entre os pontos de uma nuvem pode indicar, respectivamente, correlação ou não entre as categorias das variáveis. Assim sendo, faz-se necessário definir uma métrica para medir tal distância. Usualmente, utiliza-se a distância euclidiana, a qual tem como base o Teorema de Pitágoras para definir a distância entre dois pontos. (SILVA, 2012)

Define-se a distância euclidiana entre dois vetores $R_1 = [x_1 \ y_1 \ z_1]$ e $R_2 = [x_2 \ y_2 \ z_2]$, como:

$$d(R_1, R_2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (12)$$

Com base no que foi dito no parágrafo anterior e na Equação 12, calcular-se-á a distância de cada variável à variável de “Eficiência – Alta”, em cada nuvem de pontos. Essa distância permitirá quantificar a cada nuvem de pontos, as variáveis que mais se correlacionam com a variável “Eficiência – Alta” e, como consequência, ao fim das 78 nuvens de pontos analisadas, ter-se-á quais variáveis têm maior possibilidade de alterar significativamente o desempenho do equipamento.

Para levantar as variáveis que mais se correlacionam com a variável “Eficiência – Alta” é preciso definir uma área limitante, que possa ser utilizada como referencial para o cálculo. Como os níveis de dispersão não são os mesmos (observe as escalas de cada eixo nas Figuras 38, 39 e 40), decidiu-se utilizar o

maior desvio padrão de cada combinação de dimensões, ou seja, para cada nuvem de pontos foi levantado o maior desvio padrão e este serviu de critério para criar a área limitante.

Através desse critério foi possível levantar as variáveis que tiveram mais ocorrências de correlação, ou seja, as que estiveram mais vezes próximas da variável “Eficiência – Alta”. Chegando até o resultado exibido na Tabela 12.

Tabela 12: Correlações

Somatório das Variáveis		
Variáveis	Códigos	Correlações
Média do Deslocamento do Eixo – Alta	DEA:1	30
Temperatura de Sucção - Baixa (°C)	TSB:1	27
Pressão de Descarga - Alta (kgf/cm ² g)	PDA:1	24
Pressão de Sucção - Média (kgf/cm ² g)	PSM:1	23
Média da Temperatura dos Mancais – Média	MTMM:1	20
Velocidade de Rotação – Média	RPMM:1	20
Vazão - Média (t/h)	VZM:1	19
Temperatura de Descarga - Alta (°C)	TDA:1	19
Média da Vibração dos Mancais – Alta	MVMA:1	19
Temperatura de Descarga - Média (°C)	TDM:1	18
Temperatura de Sucção - Média (°C)	TSM:1	16
Temperatura de Sucção - Alta (°C)	TSA:1	14
Média da Vibração dos Mancais – Média	MVMM:1	14
Vazão - Baixa (t/h)	VZB:1	12
Média do Deslocamento do Eixo – Média	DEM:1	12
Média da Vibração dos Mancais – Baixa	MVMB:1	11
Vazão - Alta (t/h)	VZA:1	10
Média do Deslocamento do Eixo – Baixa	DEB:1	9
Pressão de Sucção - Alta (kgf/cm ² g)	PSA:1	7
Velocidade de Rotação – Alta	RPMA:1	7
Pressão de Descarga - Média (kgf/cm ² g)	PDM:1	6
Pressão Sucção - Baixa (kgf/cm ² g)	PSB:1	1
Temperatura de Descarga - Baixa (°C)	TDB:1	1
Velocidade de Rotação – Baixa	RPMB:1	0

Através da Tabela 12, pode-se verificar como ocorreu a distribuição das correlações entre as variáveis e retirar algumas observações, algumas já esperadas e outras não.

- A variável “Média do Deslocamento do Eixo – Alta” já era esperada para estar entre as variáveis com mais correlações, isto porque no levantamento realizado para os casos de alto desempenho, esta variável aparece em 70% dos casos, indicando desde o início uma alta relação entre as variáveis.
- A variável “Temperatura de Sucção – Baixa” era esperada do ponto de vista teórico, apresentado no capítulo 2, seção 2.9.1.2.2.3. No entanto, no levantamento realizado para os casos de alto desempenho, esta variável é encontrada em menos casos que a variável “Temperatura de Sucção – Média”, sendo uma surpresa para o estudo.
- A variável “Pressão de Descarga – Alta” já era esperada para estar entre as variáveis com mais correlações, isto porque no levantamento realizado para os casos de alto desempenho, esta variável aparece em praticamente 90% dos casos, indicando desde o início uma alta relação entre as variáveis.
- A variável “Pressão de Sucção – Média” já era esperada para estar entre as variáveis com mais correlações, isto porque no levantamento realizado para os casos de alto desempenho, esta variável aparece em mais de 90% dos casos, indicando desde o início uma alta relação entre as variáveis. No entanto, outra observação é válida, do ponto de vista teórico, apresentado no capítulo 2, seção 2.9.1.2.2.3, a variável “Pressão de Sucção – Alta” deveria estar entre as variáveis com maiores correlações, isto porque representa uma maior vazão mássica devido ao aumento na densidade na sucção e um aumento de potência, e não isto não ocorre como pode ser visto na Tabela 12.
- A variável “Vazão – Média” não era esperada para estar entre as variáveis com mais correlações, isto porque no levantamento realizado para os casos de alto desempenho, esta variável é encontrada em menos da metade dos casos encontrados para a variável “Vazão - Alta”, sendo uma surpresa para o estudo.

Capítulo 7

7 – Conclusão

Quanto aos frutos do estudo, pode-se dizer que ele produziu dois resultados importantes. Após a conclusão do Sistema de Monitoramento na plataforma do PI Process Book®, aumenta-se a confiabilidade e a disponibilidade do equipamento através do monitoramento constante do equipamento, da construção de uma ferramenta que auxilia as análises de falha e da elaboração de alarmes para os parâmetros operacionais. Esse resultado atua de forma preventiva e reativa, e produz como consequência econômica a redução dos custos de manutenção.

O segundo resultado é a identificação das variáveis operacionais críticas, que permitirão aos engenheiros traçar ranges de operação mais adequados para o equipamento, tendo como alvo melhores níveis de desempenho. Este resultado atua de forma proativa e produz como consequência econômica ganho financeiro com o melhor desempenho do equipamento.

Como limitação para aplicação da ferramenta de Sistema de Monitoramento, destaca-se a necessidade da instrumentação adequada e da existência de plataforma semelhante à utilizada no PI Process Book®. Já para a aplicação a Análise de Correspondência na identificação das variáveis operacionais críticas, destaca-se a importância do banco de dados, que necessariamente precisa ser confiável e com histórico de dados adequado ao processo a ser analisado.

Como sugestão para pesquisas futuras, recomenda-se a realização de testes de performance no equipamento que possam comprovar os resultados obtidos na utilização da Análise de Correspondência.

Referências

ABRAMAM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MANUTENÇÃO. **A Manutenção Brasileira no Contexto Mundial**, editorial da Revista Manutenção Edição 98, editada por ABRAMAN; Página 12. Maio/Junho de 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Norma Brasileira Regulamentadora 5462. – **Confiabilidade e Manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.

BRANCO, G. – **A Organização, o Planejamento e o Controle da Manutenção**, Editora Ciência Moderna, 2008.

BRASIL, A. N. – **Teoria Geral das Máquinas de Fluxo**, UFPR, 2006. Disponível em http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM120/APOSTILA_MH/capitulo2_teorial_M_AQUINAS%20DE%20FLUXO.PDF Acessado em 23/04/2015.

BRASKEM – **Manual de Operação – Operação da Planta de Eteno**. Revisão 4, UNIB04 - Unidade de Duque de Caxias, 2013.

BRASKEM – **Setor Petroquímico: Mundo – Mercado Petroquímico Mundial**. Disponível em: <http://www.braskem-ri.com.br/o-setor-petroquimico#mercpetro> Acessado em 03/04/2015.

BRASKEM – **IT_1-GB-201_Tambor de Balanceamento**, Unidade de Duque de Caxias, Rio de Janeiro, 2015.

BRASKEM – **IT 5030-00164_Inspeção de Fornos de Pirólise**, Unidade de Duque de Caxias, Rio de Janeiro, 2014.

BROWN, R. N. **Compressors: Selecting & Sizing**. 3rd Ed., New York, Elsevier, 2005.

CALADO, V. – **Análise Multivariada de Dados**. Palestra do programa de pós-graduação em química. UFRJ, 2013. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=8nFTB0hgaRs> / Acessado em 15/10/2015.

CANAL PILOTO - **Por “dentro” dos motores a reação**. Disponível em: <http://canalpiloto.com.br/por-dentro-dos-motores-a-reacao/> Acessado em 09/06/2015

- ÇENGEL, Y. A. ; BOLES M. A. – **Termodinâmica**. 5ª Edição, Editora AMGH, 2006.
- CZERMAINSKI, A. B. C. – **Análise de Correspondência**, USP - Piracicaba-SP, 2004
- D'AVILA, S.G. – **A indústria petroquímica brasileira**, São Paulo, 2002. Disponível em <http://www.comciencia.br/> Acessado em 03/04/2015.
- DRESSER-RAND – **CCS-105 Training Guide for O&M Seminar on Centrifugal**. Olean/USA – 2001
- FALCO, Reinado – **Curso de Compressores**. Apostila do curso – Performance de grandes máquinas, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, [2009]. 89 p.
- FOGLIATTO, F. S. – **Manutenção e Confiabilidade**, Rio Grande do Sul, 2008. Disponível em http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/397_laminas_da_aula_1.pdf Acessado em 22/04/2015
- FUENTES, F. F. E. – **Metodologia para Inovação da Gestão de Manutenção Industrial**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- GE, General Electric Oil & Gas – **Compressors: a complete range of global solutions**. Diretório de produtos. Disponível em: http://www.geoilandgas.com/businesses/ge_oilandgas/en/prod_serv/prod/compressors/en/index.htm Acessado em 07/06/2015
- GREENACRE, M. J. – **Theory and applications of correspondence analysis**. Academic, London – 1984.
- GREENACRE, M.J. & HASTIE, T. – **The geometric interpretation of correspondence analysis**. J. Am. Statist. Assoc. 1987.
- GREENACRE, M. J. **Correspondence analysis Computational Statistics - Focus Article**, 2ª edição, 2010.
- HENN, E. A. L. – **Máquinas de Fluido**, 2ª edição, Editora UFSM, 2006.
- JULIANI, A. – **Turbomáquinas – Principais Modelos e Tipos Usados em Plantas de Separação de Gás: Teoria e Prática**. In: Encontro ABM, Encontro de Produtores

e Consumidores de Gases Industriais, 18. ABM S0214/P0018, São Paulo, São Paulo, 2003.

JUNIOR, A. G. M. – **Acionamento de Máquinas de Fluxo por Motores de Combustão Interna a Gás Natural**. Tese (Doutorado em Energia) Universidade de São Paulo, 2006.

KARDEC, A. ; FLORES, J. ; SEIXAS, E. – **Gestão Estratégica e Indicadores de Desempenho**. Rio de Janeiro: Qualitymark: ABRAMAN, 2002.

KARDEC, A. ; NASCIF, J. – **Manutenção Função Estratégica**, 4ª edição, Editora Quality Mark, 2009.

MECABO, L. – **Desenvolvimento de um Protótipo de Sistema Especialista para apoio à Manutenção de Turbocompressores Centrífugos de Gás Natural**. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

MOUBRAY, J. – **Reliability-centered maintenance**. London: Butterworth Heinemann, 1992.

NAITO, S. D. N. P. – **Análise de Correspondência Generalizada**, Dissertação de Mestrado em Bioestatística – Universidade de Lisboa, Lisboa. 2007.

NASSAR, W. R. ; DIAS, S. M. A. – **Evolução da Manutenção Planejada na Cosipa**. 23º Congresso Brasileiro de Manutenção / ABRAMAN – Associação Brasileira de Manutenção. 2008.

NÓBREGA, P. R. L. – **Proposta de Utilização de Práticas de Nível Mundial na Manutenção de Compressores Centrífugos**. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Metodista de Piracicaba, 2008.

NOGUEIRA, C. F. ; GUIMARÃES, L. M. ; SILVA, M. D. B. – **Manutenção Industrial: Implementação da Manutenção Produtiva Total (TPM)**. Disponível em <http://revistas.unibh.br/index.php/dcet/article/view/735/452> Revista e-Xacta – Uni.BH. Publicado em 30/07/2012 v. 5, n. 1 (2012). Acessado em 01/05/2015.

OGLIARI, P. J. ; PACHECO, J. A. - **Análise Estatística Usando o STATISTICA® 6.0**. – Material desenvolvido para os estudantes de graduação e pós-graduação. Universidade Federal Santa Catarina, 2011.

PASCHOAL, D. R. S. ; MENDONÇA, M. A. ; MORAIS, R. D. ; GITAHY, F. S. C. R., ; LEMOS, M.A. – **Disponibilidade e Confiabilidade: Aplicação da Gestão da Manutenção na Busca de Maior Competitividade**. Revista da Engenharia de Instalações no mar da FSMA, 2009.

PEREIRA, M. J. – **Engenharia de Manutenção, teoria e prática**. Editora Ciência Moderna, 2009.

PI SYSTEM – **PI Process Book – Manual de Treinamento**. Versão 2.31

PI SYSTEM – **PI Process Book – Manual de Treinamento**. Versão 3.0.2; 2004.

PRADO, M. V. B. – **Métodos de Análise de Correspondência Múltipla**. Tese (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) - Universidade Federal de Lavras, MG, 2012

SAMPAIO, A. – **TPM – Manutenção Produtiva Total**. Disponível em <http://www.mantenimentomundial.com/sites/mm/notas/TPMtotal.pdf> Acessado em 01/05/2015

SEIXAS, E. S. – **Manutenção Centrada na Confiabilidade - Estabelecendo a Política de Manutenção com Base nos Mecanismos de Falha dos Equipamentos**. Reliasoft Brasil, 2006.

SIEMENS - **Siemens Turbo Compressors (STC) - Integrally Geared Compressors**. Disponível em; [http://www.energy.siemens.com/co/en/services/industrial-applications/compressors/#content=%3Cfont%20class%3D%22%22%3ESiemens%20Turbo%20compressores%20\(STC\)%3C%2Ffont%3E](http://www.energy.siemens.com/co/en/services/industrial-applications/compressors/#content=%3Cfont%20class%3D%22%22%3ESiemens%20Turbo%20compressores%20(STC)%3C%2Ffont%3E) Acessado em 09/06/2015

SILVA. Y. V. – **Análise de Correspondência: Uma Abordagem Geométrica**. Tese de Pós-Graduação (Estatística Aplicada e Biometria) Universidade Federal de Viçosa, MG, 2012.

STATISTICA – **Correspondence Analysis Introductory Overview – Eletronic Manual**. Pacote de estatísticas e Software. StatSoft, 2008.

TAVARES, L. – **Excelência na Manutenção – Estratégias, Organização e Gerenciamento**. Salvador: Casa da Qualidade Edit. Ltda, 1996

VALADÃO, C. P. – **UN-RIO / ATP-MLS / TBM – Compressores Centrífugos**. Rio de Janeiro: Petrobrás, 2002.

ANEXO I: Data Sheet (Folha de Dados) do Compressor 1-GB-301

CUSTOMER : ABB LUMMUS GLOBAL-SNAMPROETTI
/ Rio Polimeros S. A.
PROJECT : Rio Polimeros Gas Chemical Complex
JOB NO. : 09480
P. O NO. : 09480-0501
TAG NO. : 1-GB-301
SERVICE NO. : METHANE REF.

DATA SHEET FOR 1-GB-301 METHANE REF. COMPRESSOR

MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.
HIROSHIMA MACHINERY WORKS

A3× SHEETS
A4× 15 SHEETS TOTAL 15 SHEETS (INCLUDING COVER)

客先送付分に本紙不要

TURBO MACHINERY ENG. DEPT. COMPRESSOR DESIGNING SECTION	
PM	S. Matsumoto
APPROVED	Y. Kawashima
CHECKED	M. Kita
PREPARED	A. Tasaki

C O P Y	L G I	L G I	機 械	組 立	素 形 材	機 生 管	夕 設	RS タ ー ボ	RS 電 産	コ 設	プ 設	機 品 証	機 材 購	控	SPECIFIED NO. 41B
	E	4+1		2			1		1	1	1		1		

ORDER	ITEM	DATE DRAWN
353302	002000	JUN. 11 '02
DRAWING NO. 796-11080		

REV. A B

(BZ)
(AZ)

B	Apr.19,'03	Issued as built.	<i>AT</i> A.T	<i>M.K.Y.K</i> M.K,Y.K	<i>S.M</i> S.M
A	Jan.23,'03	Revised per customer's comments.	A.T	M.K,Y.K	S.M
0	Jun.11,'02	1 st issue	A.T	M.K,Y.K	S.M
REV.	ISSUE DATA	DESCRIPTION	DWN.	CKD.	APPROV



RIO POLIMEROS
GAS CHEMICAL COMPLEX



ABB Lummus Global Inc.



Snamprogetti

TITLE:

DATA SHEET FOR 1-GB-301 METHANE REF. COMPRESSOR

P.O. N°.	09480-0501	SELLER P.O. N°.	353302	CODE 14
JOB N°.	09480	DWG N°.	09480-1-GB-301-0020A	REV.B
SCALE	N/A	SELLER DWG N°.	796-11080	Sh. of REV.B

ABB Lummus Global Inc.

ACTUAL PERFORMANCE



CENTRIFUGAL COMPRESSOR DATA SHEET (API 617-6TH) MKS UNITS				PAGE 1 OF 10	DIV. 0				
PRCJ. NO. 09480	TAG NO. 1-GB-301			NO. 0	Date 11-01-00	BY JCM	CHK'D	APPR KA	REVISION ISSUED FOR INQUIRY
REG. 09480-0501	P.O.	SUP.		1	04-02-02	KA		PCS	ISSUED FOR POR

1 APPLICABLE TO: PROPOSAL PURCHASE AS BUILT

2 FOR RIO POLIMEROS S.A. UNIT 520,000 MTA ETHYLENE PLANT

3 SITE RIO de JANEIRO, BRAZIL SERIAL NO.

4 SERVICE METHANE REFRIGERANT COMPRESSOR NO. REQUIRED ONE (1)

5 CONTINUOUS INTERMITTENT STAND BY DRIVER TYPE (3.1.1) BACK PRESSURE EXHAUST STEAM TURBINE

6 MANUFACTURER MHI MODEL 4V-9B DRIVER ITEM NO. 1-GB-301

7 NOTE: INFORMATION TO BE COMPLETED: BY PURCHASER BY MANUFACTURER

OPERATING CONDITIONS

(ALL DATA ON PER UNIT BASIS)						
NORMAL CONDITIONS CASE 1 - 520k MTA			NORMAL GUARANTEE POINT		105% NORMAL OVERSIZING	
			1 ST. SECTION	2 ND. SECTION	1 ST. SECTION	2 ND. SECTION
13 <input type="radio"/> GAS HANDLED (ALSO SEE PAGE 2)						
14 <input type="radio"/>						
15 <input type="radio"/> WEIGHT FLOW, Kg/hr (WET)			13,782	13,782	14,471	14,471
16 INLET CONDITIONS AT FLANGE						
17 <input type="radio"/> PRESSURE, (KG/CM ²)(abs)			6.40	17.275	6.40	17.248
18 <input type="radio"/> TEMPERATURE (°C)			34.9	37.8	34.9	37.8
19 <input type="radio"/>						
20 <input type="radio"/> MOLECULAR WEIGHT (%)			14.998	14.998	14.998	14.998
21 <input type="radio"/> Cp/Cv (K ₁) OR (K _{AVG}) NOTE 1			1.317	1.338	1.317	1.337
22 <input type="checkbox"/> COMPRESSIBILITY (Z ₁) OR (Z _{AVG}) NOTE 1			0.993	0.981	0.993	0.981
23 <input type="checkbox"/> INLET VOLUME, (M ³ /hr) (WET)			3,722	1,376	3,908	1,447
24 DISCHARGE CONDITIONS AT FLANGE						
25 <input type="checkbox"/> PRESSURE, (KG/CM ²)(abs)			17.475	47.700	17.448	47.700
26 <input type="checkbox"/> TEMPERATURE (°C)			137.9	159.1	137.3	158.3
27 <input type="checkbox"/> Cp/Cv (K ₂) OR (K _{AVG}) NOTE 1			1.275	1.287	1.276	1.287
28 <input type="checkbox"/> COMPRESSIBILITY (Z ₂) OR (Z _{AVG}) NOTE 1			0.996	0.995	0.996	0.995
29 <input type="checkbox"/> INTERNAL POWER REQUIREMENT, (KW) NOTE 2			TOTAL			TOTAL
30 <input type="checkbox"/> KW REQUIRED (ALL LOSSES INCLUDED) NOTE 3			1,031	1,265	2,296	1,074
31 <input type="checkbox"/> SPEED (REV/MIN)			13,191			13,292
32 <input type="checkbox"/> ESTIMATED SURGE, m ³ /h (AT SPEED ABOVE)						
33 <input type="checkbox"/> POLYTROPIC HEAD (kg-m/kg)			20,205	20,985	20,158	20,995
34 <input type="checkbox"/> POLYTROPIC EFFICIENCY (%)			76.6	64.3	76.9	65.0
35 <input type="radio"/> CERTIFIED POINT			YES	YES	NO	NO
36 <input type="checkbox"/> PERFORMANCE CURVE NUMBER						

37 **PROCESS CONTROL**

38 METHOD SUCTION THROTTLING VARIABLE INLET SPEED VARIATION DISCHARGE VIA ANTI-SURGE BYPASS

39 FROM (KG/CM²) (a) GJIDE VANES FROM 105 % BLOWOFF Vendor To Also Provide

40 TO (KG/CM²) (a) (3.4.2.4) TO 70 % TO Performance Control

41 VIA OPERATOR MANUAL SET POINT

42 SIGNAL SOURCE (3.4.2.1) LEVEL CONTROLLER AT DEMETHANIZER REFLUX DRUM TO COMPRESSOR PERFORMANCE CONTROLLER

43 TYPE ELECTRONIC PNEUMATIC OTHER PERFORMANCE CONTROLLER ACTUATES SPILLBACK VALVE

44 RANGE 4 TO 20 MA (KG/CM²) (g) PLEASE SEE *CONTROL NARRATIVE (753-40518)*

45 ANTI-SURGE BYPASS MANUAL AUTOMATIC - ANTI-SURGE CONTROLLER MONITORS FINAL DISCHARGE FLOW ONLY. PURCHASER

46 WILL PROVIDE A SPILLBACK VALVE & LINE FROM FINAL DISCHARGE TO INITIAL SUCTION ONLY. COMPRESSOR DISCHARGE IS COOLED. THE PRIMARY MODE

47 OF CAPACITY CONTROL IS VIA SPILLBACK AFTER SPEED SETTING IS MANUALLY SET.

48 REMARKS: (1) MANUFACTURER SHALL SUPPLY DATA BASED ON GAS ANALYSIS SUPPLIED BY USER.

49 (2) EFFECTS OF INTERNAL LEAKAGE AND BALANCE PISTON LOSSES ARE INCLUDED.

50 (3) MECHANICAL LOSSES KW INCLUDED.

ABB Lummus Global Inc.



CASE 1

CENTRIFUGAL COMPRESSOR DATA SHEET (API 617-6TH) MKS UNITS				PAGE 2 OF 10 DIV. 0	
PROJ. NO. 09480		TAG NO. 1-GB-301		NO. DATE BY CHK'D APPR REVISION	
REQ. 09480-0501		P.O. SUP.		0 11-01-00 JCM KA ISSUED FOR INQUIRY	
				1 04-02-02 KA PCS ISSUED FOR POR	

OPERATING CONDITIONS (Continued) (3.1.2) (3.1.3)						
2	GAS ANALYSIS:	MW	1 ST. SECTION	2 ND. SECTION		REMARKS: (2.11.1.3)
3	<input checked="" type="radio"/> MOL % <input type="radio"/>					(2.11.1.8)
4						
5	AIR	28.966				
6	OXYGEN	32.000				
7	NITROGEN	28.016				
8	WATER VAPOR	18.016				
9	CARBON MONOXIDE	28.010	0.23	0.23		
10	CARBON DIOXIDE	44.010				
11	HYDROGEN SULFIDE	34.076				(2.11.1.7)
12	HYDROGEN	2.016	7.76	7.76		
13	METHANE	16.042	91.90	91.90		
14	ETHYLENE	28.052	0.11	0.11		
15	ETHANE	30.068				
16	PROPYLENE	42.078				
17	PROPANE	44.094				
18	i-BUTANE	58.120				
19	n-BUTANE	58.120				
20	i-PENTANE	72.146				
21	n-PENTANE	72.146				
22	HEXANE PLUS					
23						
24						
25	TOTAL		100.00	100.00		
26	AVG. MOL. WT.		15.00	15.00		

27 LOCATION: (2.1.9)

28 INDOOR OUTDOOR GRADE

29 HEATED UNDER ROOF MEZZANINE

30 UNHEATED PARTIAL SIDES

31 ELEC. AREA CLASSIFICATION (2.1.15) Gr. II A, II B, II C T3

32 WINTERIZATION REQ'D. (2.1.9) TROPICALIZATION REQ'D. (3.4.6.6)

33 SITE DATA:

34 ELEVATION 2.2 M BAROMETER 1.03 (kg/cm²)(g)

35 RANGE OF AMBIENT TEMPS:

	DRY BULB	WET BULB
37 NORMAL °C	25	
38 MAXIMUM °C	38	28
39 MINIMUM °C	5	
40	°C	

41 UNUSUAL CONDITIONS: DUST FUMES

42 OTHER (2.1.9)

43 DESIGN WIND VELOCITY 35 Meter / sec

44 WIND PRESSURE DESIGN

NOISE SPECIFICATIONS: (2.1.10) VENDOR TO SUBMIT DATA VIA NOISE DATA SHTS.

APPLICABLE TO MACHINE: SEE SPECIFICATION

APPLICABLE TO NEIGHBORHOOD: SEE SPECIFICATION

ACOUSTIC HOUSING: YES NO

APPLICABLE SPECIFICATIONS:

API 617, CENTRIFUGAL COMPR. FOR PETROLEUM, CHEMICAL AND GAS SERVICE

VENDOR HAVING UNIT RESPONSIBILITY (2.9.1.7) COMPRESSOR VENDOR

GOVERNING SPECIFICATION (IF DIFFERENT) 09480-GB-201

PAINTING: MFR STANDARDS MUST BE APPROVED BY BUYER.

MANUFACTURER'S STD.

OTHER PLEASE SEE "PAINTING SPECIFICATION (756-30654)"

SHIPMENT: (4.4.1)

DOMESTIC EXPORT EXPORT BOXING REQ'D.

OUTDOOR STORAGE MORE THAN 6 MONTHS (4.4.1)

SPARE ROTOR ASSEMBLY PACKAGED FOR (4.4.3.10)

HORIZONTAL STORAGE VERTICAL STORAGE

45 REMARKS:

46

47

48

49

50

51



CENTRIFUGAL COMPRESSOR DATA SHEET (API 617-6TH) MKS UNITS				PAGE 3 OF 10 DIV. 0
PROJ. NO. 09480	TAG NO. 1-GB-301			
REQ. 09480-0501	P.O.	SUP.		
NO.	Date	BY	CHK'D	APPR
0	11-01-00	JCM		KA
1	04-02-02	KA		PCS
REVISION				
ISSUED FOR INQUIRY				
ISSUED FOR POR				

1 APPLICABLE TO: PROPOSAL PURCHASE AS BUILT

2 FOR RIO POLIMEROS S.A. UNIT 520,000 MTA ETHYLENE PLANT

3 SITE RIO de JANEIRO, BRAZIL SERIAL NO.

4 SERVICE METHANE REFRIGERANT COMPRESSOR NO. REQUIRED ONE (1)

5 CONTINUOUS INTERMITTENT STAND BY DRIVER TYPE (3.1.1) BACK PRESSURE EXHAUST STEAM TURBINE

6 MANUFACTURER MHI MODEL 4V-9B DRIVER ITEM NO. 1-GB-301

7 NOTE: INFORMATION TO BE COMPLETED: BY PURCHASER BY MANUFACTURER

OPERATING CONDITIONS

<p>9 (ALL DATA ON PER UNIT BASIS)</p> <p>10 CASE 2 - 500k MTA</p> <p>11 <input type="radio"/> GAS HANDLED (ALSO SEE PAGE 4)</p> <p>12 <input type="radio"/> WEIGHT FLOW, Kg/hr (WET)</p> <p>13 INLET CONDITIONS AT FLANGE</p> <p>14 <input type="radio"/> PRESSURE, (KG/CM²)(abs)</p> <p>15 <input type="radio"/> TEMPERATURE (°C)</p> <p>16 <input type="radio"/> MOLECULAR WEIGHT (%)</p> <p>17 <input type="radio"/> Cp/Cv (K₁) OR (K_{AVG}) NOTE 1</p> <p>18 <input type="checkbox"/> COMPRESSIBILITY (Z₁) OR (Z_{AVG}) NOTE 1</p> <p>19 <input type="checkbox"/> INLET VOLUME, (M³/hr) (WET)</p> <p>20 DISCHARGE CONDITIONS AT FLANGE</p> <p>21 <input type="checkbox"/> PRESSURE, (KG/CM²)(abs)</p> <p>22 <input type="checkbox"/> TEMPERATURE (°C)</p> <p>23 <input type="checkbox"/> Cp/Cv (K₂) OR (K_{AVG}) NOTE 1</p> <p>24 <input type="checkbox"/> COMPRESSIBILITY (Z₂) OR (Z_{AVG}) NOTE 1</p> <p>25 <input type="checkbox"/> INTERNAL POWER REQUIREMENT, (KW) NOTE 2</p> <p>26 <input type="checkbox"/> KW REQUIRED (ALL LOSSES INCLUDED) NOTE 3</p> <p>27 <input type="checkbox"/> SPEED (REV/MIN)</p> <p>28 <input type="checkbox"/> ESTIMATED SURGE, m³/h (AT SPEED ABOVE)</p> <p>29 <input type="checkbox"/> POLYTROPIC HEAD (kg-m/kg)</p> <p>30 <input type="checkbox"/> POLYTROPIC EFFICIENCY (%)</p> <p>31 <input type="radio"/> CERTIFIED POINT</p> <p>32 <input type="checkbox"/> PERFORMANCE CURVE NUMBER</p>	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">NORMAL</th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> </tr> <tr> <th style="text-align: center;">1 ST. SECTION</th> <th style="text-align: center;">2 ND. SECTION</th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">12,940</td> <td style="text-align: center;">12,940</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">6.40</td> <td style="text-align: center;">17.313</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">34.9</td> <td style="text-align: center;">37.8</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">14.687</td> <td style="text-align: center;">14.687</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1.318</td> <td style="text-align: center;">1.338</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0.993</td> <td style="text-align: center;">0.982</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3,571</td> <td style="text-align: center;">1,318</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">17.513</td> <td style="text-align: center;">47.700</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">139.9</td> <td style="text-align: center;">161.9</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1.276</td> <td style="text-align: center;">1.286</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0.997</td> <td style="text-align: center;">0.997</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">TOTAL</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1005</td> <td style="text-align: center;">1,239</td> <td style="text-align: center;">2,244</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">13,273</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">20,738</td> <td style="text-align: center;">21,476</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">75.8</td> <td style="text-align: center;">63.1</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">NO</td> <td style="text-align: center;">NO</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	NORMAL						1 ST. SECTION	2 ND. SECTION					12,940	12,940					6.40	17.313					34.9	37.8					14.687	14.687					1.318	1.338					0.993	0.982					3,571	1,318					17.513	47.700					139.9	161.9					1.276	1.286					0.997	0.997					TOTAL						1005	1,239	2,244				13,273						20,738	21,476					75.8	63.1					NO	NO				
NORMAL																																																																																																																			
1 ST. SECTION	2 ND. SECTION																																																																																																																		
12,940	12,940																																																																																																																		
6.40	17.313																																																																																																																		
34.9	37.8																																																																																																																		
14.687	14.687																																																																																																																		
1.318	1.338																																																																																																																		
0.993	0.982																																																																																																																		
3,571	1,318																																																																																																																		
17.513	47.700																																																																																																																		
139.9	161.9																																																																																																																		
1.276	1.286																																																																																																																		
0.997	0.997																																																																																																																		
TOTAL																																																																																																																			
1005	1,239	2,244																																																																																																																	
13,273																																																																																																																			
20,738	21,476																																																																																																																		
75.8	63.1																																																																																																																		
NO	NO																																																																																																																		

33 PROCESS CONTROL

34 METHOD SUCTION THROTTLING VARIABLE INLET SPEED VARIATION DISCHARGE VIA ANTI-SURGE BYPASS

35 FROM (KG/CM²) (a) GUIDE VANES FROM 105 % BLOWOFF Vendor To Also Provide

36 TO (KG/CM²) (a) (3.4.2.4) TO 70 % TO Performance Control

37 VIA OPERATOR MANUAL SET POINT

38 SIGNAL SOURCE (3.4.2.1) LEVEL CONTROLLER AT DEMETHANIZER REFLUX DRUM TO COMPRESSOR PERFORMANCE CONTROLLER

39 TYPE ELECTRONIC PNEUMATIC OTHER PERFORMANCE CONTROLLER ACTUATES SPILLBACK VALVE

40 RANGE 4 TO 20 MA (KG/CM²) (g) PLEASE SEE "CONTROL NARRATIVE (753-40518)"

41 ANTI-SURGE BYPASS MANUAL AUTOMATIC - ANTI-SURGE CONTROLLER MONITORS FINAL DISCHARGE FLOW ONLY. PURCHASER

42 WILL PROVIDE A SPILLBACK VALVE & LINE FROM FINAL DISCHARGE TO INITIAL SUCTION ONLY. COMPRESSOR DISCHARGE IS COOLED. THE PRIMARY MODE

43 OF CAPACITY CONTROL IS VIA SPILLBACK AFTER SPEED SETTING IS MANUALLY SET.

44 REMARKS: (1) MANUFACTURER SHALL SUPPLY DATA BASED ON GAS ANALYSIS SUPPLIED BY USER.

45 (2) EFFECTS OF INTERNAL LEAKAGE AND BALANCE PISTON LOSSES ARE INCLUDED.

46 (3) MECHANICAL LOSSES INCLUDED.

ABB Lummus Global Inc.



CASE 2

CENTRIFUGAL COMPRESSOR DATA SHEET (API 617-6TH) MKS UNITS				PAGE 4 OF 10 DIV. 0				
				NO.	DATE	BY	CHK'D	APPR
PROJ. NO. 09480		TAG NO. 1-GB-301		0	11-01-00	JCM	KA	ISSUED FOR INQUIRY
REQ. 09480-0501		P.O. SUP.		1	04-02-02	KA	PCS	ISSUED FOR POR

OPERATING CONDITIONS (Continued) (3.1.2) (3.1.3)								
GAS ANALYSIS:		MW	1 ST. SECTION	2 ND. SECTION				REMARKS: (2.11.1.3) (2.11.1.8)
● MOL % ○								
5	AIR	28.966						
6	OXYGEN	32.000						
7	NITROGEN	28.016						
8	WATER VAPOR	18.016						
9	CARBON MONOXIDE	28.010	0.34	0.34				
10	CARBON DIOXIDE	44.010						
11	HYDROGEN SULFIDE	34.076						(2.11.1.7)
12	HYDROGEN	2.016	10.19	10.19				
13	METHANE	16.042	89.19	89.19				
14	ETHYLENE	28.052	0.28	0.28				
15	ETHANE	30.068						
16	PROPYLENE	42.078						
17	PROPANE	44.094						
18	i-BUTANE	58.120						
19	n-BUTANE	58.120						
20	i-PENTANE	72.146						
21	n-PENTANE	72.146						
22	HEXANE PLUS							
23								
24								
25	TOTAL		100.00	100.00				
26	AVG. MOL. WT.		14.69	14.69				

27								
28								
29								
30								
31								
32								
33								
34								
35								
36								
37								
38								
39								
40								
41								
42								
43								
44								
45								
46								
47								
48								
49								
50								
51								



CENTRIFUGAL COMPRESSOR DATA SHEET (API 617-6TH) MKS UNITS				PAGE 5 OF 10		DIV. 0		
				NO.	Date	BY	CHK'D	APPR
PROJ. NO.	09480	TAG NO.	1-GB-301	0	11-01-00	JCM	KA	ISSUED FOR INQUIRY
REQ.	09480-0501	P.O.	SUP.	1	04-02-02	KA	PCS	ISSUED FOR POR

1 APPLICABLE TO: PROPOSAL PURCHASE AS BUILT

2 FOR RIO POLIMEROS S.A. UNIT 520,000 MTA ETHYLENE PLANT

3 SITE RIO de JANEIRO, BRAZIL SERIAL NO.

4 SERVICE METHANE REFRIGERANT COMPRESSOR NO. REQUIRED ONE (1)

5 CONTINUOUS INTERMITTENT STAND BY DRIVER TYPE (3.1.1) BACK PRESSURE EXHAUST STEAM TURBINE

6 MANUFACTURER MHI MODEL 4V-9B DRIVER ITEM NO. 1-GB-301

7 NOTE: INFORMATION TO BE COMPLETED: BY PURCHASER BY MANUFACTURER

8 **OPERATING CONDITIONS**

9 (ALL DATA ON PER UNIT BASIS)

	NORMAL					
	1 ST. SECTION	2 ND. SECTION				
11 RATED CONDITIONS						
12 CASE 3 - 535k MTA						
13 <input type="radio"/> GAS HANDLED (ALSO SEE PAGE <u>6</u>)						
14 <input type="radio"/>						
15 <input type="radio"/> WEIGHT FLOW, Kg/hr (WET)	16,633	16,633				
16 INLET CONDITIONS AT FLANGE						
17 <input type="radio"/> PRESSURE, (KG/CM ²)(abs)	6.40	17.177				
18 <input type="radio"/> TEMPERATURE (°C)	34.9	37.8				
19 <input type="radio"/>						
20 <input type="radio"/> MOLECULAR WEIGHT (%)	15.126	15.126				
21 <input type="radio"/> Cp/Cv (K ₁) OR (K _{AVG}) NOTE 1	1.316	1.337				
22 <input type="checkbox"/> COMPRESSIBILITY (Z ₁) OR (Z _{AVG}) NOTE 1	0.992	0.981				
23 <input type="checkbox"/> INLET VOLUME, (M ³ /hr) (WET)	4,453	1,655				
24 DISCHARGE CONDITIONS AT FLANGE						
25 <input type="checkbox"/> PRESSURE, (KG/CM ²)(abs)	17.377	47.700				
26 <input type="checkbox"/> TEMPERATURE (°C)	135.8	156.5				
27 <input type="checkbox"/> Cp/Cv (K ₂) OR (K _{AVG}) NOTE 1	1.276	1.288				
28 <input type="checkbox"/> COMPRESSIBILITY (Z ₂) OR (Z _{AVG}) NOTE 1	0.995	0.994				
29 <input type="checkbox"/> INTERNAL POWER REQUIREMENT, (KW) NOTE 2	TOTAL					
30 <input type="checkbox"/> KW REQUIRED (ALL LOSSES INCLUDED) NOTE 3	1,202	1,464	2,666			
31 <input type="checkbox"/> SPEED (REV/MIN)	13,572					
32 <input type="checkbox"/> ESTIMATED SURGE, m ³ /h (AT SPEED ABOVE)						
33 <input type="checkbox"/> POLYTROPIC HEAD (kg-m/kg)	19,865	20,848				
34 <input type="checkbox"/> POLYTROPIC EFFICIENCY (%)	77.5	66.3				
35 <input type="radio"/> CERTIFIED POINT	NO	NO				
36 <input type="checkbox"/> PERFORMANCE CURVE NUMBER						

37 **PROCESS CONTROL**

38 METHOD SUCTION THROTTLING VARIABLE INLET SPEED VARIATION DISCHARGE VIA ANTI-SURGE BYPASS

39 FROM _____ (KG/CM²) (a) GUIDE VANES FROM 105 % BLOWOFF Vendor To Also Provide

40 TO _____ (KG/CM²) (a) (3.4.2.4) TO 70 % TO Performance Control

41 VIA OPERATOR MANUAL SET POINT

42 SIGNAL SOURCE (3.4.2.1) LEVEL CONTROLLER AT DEMETHANIZER REFLUX DRUM TO COMPRESSOR PERFORMANCE CONTROLLER

43 TYPE ELECTRONIC PNEUMATIC OTHER PERFORMANCE CONTROLLER ACTUATES SPILLBACK VALVE

44 RANGE 4 TO 20 MA _____ (KG/CM²) (g) PLEASE SEE *CONTROL NARRATIVE (753-40518)*

45 ANTI-SURGE BYPASS MANUAL AUTOMATIC - ANTI-SURGE CONTROLLER MONITORS FINAL DISCHARGE FLOW ONLY. PURCHASER

46 WILL PROVIDE A SPILLBACK VALVE & LINE FROM FINAL DISCHARGE TO INITIAL SUCTION ONLY. COMPRESSOR DISCHARGE IS COOLED. THE PRIMARY MODE

47 OF CAPACITY CONTROL IS VIA SPILLBACK AFTER SPEED SETTING IS MANUALLY SET.

48 REMARKS: (1) MANUFACTURER SHALL SUPPLY DATA BASED ON GAS ANALYSIS SUPPLIED BY USER.

49 (2) EFFECTS OF INTERNAL LEAKAGE AND BALANCE PISTON LOSSES ARE INCLUDED.

50 (3) MECHANICAL LOSSES INCLUDED.

ABB Lummus Global Inc.



CASE 3

CENTRIFUGAL COMPRESSOR DATA SHEET (API 617-6TH) MKS UNITS		PAGE 6 OF 10		DIV. 0		
		NO.	DATE	BY	CHK'D	APPR
PROJ. NO. 09480	TAG NO. 1-GB-301	0	11-01-00	JCM	KA	ISSUED FOR INQUIRY
REQ. 09480-0501	P.O. SUP.	1	04-02-02	KA	PCS	ISSUED FOR POR

OPERATING CONDITIONS (Continued) (3.1.2) (3.1.3)						
GAS ANALYSIS:	MW	1 ST. SECTION	2 ND. SECTION			REMARKS:
● MOL % ○						(2.11.1.3) (2.11.1.8)
5 AIR	28.966					
6 OXYGEN	32.000					
7 NITROGEN	28.016					
8 WATER VAPOR	18.016					
9 CARBON MONOXIDE	28.010	0.47	0.47			
10 CARBON DIOXIDE	44.010					
11 HYDROGEN SULFIDE	34.076					(2.11.1.7)
12 HYDROGEN	2.016	6.99	5.99			
13 METHANE	16.042	92.44	92.44			
14 ETHYLENE	28.052	0.10	0.10			
15 ETHANE	30.068					
16 PROPYLENE	42.078					
17 PROPANE	44.094					
18 I-BUTANE	58.120					
19 n-BUTANE	58.120					
20 I-PENTANE	72.146					
21 n-PENTANE	72.146					
22 HEXANE PLUS						
23						
24						
25 TOTAL		100.00	100.00			
26 AVG. MOL. WT.		15.13	15.13			

27						
28						
29						
30						
31						
32						
33						
34						
35						
36						
37						
38						
39						
40						
41						
42						
43						
44						
45						
46						
47						
48						
49						
50						
51						