



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS  
MESTRADO PROFISSIONAL

**ESTUDO DE ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE E APLICAÇÃO DE  
FERRAMENTA DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA GESTÃO DE ATIVOS  
DE UMA UNIDADE INDUSTRIAL NA AMAZÔNIA**

**João Diego Conceição de Sá**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – Mestrado Profissional, PPGEP/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos.

Orientador: Eduardo de Magalhães Braga

Belém

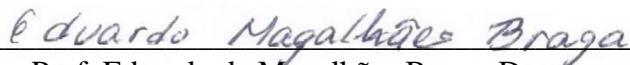
Junho de 2021

**ESTUDO DE ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE E APLICAÇÃO DE  
FERRAMENTA DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA GESTÃO DE ATIVOS  
DE UMA UNIDADE INDUSTRIAL NA AMAZÔNIA**

João Diego Conceição de Sá

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA PROCESSOS – MESTRADO PROFISSIONAL (PPGEP/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE PROCESSOS.

Examinada por:



---

Prof. Eduardo de Magalhães Braga, Dr.  
(PPGEP/ITEC/UFPA-Orientador)



---

Prof. Jandecy Cabral Leite, Dr.  
(PPGEP/ITEC/UFPA-Membro)



---

Prof. Pedro Igor Dias Lameira, Dr.  
(FENAV/ITEC/UFPA-Membro)

BELÉM, PA - BRASIL

JUNHO DE 2021

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da UFPA**

---

de Sá, João Diego Conceição, 1985-  
Estudo de Engenharia de Confiabilidade e aplicação de  
ferramenta de inteligência artificial na Gestão de Ativos de  
uma unidade industrial na Amazônia / João Diego Conceição de  
Sá - 2021.

Orientador: Eduardo de Magalhães Braga

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade  
Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia de Processos, 2021

1. Gestão de ativos 2. Engenharia de confiabilidade 3.  
Lógica Fuzzy I. Título

CDD 670.42

---

*Dedico este trabalho à minha família que sempre acreditou no meu sonho de desenvolvimento acadêmico e grandes conquistas profissionais.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, pelo acompanhamento durante as pesquisas experimentais e pela assistência na elaboração desta dissertação.

Aos colegas de trabalho da Petrobras Transporte S.A. – TRANSPETRO pelo suporte nas informações coletadas.

Aos professores e colegas do PPGEF.

*“Nascemos para manifestar a glória do Universo que está dentro de nós. Não está apenas em um de nós: está em todos nós. E conforme deixamos nossa própria luz brilhar, inconscientemente damos às outras pessoas permissão para fazer o mesmo. E conforme nos libertamos do nosso medo, nossa presença, automaticamente, liberta os outros.”*

(Nelson Mandela)

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGEP/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos (M. Eng.)

**ESTUDO DE ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE E APLICAÇÃO DE  
FERRAMENTA DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA GESTÃO DE ATIVOS  
DE UMA UNIDADE INDUSTRIAL NA AMAZÔNIA**

**João Diego Conceição de Sá**

Junho/2021

Orientador: Eduardo de Magalhães Braga

Área de Concentração: Engenharia de Processos

A Manutenção Industrial por muito tempo foi considerada um custo, naturalmente indesejado, pelos gestores de ativos, entretanto hoje é parte estratégica e representa alto investimento nas maiores indústrias do mundo. Esta área faz parte de um conceito relativamente recente, mas cada vez crescente no meio industrial, chamado de Gestão de Ativos e alguns dos seus pilares são a Confiabilidade e as técnicas de predição das condições operacionais de um equipamento. Neste estudo foram obtidos dados de falha durante 5 (cinco) anos de funcionamento de 6 (seis) bombas centrífugas de hidrocarbonetos e a partir desse histórico foi estudada a Confiabilidade, Disponibilidade e Análises Preditivas de Óleo e Vibração mais recentes. Avaliar diversos parâmetros compostos no universo da manutenção e confiabilidade além de determinar quais são as prioridades da equipe responsável, levando em consideração a percepção operacional de cada componente desta equipe, se torna uma missão complexa sob o ponto de vista humano. Por esta complexidade é que foi importante a utilização da Inteligência Artificial, capaz de relacionar avaliações qualitativas puramente subjetivas a dados técnicos objetivos, e demonstrar algo factível, palpável e aplicável de forma direta. Com a correlação entre os parâmetros, realizada pela ferramenta *Fuzzy*, foi possível obter um número que indica o nível da condição operacional do equipamento DE 0 (zero) A 10 (dez), e a partir dessa definição classifica-los em ordem de mais apto a realizar a operação

e o mais prioritário em termos de manutenção. Com inúmeros equipamentos sob sua responsabilidade, obtendo a percepção da qualidade da Confiabilidade e Disponibilidade, unindo-se aos dados da Manutenção pela Condição de um equipamento e relacionando tudo isso com apoio da Inteligência Artificial, um Gestor pode obter quais são os equipamentos que devem ter maior atenção e investimento naquele exato momento. Neste estudo ficou claro qual equipamento deve ser priorizado em termos de manutenção e qual está em melhor condição operacional em um dado momento. Este pode ser um modelo de otimização de recursos desejados por toda e qualquer empresa que atue de forma sustentável e responsável.

Abstract of Dissertation presented to PPGE/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Process Engineering (M. Eng.)

**RELIABILITY ENGINEERING STUDY AND APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOL IN ASSET MANAGEMENT OF AN INDUSTRIAL UNIT IN THE AMAZON**

**João Diego Conceição de Sá**

June/2021

Advisor: Eduardo de Magalhães Braga

Research Area: Process Engineering

For a long time, Industrial Maintenance was considered a cost, naturally unwanted, by asset managers; however, today it is a strategic part and represents a high investment in the world's largest industries. This Maintenance is part of a relatively recent concept, but growing in the industrial environment, called Asset Management and some of its pillars are Reliability and prediction techniques of equipment's operational conditions. In this study, failure data were obtained during 5 (five) years of operation of 6 (six) hydrocarbon centrifugal pumps and from this history the most recent Reliability, Availability and Predictive Oil and Vibration Analyzes were studied. Evaluating several compound parameters in the universe of maintenance and reliability as well as determining which are the priorities of the responsible team, taking into account the operational perception of each component of this team, becomes a complex mission under the human point of view. This complexity is why it was important to use Artificial Intelligence, capable of relating purely subjective qualitative assessments to objective technical data, and demonstrate something feasible, tangible and directly applicable. With the correlation between the parameters, performed by the Fuzzy tool, it was possible to obtain a number that indicates the level of operational condition of the equipment from 0 (zero) to 10 (ten), and from this definition classify them in order of most able to perform the operation and

the most priority in terms of maintenance. With several equipments under his responsibility, obtaining the perception of the quality of Reliability and Availability, joining the data of Maintenance by the Condition of an equipment and relating all this with support from Artificial Intelligence, a manager can obtain which are the equipments that must have more attention and investment at that exact moment. In this study it became clear which equipment should be prioritized in terms of maintenance and which is in better operational condition at a given moment. This can be a model of resource optimization desired by any company that operates in a sustainable and responsible way.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 - MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 - OBJETIVOS.....	2
<b>1.2.1 - Objetivo geral.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2.2 - Objetivos específicos.....</b>	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>4</b>
2.1 - GESTÃO DE ATIVOS.....	4
2.2 - ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE.....	6
<b>2.2.1 - Confiabilidade.....</b>	<b>9</b>
<b>2.2.2 - Manutenibilidade.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.3 - Disponibilidade operacional e disponibilidade inerente.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.4 - Manutenção corretiva.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.5 - Manutenção preventiva.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.6 - Manutenção preditiva.....</b>	<b>15</b>
2.2.6.1 - Análise de óleo.....	16
2.2.6.2 - Análise de vibração.....	17
2.3 - INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.....	19
<b>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
3.1 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	22
3.2 - BASE DE DADOS.....	25
3.3 - ANÁLISE DAS MANUTENÇÕES PREDITIVAS.....	26
<b>3.3.1 - Análise de óleo.....</b>	<b>26</b>
<b>3.3.2 - Análise de vibração.....</b>	<b>27</b>
3.4 - CONFIGURAÇÃO DOS SISTEMAS.....	29
3.5 - ANÁLISE DE DADOS.....	32
3.6 - MODELAGEM DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.....	34
<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>40</b>
4.1 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE E MANUTENÇÃO PREDITIVA.....	40
<b>4.1.1 - Bomba de petróleo A.....</b>	<b>40</b>
4.1.1.1 - Resultados de confiabilidade.....	40

4.1.1.2 - Resultados de manutenção preditiva.....	42
4.1.1.3 - Tabela de qualificação da condição operacional.....	45
<b>4.1.2 - Bomba de petróleo B.....</b>	<b>45</b>
4.1.2.1 - Resultados de confiabilidade.....	45
4.1.2.2 - Resultados de manutenção preditiva.....	47
4.1.2.3 - Tabela de qualificação da condição operacional.....	49
<b>4.1.3 - Bomba de petróleo C.....</b>	<b>49</b>
4.1.3.1 - Resultados de confiabilidade.....	49
4.1.3.2 - Resultados de manutenção preditiva.....	51
4.1.3.3 - Tabela de qualificação da condição operacional.....	52
<b>4.1.4 - Bomba de petróleo D.....</b>	<b>53</b>
4.1.4.1 - Resultados de confiabilidade.....	53
4.1.4.2 - Resultados de manutenção preditiva.....	54
4.1.4.3 - Tabela de qualificação da condição operacional.....	56
<b>4.1.5 - Bomba de GLP A.....</b>	<b>57</b>
4.1.5.1 - Resultados de confiabilidade.....	57
4.1.5.2 - Resultados de manutenção preditiva.....	58
4.1.5.3 - Tabela de qualificação da condição operacional.....	60
<b>4.1.6 - Bomba de GLP A.....</b>	<b>61</b>
4.1.6.1 - Resultados de confiabilidade.....	61
4.1.6.2 - Resultados de manutenção preditiva.....	62
4.1.6.3 - Tabela de qualificação da condição operacional.....	64
4.2 - CONFIABILIDADE DO SISTEMA.....	64
<b>4.2.1 - Confiabilidade do sistema de petróleo.....</b>	<b>64</b>
<b>4.2.2 - Disponibilidade do sistema de petróleo.....</b>	<b>65</b>
<b>4.2.3 - Confiabilidade do sistema de GLP.....</b>	<b>65</b>
<b>4.2.4 - Disponibilidade do sistema de GLP.....</b>	<b>66</b>
4.3 - RESPOSTA DA LÓGICA <i>FUZZY</i> .....	66
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>76</b>
5.1 - CONCLUSÕES.....	76
5.2 - SUGESTÕES.....	78
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>79</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Esquema de gestão de ativos de uma determinada unidade.....	5
Figura 2.2	Quadrante de tipo de manutenção aplicada na gestão de ativos..	6
Figura 2.3	Relação de parâmetro da análise RAM.....	8
Figura 2.4	Aplicação da confiabilidade de sistema na fase de projeto na gestão de ativos.....	9
Figura 2.5	Relação entre taxa de falha e momento adequado para substituição de um componente.....	15
Figura 2.6	Aplicações de manutenção preditiva em máquinas.....	15
Figura 2.7	Principais componentes de um motor e destaque para os rolamentos.....	17
Figura 2.8	Aplicação da técnica de análise de vibração em máquina rotativa.....	18
Figura 2.9	Diferença de entendimento em ter lógica convencional e <i>fuzzy</i> ..	19
Figura 2.10	Esquema de processos da lógica <i>fuzzy</i> .....	21
Figura 3.1	Tela do sistema de armazenamento de dados dos equipamentos.	25
Figura 3.2	Planilha de informações e cálculos de parâmetros.....	26
Figura 3.3	Ensaio físico-químico realizado no óleo lubrificante.....	26
Figura 3.4	Resultado da análise de óleo.....	27
Figura 3.5	Resultado de classificação da análise de vibração.....	28
Figura 3.6	Legenda dos pontos de medição para análise de vibração.....	28
Figura 3.7	Localização dos pontos de medição em motobomba hidráulica..	28
Figura 3.8	Fluxo de transferência de petróleo.....	29
Figura 3.9	Fluxograma de transferência de GLP.....	31
Figura 3.10	Software utilizado para análises de confiabilidade.....	33
Figura 3.11	Tela do Weibull++ com as informações necessárias para o estudo.....	33
Figura 3.12	Tela de apresentação do resultado de confiabilidade no Weibull++.....	34
Figura 3.13	Arquitetura básica dos sistemas <i>fuzzy</i> aplicado no Matlab.....	35
Figura 3.14	Variação dos inputs e outputs do sistema no bloco <i>fuzzy</i> no Matlab.....	35

Figura 3.15	Exemplo de resultado de aplicação da lógica difusa.....	37
Figura 3.16	Entradas e saídas no bloco <i>fuzzy</i> do Matlab.....	38
Figura 3.17	Gráfico variáveis x pertinência.....	38
Figura 4.1	Resultado de disponibilidade do sistema de bombeio A de petróleo.....	41
Figura 4.2	Resultado de confiabilidade do sistema de bombeio A, calculado pelo software.....	41
Figura 4.3	Gráfico que demonstra a evolução da confiabilidade com o tempo da bomba petróleo A.....	42
Figura 4.4	Resultado da análise de vibração da bomba petróleo A.....	43
Figura 4.5	Resultado da análise de óleo da bomba petróleo A.....	44
Figura 4.6	Resultado de disponibilidade do sistema de bombeio B de petróleo.....	45
Figura 4.7	Resultado de confiabilidade do sistema de bombeio B, calculado pelo software.....	46
Figura 4.8	Gráfico que demonstra a evolução da confiabilidade com o tempo da bomba petróleo B.....	46
Figura 4.9	Resultado da análise de vibração da bomba petróleo B.....	47
Figura 4.10	Resultado da análise de óleo da bomba petróleo B.....	48
Figura 4.11	Resultado de disponibilidade do sistema de bombeio C de petróleo.....	49
Figura 4.12	Resultado de confiabilidade do sistema de bombeio C, calculado pelo software.....	50
Figura 4.13	Gráfico que demonstra a evolução da confiabilidade com o tempo da bomba petróleo C.....	50
Figura 4.14	Resultado da análise de vibração da bomba petróleo C.....	51
Figura 4.15	Resultado da análise de óleo da bomba petróleo C.....	52
Figura 4.16	Resultado de disponibilidade do sistema de bombeio D de petróleo.....	53
Figura 4.17	Resultado de confiabilidade do sistema de bombeio D, calculado pelo software.....	53
Figura 4.18	Gráfico que demonstra a evolução da confiabilidade com o tempo da bomba petróleo D.....	54

Figura 4.19	Resultado da análise de vibração da bomba petróleo D.....	55
Figura 4.20	Resultado da análise de óleo da bomba petróleo D.....	56
Figura 4.21	Resultado de disponibilidade do sistema de bombeio A de GLP.	57
Figura 4.22	Resultado de confiabilidade do sistema de bombeio D, calculado pelo software.....	57
Figura 4.23	Gráfico que demonstra a evolução da confiabilidade com o tempo da bomba GLP A.....	58
Figura 4.24	Resultado da análise de vibração da bomba GLP A.....	59
Figura 4.25	Resultado da análise de óleo da bomba GLP A.....	60
Figura 4.26	Resultado de disponibilidade do sistema de bombeio B de GLP.	61
Figura 4.27	Resultado de confiabilidade do sistema de bombeio GLP B, calculado pelo software.....	61
Figura 4.28	Gráfico que demonstra a evolução da confiabilidade com o tempo da bomba GLP B.....	62
Figura 4.29	Resultado da análise de vibração da bomba GLP B.....	62
Figura 4.30	Resultado da análise de óleo da bomba GLP B.....	64
Figura 4.31	Configuração dos blocos de entrada, lógica e saída do sistema aplicado ao <i>fuzzy</i> .....	66
Figura 4.32	Curvas de entrada confiabilidade e disponibilidade, com os intervalos e níveis de percepção.....	67
Figura 4.33	Curvas de entrada vibração e óleo com os intervalos e níveis de resultado.....	67
Figura 4.34	Gráfico representando as notas das possíveis saídas do sistema..	68
Figura 4.35	Demonstração do bloco lógico do sistema, relacionando as entradas e a saída.....	69
Figura 4.36	Simulação com níveis mais baixos das entradas e sua saída correspondente.....	69
Figura 4.37	Simulação com níveis mais altos das entradas e sua saída correspondente.....	69
Figura 4.38	Perfil tridimensional da saída do sistema considerando as entradas confiabilidade e disponibilidade.....	70
Figura 4.39	Perfil tridimensional da saída do sistema considerando as entradas vibração e óleo.....	70

Figura 4.40	Simulação das entradas e saídas da bomba petróleo A.....	71
Figura 4.41	Processos de fuzzificação e defuzzificação para bomba petróleo A.....	71
Figura 4.42	Simulação das entradas e saídas da bomba petróleo B.....	71
Figura 4.43	Processos de fuzzificação e defuzzificação para bomba petróleo B.....	72
Figura 4.44	Simulação das entradas e saídas da bomba petróleo C.....	72
Figura 4.45	Processos de fuzzificação e defuzzificação para bomba petróleo C.....	72
Figura 4.46	Simulação das entradas e saídas da bomba petróleo D.....	72
Figura 4.47	Processos de fuzzificação e defuzzificação para bomba petróleo D.....	73
Figura 4.48	Simulação das entradas e saídas da bomba GLP A.....	73
Figura 4.49	Processos de fuzzificação e defuzzificação para bomba GLP A.	73
Figura 4.50	Simulação das entradas e saídas da bomba GLP B.....	73
Figura 4.51	Processos de fuzzificação e defuzzificação para bomba GLP B..	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Tabela verdade para êxito da função principal do sistema de petróleo.....	30
Tabela 3.2	Tabela verdade para função de transferência de GLP.....	31
Tabela 3.3	Tabela de avaliação final da condição de cada equipamento.....	36
Tabela 3.4	Tabela de níveis possíveis de avaliação para cada parâmetro analisado.....	37
Tabela 4.1	Qualificação da condição operacional bomba petróleo A.....	45
Tabela 4.2	Qualificação da condição operacional bomba petróleo B.....	49
Tabela 4.3	Qualificação da condição operacional bomba petróleo C.....	52
Tabela 4.4	Qualificação da condição operacional bomba petróleo D.....	56
Tabela 4.5	Qualificação da condição operacional bomba GLP A.....	60
Tabela 4.6	Qualificação da condição operacional bomba GLP B.....	64
Tabela 4.7	Tabela de confiabilidade por sistema combinado bombas petróleo.....	64
Tabela 4.8	Tabela de disponibilidade por sistema combinado bombas petróleo.....	65
Tabela 4.9	Tabela de confiabilidade por sistema combinado bombas petróleo.....	65
Tabela 4.10	Tabela de disponibilidade por sistema combinado bombas GLP.....	66
Tabela 4.11	Tabela de ranking confiança operacional das bombas.....	74

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\beta$	Parâmetro de Forma da Equação f.d.p de Weibull
$\eta$	Parâmetro de Escala da Equação f.d.p de Weibull
$\gamma$	Parâmetro de Posição da Equação f.d.p de Weibull
$C(t)$	Função da Confiabilidade no tempo
$f(t)$	Função Densidade de Probabilidade da Distribuição Weibull no tempo
$\lambda$	Parâmetro da Equação de Disponibilidade que indica o inverso do MTTF
$\mu$	Parâmetro da Equação de Disponibilidade que indica o inverso do MTTR
$t$	Tempo

## NOMENCLATURA

ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
ABRAMAN	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MANUTENÇÃO E GESTÃO DE ATIVOS
ISO	INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTZATION
MTBF	MEAN TIME BETWEEN FAILURE
MTTR	MEAN TIME TO REPAIR
NBR	NORMA BRASILEIRA
RCM	RELIABILITY CENTRED MAINTENANCE

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUÇÃO**

### **1.1 - MOTIVAÇÃO**

O mercado atual e globalizado não permite mais que grandes empresas apenas atuem sob uma metodologia tradicional da gestão, dividida em setores independentes. O advento da Gestão de Ativos provém da necessidade de um negócio ser administrado cada vez mais integrado e associado entre seus departamentos. O grande objetivo de qualquer Manutenção é evitar a falha de um Ativo, antecipando-se às condições críticas que geram maiores preocupações, custos e perda de tempo de trabalho útil. O parâmetro principal, ou seja, a ferramenta que denota a confiança de um gestor sobre um sistema ou equipamento é sua Confiabilidade. Quanto menos confiável um sistema, maior o seu risco operacional e financeiro. A Gestão de Ativos passa essencialmente pela confiabilidade dos ativos gerenciados e uma gestão eficiente se traduz em controle do risco de falha ou perda de funções dos seus ativos.

No importante Terminal Aquaviário da PETROBRAS situada no município de Coari-AM, assim como na indústria em geral, são aplicadas várias técnicas de manutenção preventiva e preditiva nos ativos instalados. Sabe-se pontualmente a condição de um equipamento e se o mesmo está prestes a ter interrompida sua operação ou se ainda tem um longo tempo de atividade ininterrupta. Em contrapartida, ter uma visão global do processo a ponto de permitir uma atuação seletiva da equipe de manutenção no equipamento que apresenta situação mais crítica, já não é um processo trivial. Não há um ranking de criticidade situacional dos ativos que considere todas as variáveis e suas implicações de modo a permitir uma otimização de recurso humano e material da empresa para atuar na provável ocorrência. O planejamento de intervenção em qualquer ativo deve ser bastante preciso no sistema PETROBRAS, no qual é regido pela Lei N° 13.303, a chamada Lei das Estatais cuja principal característica é o modelo de contratação por Licitação. Este modelo implica em tempo elevado e restrições legais para se garantir um serviço ou compra de material necessário para manter um ativo importante. Dentro deste contexto é que se valorizam mais um controle holístico dos processos e condições dos ativos da Unidade. Hoje o recurso financeiro e técnico é despendido em um Ativo que apresenta uma anomalia detectada por uma determinada

análise, mas não pelo conjunto de análises envolvidas. Desta forma, algumas ações são exercidas sobre um alvo errado, ou seja, um equipamento que não estaria tão próximo da falha quanto outros mais críticos. Qualquer imprecisão no planejamento de intervenção pode representar milhões de reais em perda operacional ou até mesmo riscos ambientais relevantes em plena floresta Amazônica.

## 1.2 - OBJETIVOS

### 1.2.1 - Objetivo geral

O presente trabalho técnico tem como objetivo geral desenvolver um modelo de tomada de decisão na Manutenção de ativos baseada em Confiabilidade e técnicas Preditivas, para aplicação no Sistema de Bombeio de Petróleo e derivados de uma planta Industrial. A estratégia de negócio a ser desenvolvida permitirá ao Gestor e sua equipe atuar de maneira precisa no Ativo que realmente é necessário naquele período, tanto para maior utilização do equipamento mais confiável quanto para intervenção, tornando ótimo, assim, o custo global envolvido, a qualidade intrínseca ao serviço realizado e o tempo útil da mão de obra relacionada.

### 1.2.2 - Objetivos específicos

Especificamente o objetivo do trabalho é proporcionar uma lista de equipamentos ou subsistemas, priorizada com relação a utilização pela Operação da Unidade ou a necessidade de investimento técnico e financeiro da empresa. Técnicas de manutenção aplicadas que podem permitir diagnosticar o estado de um ativo, além do histórico do próprio equipamento e eficiência operacional, tudo devidamente registrado no sistema de gerenciamento SAP, serão a base de dados do estudo. Serão demonstradas as confiabilidades de todos os equipamentos importantes dos subsistemas e classificadas em níveis linguísticos para que estejam todas as variáveis analisadas sob o ponto de vista qualitativo. Através de uma ferramenta da Inteligência Artificial trabalhando nos registros anteriormente citados, os ativos serão classificados quanto a sua prioridade operacional ou necessidade de ser mantido, de acordo com as diversas variáveis envolvidas em todos os processos de manutenção e contexto econômico e financeiro. De posse deste ranking de acordo com o que é prioridade, o Gestor da Unidade Industrial poderá

organizar o planejamento de intervenção em um Ativo com segurança de que está dirimindo o pior problema sob sua responsabilidade. A atuação baseada nesta Lista Priorizada significará custo ótimo, melhor tomada de decisão técnica e menor risco de parada operacional.

De maneira estruturada os objetivos a serem alcançados para compor todo o trabalho, são:

- Realizar estudo de confiabilidade das bombas centrífugas;
- Definir limites de qualificação para os resultados de confiabilidade e disponibilidade obtidos;
- Realizar análise de manutenção preditiva de vibração e óleo dos equipamentos;
- Organizar os resultados dos estudos técnicos em uma ficha de avaliação do equipamento;
- Aplicar ferramenta de inteligência artificial para relacionar os resultados das análises preditivas e níveis de percepção de confiabilidade e disponibilidade para obter um resultado objetivo, numérico.
- Demonstrar através do resultado numérico proveniente da aplicação da inteligência artificial uma tabela de classificação dos equipamentos em estudo.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO DA LITERATURA

#### 2.1 - GESTÃO DE ATIVOS

Gestão de Ativos é o conjunto de atividades que uma organização realiza para que estes ativos cheguem a resultados que sejam sustentáveis, ou seja, que se mantenham (KARDEC, 2009). Este tema é abordado na NBR ISO 55000, que é o documento que apresenta os conceitos essenciais e a terminologia necessária para desenvolver um plano de longo prazo, que incorpora a missão de uma organização, valores, objetivos, políticas de negócios e requisitos das partes interessadas. Gestão de ativos engloba basicamente os parâmetros necessários e suficientes para que os colaboradores envolvidos tomem decisões ótimas dentro do processo, tais como investimento inicial, valorização no fim da vida útil do sistema ou equipamento e custos de material e homem-hora, sobressalentes e atividades técnicas adequadas, análises e estudos de engenharia, enfim, tudo que relaciona à manutenção do ativo em questão. No caso da Indústria trata-se como um fator determinante no resultado financeiro, a Manutenção, um componente importante da Gestão de Ativos que em uma Unidade Industrial representa cerca de 20% do seu custo fixo e 4% do faturamento bruto, de acordo com a Associação Brasileira de Manutenção (ABRAMAN, 2011). A Gestão de um Ativo é composta por diversos fatores, desde o projeto ao seu descarte, e a Manutenção é um dos principais e mais conhecidos componentes.

“Uma abordagem abrangente de gerenciamento de ativos deve considerar os custos do ciclo de vida do equipamento e do sistema no total. Mas também deve considerar a qualidade do suprimento fornecido pelo sistema, pois a dependência entre custos e qualidade é óbvia e de alta relevância nas discussões recentes. No final, a gestão de ativos deve apoiar o delicado equilíbrio de custos versus qualidade, de acordo com os requisitos e regulamentos fornecidos” (SCHNEIDER, pág. 5, 2006). O esquema de gerenciamento de ativos pode ser observado na Figura 2.1, onde estão em destaques o cálculo de confiabilidade e custos e estratégias de manutenção aplicáveis no sistema.

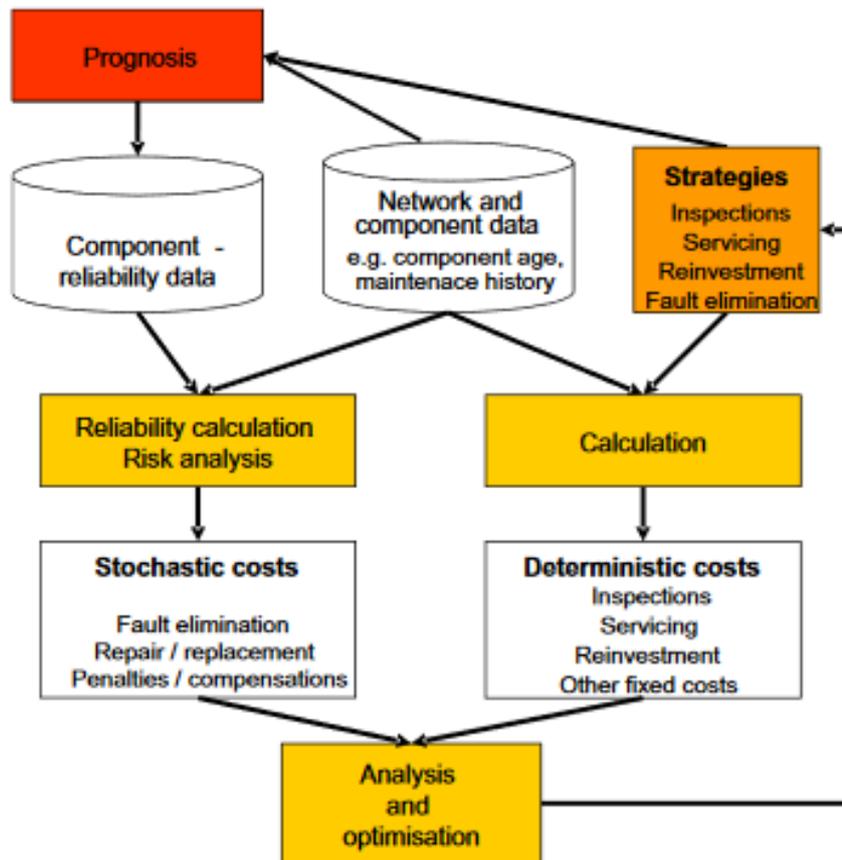


Figura 2.1 - Esquema de gestão de ativos de uma determinada unidade.

Os cálculos de confiabilidade estão relacionados a RCM (*Reliability Centred Maintenance* ou Manutenção Centrada em Confiabilidade), que é uma das mais importantes ferramentas de gestão e tomada de decisão para desenvolvimento de resultados de um ativo na Indústria moderna. Uma relação de Importância e Condição do ativo pode ser claramente visualizada na Figura 2.2, na qual indica que o estudo de confiabilidade apresenta uma lista de prioridades, conexão entre falhas e condição operacional e o risco na gestão do processo.

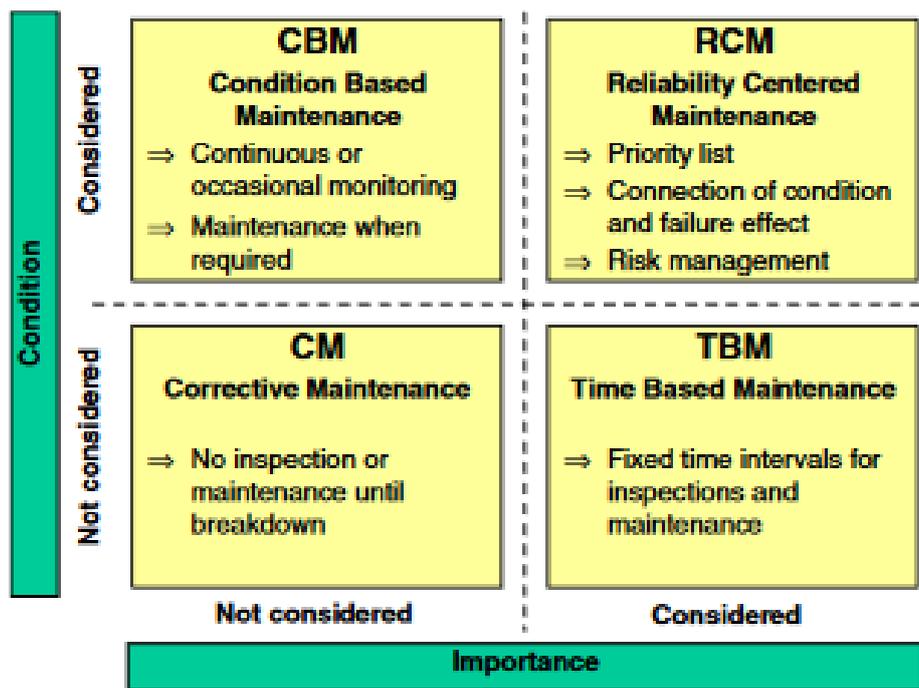


Figura 2.2 - Quadrante de tipo de manutenção aplicada na gestão de ativos.

“O RCM não está apenas avaliando as prioridades das ações de manutenção, mas também é uma ferramenta poderosa para a classificação das atividades de substituição e reforma, porque as condições inadequadas levam imediatamente à pergunta: se é mais econômico fazer mais manutenção ou substituir o equipamento” (SCHNEIDER, 2006).

A Gestão de Ativos é um processo complexo com diversos sistemas interligados e interdependentes, que para seu êxito exige dos seus pilares e a manutenção e confiabilidade são dois deles.

## 2.2 - ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE

Todo sistema desenvolvido, após sua efetiva implementação e início de operação, necessita de acompanhamento técnico especializado para avaliar o desempenho e determinar pontos de melhorias. É nesse aspecto estratégico que atua a Confiabilidade da Manutenção ou mais amplamente chamada Engenharia de Confiabilidade.

Confiabilidade é a probabilidade de um produto executar sem falhas, uma certa missão, sob certas condições, durante um determinado período de tempo (FILHO, 1997).

Alguns parâmetros são essenciais para construção de um estudo de confiabilidade de um sistema, como o tempo médio entre falhas (MTBF - “Mean Time Between Failures”), tempo médio para reparo (MTTR – “Mean Time To Repair), Disponibilidade

e Manutenibilidade. A Disponibilidade mede a extensão de tempo que o consumidor pode utilizar o produto quando desejar e a Manutenibilidade é definida como a probabilidade da manutenção ser completada em um determinado tempo, quando peças falham ou são substituídas preventivamente (FILHO, 1997).

Ainda de acordo com a classificação da NBR 5462:

- **Disponibilidade** é a capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados.
- **Mantenibilidade** é a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos.
- **Confiabilidade** é a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo.

Fica evidente que Manutenibilidade afere a capacidade de uma equipe para executar a manutenção de um determinado equipamento, o que afeta no tempo e qualidade do retorno operacional. Confiabilidade está ligado ao futuro, é uma projeção probabilística que aponta as chances de o equipamento funcionar perfeitamente em um determinado espaço de tempo.

Análise RAM (**Reliability**, *Availability*, *Maintainability*): Relação entre a Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade. A disponibilidade é afetada tanto pela Confiabilidade quanto pela Manutenibilidade, isto pode ser verificado no quadro resumo da Figura 2.3.

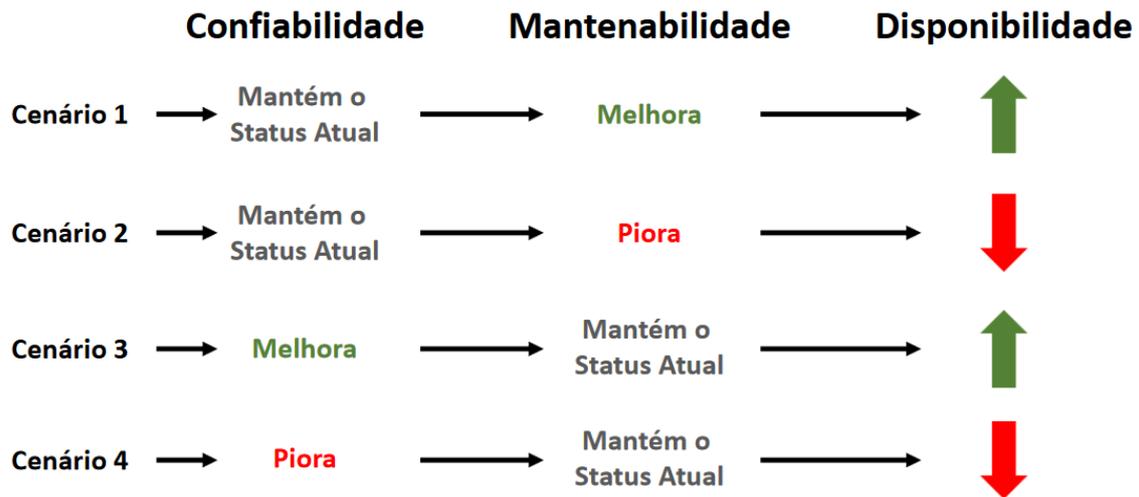


Figura 2.3 - Relação de parâmetro da análise RAM.

Na análise de sistemas reparáveis é preciso entender como os itens de um sistema podem ser reparados ou substituídos. Um item será reparado ou substituído através de uma ação de manutenção. Uma manutenção pode ser definida como qualquer ação que restaure itens em falha para que retornem a sua condição operacional, ou ações que irão manter em estado operacional itens que ainda não falharam. As ações de manutenção podem ser divididas em: Manutenção Corretiva; Manutenção Preventiva; Manutenção Preditiva; Inspeções.

Na Gestão de ATIVOS a Engenharia de Confiabilidade pode ser aplicada desde a fase de projeto desdobrar a confiabilidade especificada para o produto para seus respectivos sistemas, subsistemas e componentes, como demonstrado na Figura 2.4. Isso pode ser feito, também, utilizando a metodologia da confiabilidade de sistemas.

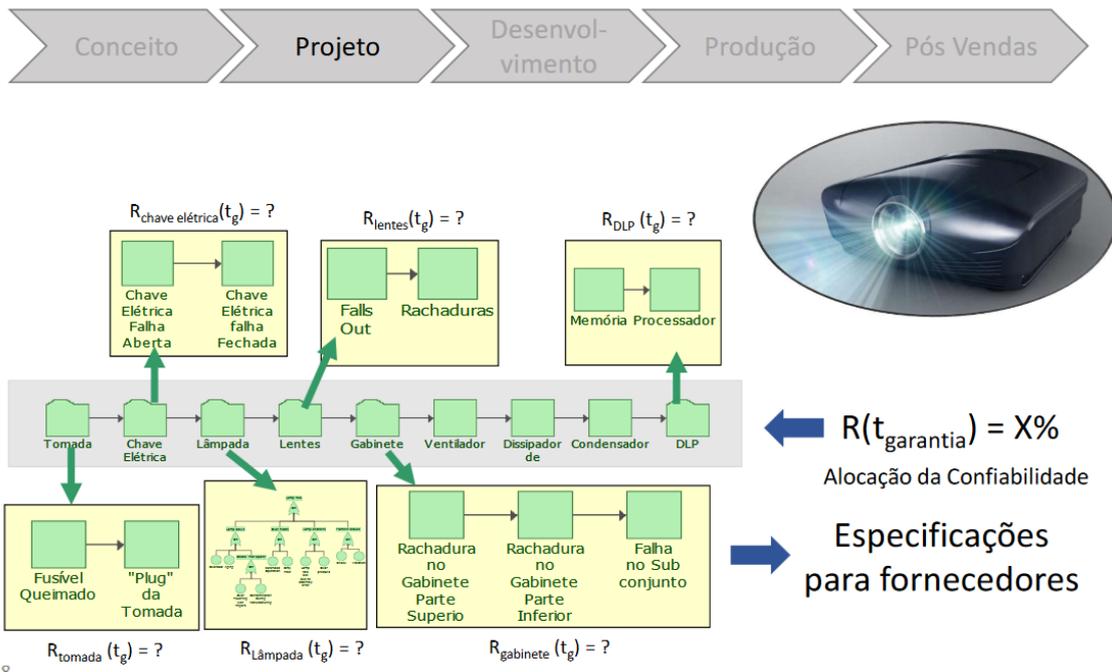


Figura 2.4 - Aplicação da confiabilidade de sistema na fase de projeto na gestão de ativos.

### 2.2.1 - Confiabilidade

Define-se confiabilidade como sendo a probabilidade de um item desempenhar satisfatoriamente a função requerida, sob condições de operação estabelecidas, por um período de tempo pré-determinado. Uma vez que a confiabilidade e o tempo de falha de um dado componente são eventos complementares, fica evidente a relação entre o estudo de confiabilidade e o sucesso da manutenção preventiva. Matematicamente, a confiabilidade é descrita segundo a Eq. (2.1).

$$C(t) = 1 - \int_0^t f(x) dt \quad (2.1)$$

Onde:

$C(t)$ : é a confiabilidade;

$f(t)$ : é a função da densidade de probabilidade (f. d. p.);

$t$ : é o período de vida útil.

Dentre as funções de densidade de probabilidade existentes, a distribuição Weibull é a mais utilizada em estudos de confiabilidade, análise de sobrevivência e em outras áreas devido a sua versatilidade. Uma distribuição é definida matematicamente por

sua equação de função de densidade de probabilidade (f. d. p.); existem outras formas de parametrizar a distribuição weibull, mas a expressão mais geral da f. d. p. da distribuição Weibull de 3 parâmetros, é dada pela expressão proposta por COLOSIMO e GIOLO (2006), conforme Eq. (2.2).

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.2)$$

Onde:

$t > 0$ ;  $\beta > 0$  e  $\eta > 0$

$t$ : é a variável que define o período de vida útil podendo ser expresso em distância percorrida (km), em número de ciclos (n) ou em tempo de funcionamento (h);

$\beta$ : é o parâmetro de forma;

$\eta$ : é o parâmetro de escala;

$\gamma$ : é o parâmetro de posição.

Nos estudos de engenharia de confiabilidade, o parâmetro  $\gamma$  caracteriza a vida inicial do item sendo, na maioria das aplicações, desprezado,  $\gamma=0$ . Nesses casos, onde assume-se  $\gamma=0$  a Eq. (2.2) pode ser simplificada e Distribuição Weibull fica representada na sua forma biparamétrica, conforme Eq. (2.3).

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.3)$$

Substituindo-se a Eq. (2.3) na Eq. (2.1) temos a Eq. (2.4):

$$C(t) = 1 - \int_0^t \left( \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \right) dt \quad (2.4)$$

Calculando-se a integral proposta na Eq. (2.4) temos a seguinte função para o cálculo da confiabilidade:

$$C(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.5)$$

No que segue, são apresentados os parâmetros característicos da distribuição Weibull a fim de se caracterizar seus efeitos no comportamento da função de densidade de probabilidade, das curvas de confiabilidade e de taxa de falhas e, conseqüentemente, nas estratégias da gestão da manutenção.

O parâmetro de forma ( $\beta$ ).

O parâmetro  $\beta$  é um número puro, isto é, adimensional e como o próprio nome sugere, tal parâmetro interfere no formato da função de densidade de probabilidade como veremos a seguir:

Quando  $\beta < 1$  a função densidade de probabilidade (f. d. p.) de falhas apresenta frequências elevadas na parte inicial da vida, tais falhas são comumente denominadas de falhas prematuras e, de maneira geral, estão associadas a defeitos originados no projeto, na instalação ou na operação. Nestes casos, do ponto de vista da gestão da de manutenção, não há como se antever tais defeitos e para itens nesta condição mostra-se mais indicado um estudo com referência em fabricante ou material.

Quando  $\beta = 1$ , a função densidade de probabilidade equivale à função distribuição exponencial. Nesse caso, a taxa de falhas é constante e as falhas ocorrem de forma aleatória. Esse comportamento está associado, sobretudo, às características de projeto do equipamento avaliado e também denominado vida útil. Nesse caso, a manutenção corretiva e a manutenção preventiva são as mais indicadas.

Quando  $\beta > 1$  existem modos de falhas predominantes e, nesses casos, após efetuar-se estudos sobre os tempos médios entre falha (MTBF) e se analisar o efeito e o modo da falha (FMEA), é possível a manutenção preventiva dos itens que estão sendo analisados, são apresentados à densidade de probabilidade, a confiança e a taxa de falhas considerando-se uma distribuição Weibull biparamétrica

O parâmetro de escala ( $\eta$ ) está associado à vida característica de um determinado componente. Ele descreve e representa uma distância, tempo ou ciclos transcorridos desde o início da atividade até o momento da falha. Nesse sentido, caso não apresente defeitos, falhas prematuras, as falhas predominantes de um determinado componente, que, como abordado anteriormente, estão associadas ao desgaste do mesmo, tendem a ocorrer nas proximidades de sua vida característica; ou seja, nos casos em que ocorrem falhas predominantes, as mesmas tendem a se concentrar nas proximidades do parâmetro de escala. De maneira geral, podemos afirmar que:

- Se  $\eta$  é aumentado, enquanto  $\beta$  é mantido constante, a distribuição, ou seja, a “curva” começa a se estender, esticar para direita e sua altura diminui, ao manter sua forma e posição.
- Se  $\eta$  é diminuído, enquanto  $\beta$  é mantido constante, a distribuição começa a se estreitar para dentro, para esquerda (isto é para sua origem ou para 0 ou  $\gamma$ ), e aumenta a sua altura.

### 2.2.2 - Manutenibilidade

O tempo despendido com uma manutenção preventiva ou corretiva nunca será determinístico. Ele será um conjunto de variáveis aleatória contínuas, tal como os tempos até a falha. Para analisar os tempos de parada será utilizado os conceitos da análise de dados de vida (LDA).

A Manutenibilidade indica a eficiência do serviço, do trabalho efetivamente despendido em uma atividade. O Tempo para Reparo (TTR – Time To Repair) indica todo o tempo desde uma falha até a disponibilidade do equipamento, entretanto não determina o tempo de “ferramenta” gasta pela equipe de manutenção. Este tempo de mão-de-obra que pode ser estratificado do TTR, indica a Manutenibilidade do processo.

### 2.2.3 - Disponibilidade operacional e disponibilidade inerente

Disponibilidade é um indicador de desempenho do sistema que depende do tempo de operação e do tempo parado, incluindo a logística envolvida no processo com transporte, compra de material, contratação de serviço e efetiva atividade realizada.

A disponibilidade operacional é mensurada levando-se em consideração todos os tipos de eventos que provocaram a parada do sistema, incluindo, além das manutenções, as paradas administrativas, atrasos logísticos, falta de insumos, eventos externos, etc. A disponibilidade operacional é dada pela razão do tempo em que o sistema ficou disponível, pelo tempo total do ciclo de operação. Onde o tempo total do ciclo de operação é o período que está sendo analisado. A disponibilidade operacional é a disponibilidade sentida pelo cliente e pelos acionistas.

$$A_{operacional} = \frac{\text{Tempo disponível}}{\text{Tempo total do ciclo de operação}}$$

Alguns conceitos importantes são necessários para compreensão das equações e desenvolvimento do trabalho, tais como:

- MTTF (Mean Time to Failure), é o tempo médio para ocorrência de uma falha.
- MTTR (Mean Time to Repair), é o tempo médio para realização do reparo da ocorrência.
- MTBF (Mean Time Between Failures), é o tempo médio entre duas falhas.

Segundo FOGLIATTO (2009), a disponibilidade do equipamento pode ser dada por:

$$A(t) = \left( \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \right) e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (2.6)$$

Onde:

$$\lambda = \frac{1}{MTTF};$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR};$$

$t$  = tempo de operação.

A disponibilidade inerente ou Assintótica é calculada considerando somente os tempos de reparo corretivos realizados no sistema. Para um único item, a disponibilidade inerente é calculada dividindo o valor do MTTF pela soma do MTTF com o MTTR.

“Em situações em que o tempo de reparo for considerado desprezível, a disponibilidade do equipamento, para uma dada missão de duração  $t$ , será de 100%. Assim, o estudo da disponibilidade de equipamentos pressupõe um processo de ocorrência de falhas e reparos durante sua operação” (FOGLIATTO, 2009).

Disponibilidade indica a probabilidade de um equipamento estar operacional em um determinado tempo. Esta definição não pode ser confundida com a definição de Confiabilidade que é a probabilidade de não falhar em um determinado tempo. Estes conceitos têm sutis, mas importantes diferenças que determina todo o entendimento de um dado sistema.

Enquanto a Confiabilidade está relacionada às características do equipamento, a disponibilidade está relacionada a todo o sistema, não só o equipamento em questão, mas também a qualidade da Manutenção, como evidenciado na Figura 2.3.

#### **2.2.4 - Manutenção corretiva**

Consiste em ações que irão colocar um sistema de volta ao estado operacional. Envolve o reparo ou substituição do item responsável pela falha do sistema. É realizada em intervalos imprevisíveis porque o tempo de falha de um item não é conhecido a priori. Seu objetivo é o de restaurar o sistema para um estado de operação dentro do menor tempo possível e com uma qualidade satisfatória. Inclui as seguintes etapas básicas: 1. Diagnóstico do problema; 2. Reparo e/ou substituição; 3. Verificação e liberação.

Manutenção Corretiva não planejada é a atividade de emergência ou urgência, que geralmente apresenta quadro de falha total da função do equipamento. Apresenta na maioria das ocorrências, alto custo por causa da quebra inesperada exigir um h-h (hora homem) fora de programação, compra de material e/ou serviço especializado de imediato, tudo sem planejamento prévio o que poderia reduzir custos logísticos e diretos.

Além do custo superior, a manutenção não planejada pode acarretar em problemas técnicos em outros equipamentos ou sistemas, gerando mais custos e ineficiência operacional da Planta Industrial.

“No caso de uma empresa ter a maior parte de sua manutenção corretiva na classe de não planejada, o seu departamento de manutenção acaba sendo comandado pelos equipamentos e o desempenho da empresa, certamente, não estará adequado às necessidades de competitividade atuais” (KARDEC, 2009).

### **2.2.5 - Manutenção preventiva**

Uma manutenção preventiva envolve a prática de substituir itens antes que eles falhem, a fim de promover o funcionamento contínuo do sistema. A periodicidade para realizar uma manutenção preventiva baseia-se na observação do histórico de vida do item, dos seus mecanismos de desgaste, e na sua importância para o funcionamento contínuo do sistema. A Figura 2.5 indica a tendência de falha em um equipamento com o passar do tempo operacional e o momento adequado para realizar uma manutenção de melhoria da condição.

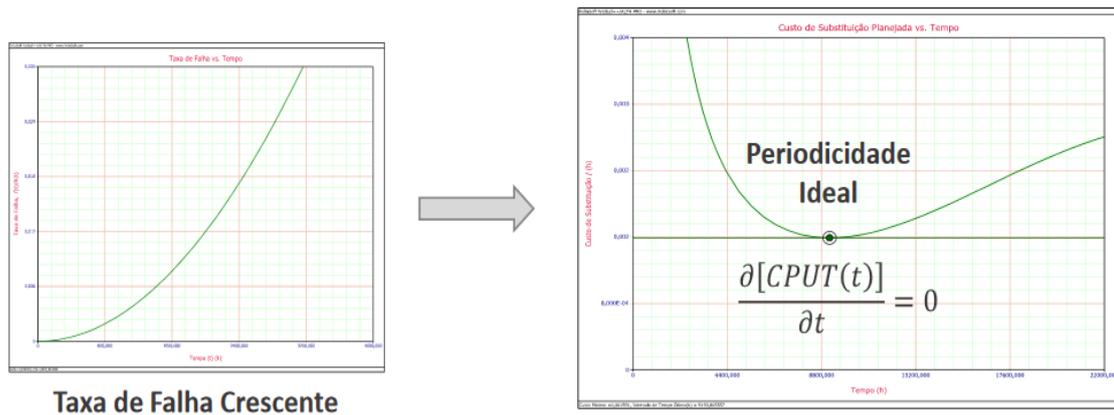


Figura 2.5 - Relação entre taxa de falha e momento adequado para substituição de um componente.

A ideia de Manutenção Preventiva é estender a vida útil de um ativo, rejuvenescendo componentes tornando-os “como novos” ou mesmo substituindo por novos propriamente ditos.

### 2.2.6 - Manutenção preditiva

Uma Manutenção Preditiva poderá ser aplicada quando for possível detectar uma falha potencial. Em outras palavras, toda vez que o modo de falha não for catastrófico (falhas paramétricas). Falhas paramétricas permitem o monitoramento da evolução de certas características (vibração, trincas, temperatura, etc.). Esse monitoramento pode ser realizado pela Medição Direta ou Indireta e algumas aplicações podem ser vistas na Figura 2.6.



Figura 2.6 - Aplicações de manutenção preditiva em máquinas.

Técnicas de preditivas geralmente estão relacionadas à tecnologias mais avançadas e menos intrusivas, como a avaliação térmica de um motor elétrico ou seu perfil de vibração.

#### 2.2.6.1 - Análise de óleo

Alguns importantes equipamentos industriais utilizam óleo lubrificante dentro ou entre seus componentes de modo a permitir a adequada movimentação com redução de atritos não desejáveis e ainda regular a temperatura no sistema.

A análise de óleo nos equipamentos visa indicar a condição do produto através da comparação com a sua estrutura físico-química original, sem contaminantes. A partir desta comparação são isoladas as características destoantes da normalidade e analisadas suas possíveis causas. É possível, a partir das análises, verificar o desgaste de componentes móveis promovendo a ampliação do tempo de vida útil dos equipamentos das empresas. As ações provenientes desta análise preditiva reduzem o custo de manutenção com paradas mais longas, controla o desgaste e troca de material e aumenta vida útil dos equipamentos.

Nas Bombas Hidráulicas instaladas na maioria da Indústria, o óleo lubrificante é depositado na caixa de mancais de rolamento que é usado para diminuir, ao máximo possível, os efeitos nocivos do atrito entre a superfície do eixo e dos seus apoios. A Figura 2.7 demonstra onde estão localizados o mancal e a região lubrificada pelo óleo que é coletado na Manutenção Preditiva.

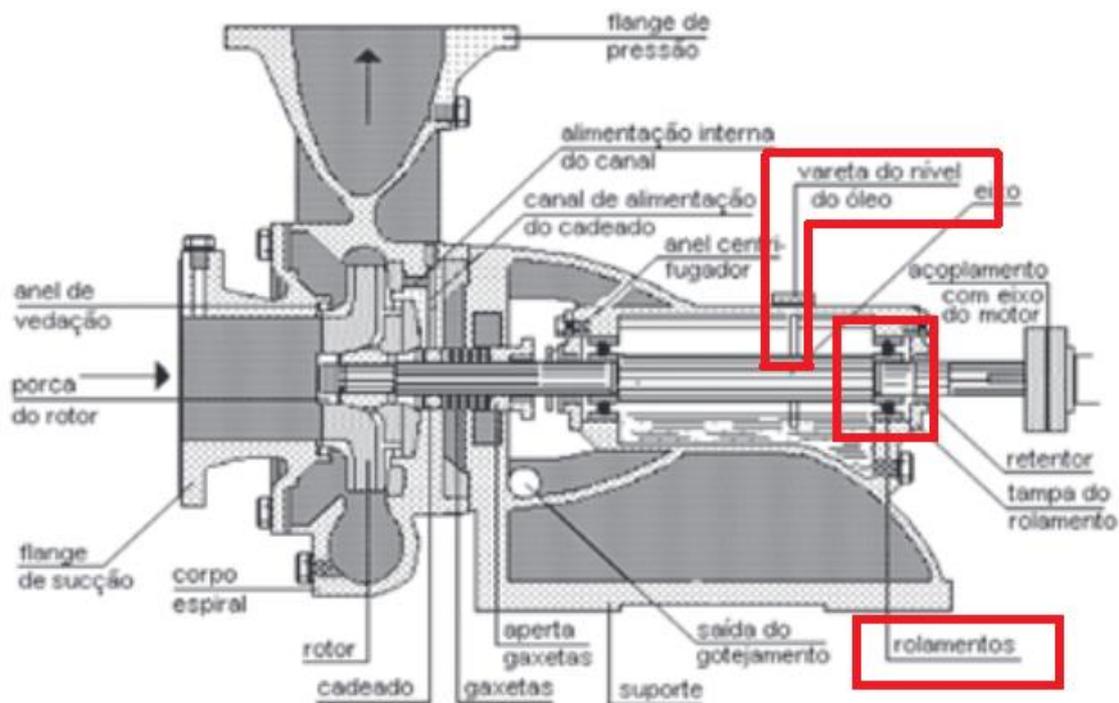


Figura 2.7 - Principais componentes de um motor e destaque para os rolamentos.

Cada item analisado no resultado da análise apresenta um limite aceitável, que indica estar dentro das condições operacionais o produto, garantindo sua funcionalidade. Quando o resultado se apresenta próximo ao limite, um estado de alerta ou ATENÇÃO é indicado. Quando o resultado está acima do limite há indicação de INACEITÁVEL e providências devem ser tomadas, dependendo do tipo de problema diagnosticado. Fato é que uma situação inaceitável do óleo lubrificante se traduz em uma condição operacional preocupante do equipamento não garantindo, pois, sua plena confiabilidade.

#### 2.2.6.2 - Análise de vibração

As máquinas rotativas, como motores elétricos, por exemplo, apresentam naturalmente vibrações na carcaça e componentes internos durante seu funcionamento. “A análise de vibrações busca a previsão ou antecipação da falha, medindo parâmetros que indiquem a evolução de uma falha a tempo de serem corrigidas” (SIQUEIRA, 2005).

Os rolamentos ou mancais são componentes importantes em processos industriais afetados pela vibração e a falha nesses componentes além perdas econômicas podem comprometer a segurança dos usuários e riscos ao meio ambiente. Os rolamentos podem apresentar defeitos de fabricação ou desgastes com o tempo de utilização do equipamento. A Análise de vibração relaciona estes defeitos a sinais coletados pelo instrumento

específico chamado Coletor de Vibrações e contribui para evitar o desperdício de energia e desgaste nas peças. Isso porque cada componente possui diferentes tipos de frequências, estas são isoladas e identificadas em sua particularidade.

A coleta do comportamento das vibrações dos pontos da máquina pode ser realizada on-line, através de instrumentos instalados e conectados via rede a um supervisor, ou através de instrumento manual conduzido pelo próprio profissional. A leitura dinâmica é transformada em espectros de frequência que indica a intensidade da característica observada, deslocamento, velocidade, aceleração. Todo este cenário da coleta à análise pode ser visualizado na Figura 2.8.

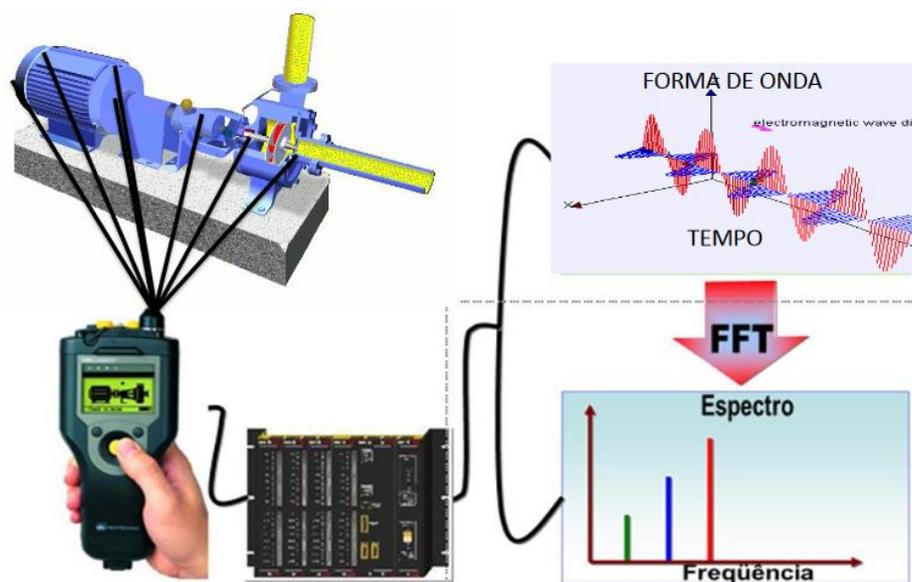


Figura 2.8 - Aplicação da técnica de análise de vibração em máquina rotativa.

Os critérios adotados para avaliação do resultado das medições serão os mesmos dispostos na Tabela 2 da ABNT NBR 10082 – Ensaio não destrutivo – Análise de Vibrações, onde determina-se os limites de vibração para os Motores e Bombas abordados neste trabalho. Com resultado acima de 25% dos limites estabelecidos nestas Tabelas da NBR 10082, não há aceitabilidade da condição operacional. Baseado na Tabela citada para este estudo serão considerados:

- Zona de avaliação B: Máquinas com nível de vibração classificadas dentro desta zona são consideradas para operação contínua para longos períodos de operação, sem restrição;
- Limite de vibração para Motor: 2,8 mm/s;
- Limite de vibração para Bomba: 4,5 mm/s.

Diversos problemas podem ser diagnosticados com este tipo de preditiva: desbalanceamento, folgas mecânicas, eixo empenado, defeitos no rolamento, problemas na lubrificação, falhas elétricas, engrenagens defeituosas, falhas em polia, desalinhamentos etc. Caso essas falhas não sejam detectadas a tempo, podem levar a um mau funcionamento da máquina e até comprometer outros componentes, podendo sacrificar todo o conjunto.

### 2.3 - INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

“A tomada de decisão tem se tornado uma atividade importante no mundo moderno, atrelado aos vários avanços tecnológicos atualizados e ferramentas de decisão assistida. A tecnologia sozinha, por vezes, não consegue entregar uma decisão sem considerar a capacidade cognitiva humana” (ABDULLAH, 2013).

“A lógica Fuzzy é útil em tomadas de decisão, onde as variáveis individuais não são definidas em termos exato, como na aplicação em logística e planejamento de manutenção, o uso da lógica fuzzy pode significar vantagens adicionais em minimização de custos, devido à facilidade de implementação dessas estratégias” (SIMÕES, 2007).

A ferramenta de Inteligência Artificial utilizada, Fuzzy, irá relacionar o olhar qualitativo humano sobre uma condição a resultados decisórios necessários para promover a maior eficiência no sistema em foco. As entradas do sistema a ser avaliado não são digitais, ou seja, possuem vários níveis entre o mínimo e máximo possíveis e para cada nível há uma sensível variação na avaliação, assim como demonstrado na Figura 2.9, este tipo de problema é tratado como lógica nebulosa.

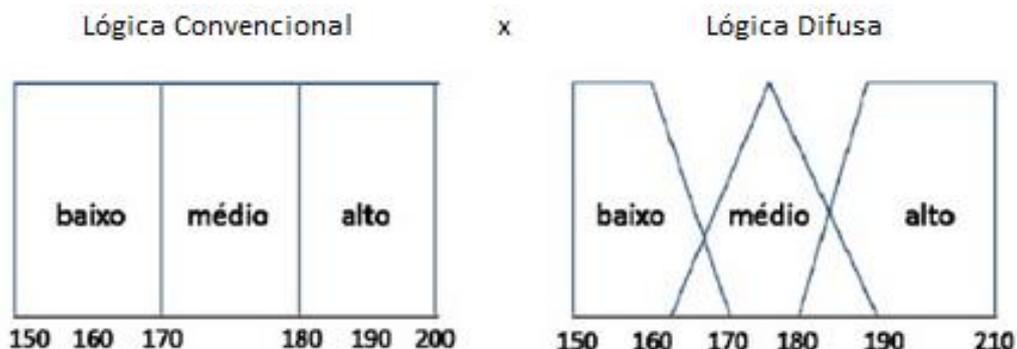


Figura 2.9 - Diferença de entendimento em ter lógica convencional e *fuzzy*.

O processo de transformar as variáveis de entrada de forma qualitativa com base nos intervalos inter-relacionados que representa subjetivamente a realidade é chamado

FUZZIFICAÇÃO. Assim, é chamado de DEFUZZIFICAÇÃO o resultado ou classificação objetiva através de número, geralmente, a partir das entradas qualitativas ou subjetivas e aplicação de inferências e regras.

Segundo CORRÊA e BAÉSSA (2007) a construção da base de regras envolve: a escolha das variáveis linguísticas, a seleção do formato das regras condicionais, a seleção dos termos associados a cada variável linguística e a síntese do conjunto de regras. Fuzzificação é um processo de conversão da entrada numérica em conjuntos fuzzy, e é uma operação fundamental, pois em grande parte das aplicações de lógica fuzzy os dados são numéricos, sendo necessário então fuzzificar estes em conjuntos fuzzy. Os autores explicam que um conjunto numérico  $X$  é convertido em um conjunto fuzzy  $x$  por meio de um fuzzificador:  $x = \text{fuzzificador}(X)$ . Para estes autores, a estratégia de fuzzificação a utilizar é definida a partir do tipo de inferência utilizado, e que a base de conhecimento é composta pela base de regras e base de dados, sendo que a base de regras é o conjunto de regras que descrevem o sistema, e estas regras são definidas da seguinte forma: SE (entrada) ENTÃO (saída) antecedente consequente

Uma decisão gerencial está intimamente relacionada a uma informação direta, exata e palpável, de preferência sob controle do responsável do processo ou da instalação, entretanto a maior parte das condições e situações geradoras de resultados não são exatas, apresentando ponderações e subjetivismo, além de serem interdependentes. É dentro desta premissa que há importância de uma aplicação de inteligência artificial, mesmo que simples, como lógica Fuzzy, pois esta, estratifica o que há de relação qualitativa e subjetiva dos dados de controle e apresenta resultados mensuráveis e absolutos, mesmo a partir de um pool de informações misturadas. O gestor do processo ou analista, estabelece as regras e inferências do sistema de modo a obter os tipos de saída lógicas que correspondem às entradas variáveis, como demonstrado na Figura 2.10.

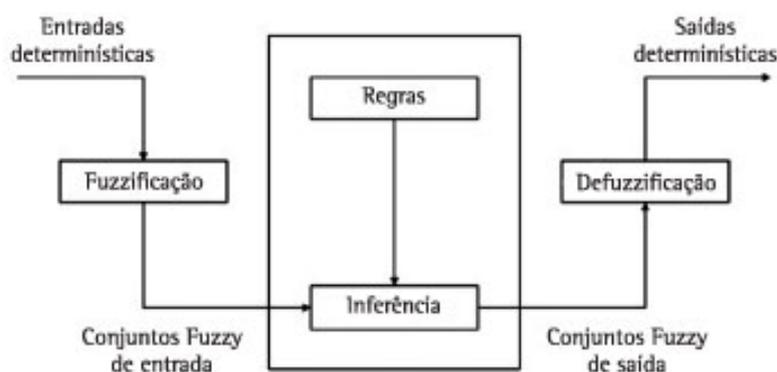


Figura 2.10 - Esquema de processos da lógica *fuzzy*.

A confiabilidade, disponibilidade, condição de vibração de um sistema não é apenas 0 (baixo) ou 1 (alto). Entre a pior e melhor condição, há uma gama de condições de interesse para o sistema absorver, trabalhar via regras estabelecidas e entregar uma resposta de interesse.

Pode-se dizer que a aplicação da Lógica Difusa em um determinado problema não é ideal para qualquer outro problema, a não ser que tenhas as mesmas condições de entrada e objetivos de saída. Cada configuração depende da ideia e objetivo do analista ou gestor da situação em questão, tornando-se assim uma ferramenta amplamente utilizável em diversas áreas da ciência.

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os alicerces do projeto serão duas abordagens modernas e promissoras no mercado e no meio científico. Na área de gerenciamento será abordada a Gestão de Ativos, prática não tradicional e que já se mostra mais eficiente do ponto de vista financeiro e técnico. O estudo de confiabilidade dos equipamentos e sistemas tem sido tratado com maior seriedade no meio científico e no mercado nos últimos anos, e assim será tratado neste projeto. No que diz respeito à aplicação científica e tecnológica, a Inteligência Artificial surge como ferramenta de resolução do problema proposto. Com a base de dados influentes no problema já comentado e com o objetivo de se obter algo prático e exequível, o cérebro humano não seria capaz de conceber uma resposta útil.

Os objetos de estudo são 6 equipamentos de transferência de energia compostos por um motor elétrico e uma bomba hidráulica, cada um. Os equipamentos são denominados Motobombas e atuam na transferência de Petróleo e Gás Liquefeito de Petróleo, o GLP.

Neste trabalho as Bombas de Petróleo serão eventualmente denominadas B8001 e as Bombas de GLP eventualmente denominadas B8002. Estes códigos são internos da TRANSPETRO e servem para identificar os equipamentos em diversos documentos técnicos internos.

Para desenvolvimento do estudo de Confiabilidade o período de observação dos dados foram de 5 (cinco) anos, de 2016 a 2020, gerando a base de dados necessária para traçar um perfil de confiabilidade mais próximo da realidade operacional. Esta base de dados é constituída de manutenções corretivas, ou seja, provenientes de situações indesejadas e que naturalmente provocaram perda de função parcial ou total da máquina. Os dados foram devidamente tratados com a eliminação de informações incoerentes em virtude de erros humanos ou falhas do próprio sistema operacional de monitoramento de informações de campo. Após coleção dos dados, filtragem e tratamento, determina-se os índices de Confiabilidade e Disponibilidade do equipamento de acordo com um nível de confiança. Os subitens 3.2 e 3.5 abordam esta etapa do trabalho baseada em dados históricos e probabilidades de falha ou funcionamento adequado.

Outros parâmetros da condição operacional do equipamento verificados foram os níveis de vibração e qualidade do óleo lubrificante, detalhados no item 3.3. Os níveis de vibração e contaminantes de óleo podem determinar se o equipamento está com falha incipiente, ou seja, prestes a perder sua função gerando um alerta para a gestão do ativo.

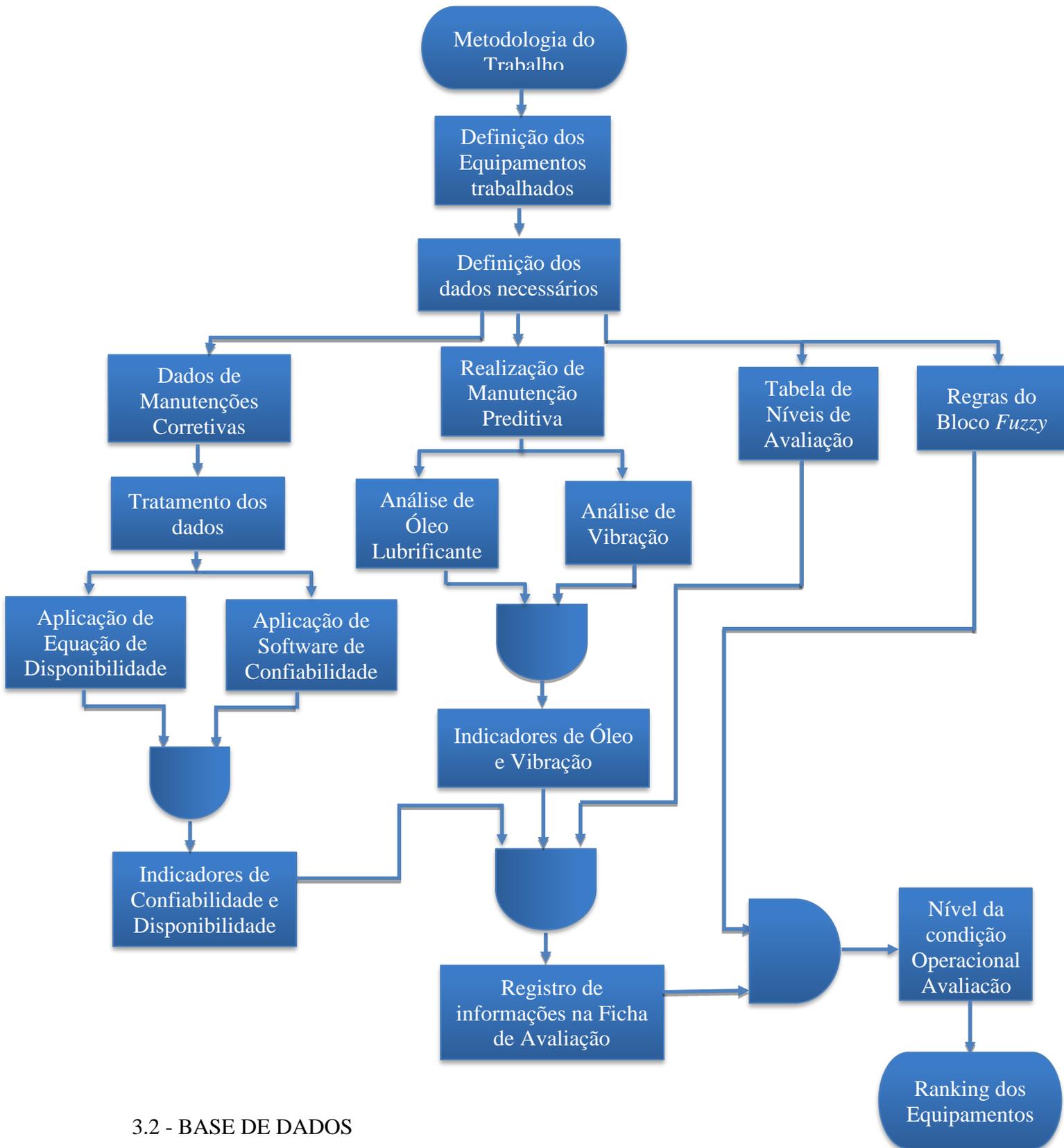
Os dados analisados nos itens 3.2 ao 3.5, serão determinantes para definir qual o grau de priorização deve ser dado para a Manutenção dos equipamentos, auxiliando assim na estratégia que a Gestão de Ativos da Unidade deve adotar.

Para que se obtenha um índice ou um número que determine a priorização dos equipamentos baseados em parâmetros variados e independentes é necessário o desenvolvimento de um sistema que possa interpretar todos os dados e os relacionar dentro do mesmo contexto técnico. O relacionamento entre esses dados coletados e o impacto gerado na planta industrial é subjetivo e depende da interpretação de cada profissional acerca da situação colocada. Um nível de confiabilidade de 90% de um equipamento pode ser visto como excelente por um profissional, mas pode ser interpretado como apenas bom por outro colega de profissão. Como desenvolver um sistema que possa relacionar dados objetivos à diferentes percepções humanas e ter como resultado um indicador? É com base nesta questão que parece complexa é que a Inteligência Artificial, e especificamente a Lógica Fuzzy, deve ser utilizada. Zonas de percepção ou opinião qualitativa de um determinado parâmetro são geradas e naturalmente ficam sobrepostas, gerando entendimentos “confusos”, por isso a referência ao termo “Fuzzy” que tem o significado de Difuso ou espalhado em várias direções, gerando justamente a sobreposição das faixas de dados analisados. A modelagem do sistema que leva em consideração as faixas difusas, deve considerar a contribuição de cada faixa em um determinado ponto. E é esta contribuição que determinará objetivamente o resultado de uma análise complexa e heterogênea.

Após tratamento dos dados, os mesmos serão inseridos dentro deste sistema modelado supracitado, que deverá seguir as regras previamente determinadas. As regras do modelo são baseadas nas percepções reais e experiência dos profissionais que conhecem a Unidade Operacional e, principalmente, as máquinas instaladas.

O resultado do processo demonstrará uma única nota ou índice de cada equipamento que denotará qual o grau de preocupação aquela máquina está gerando no momento. A gestão da Unidade pode desta forma antecipar ações imediatas e planejamentos futuros, com base em dados reais e experiência dos seus profissionais técnicos que atuam diariamente no sistema industrial. Este cenário oferece maior

segurança na tomada de decisão de um gestor de ativos, pois engloba tecnologia e mão de obra já inseridos no contexto de determinada planta industrial.



### 3.2 - BASE DE DADOS

O trabalho será embasado em Datasets presentes no Sistema de Gestão utilizado no sistema Petrobras, chamado SAP, bastante difundido no meio empresarial. Para se obter uma abordagem holística do problema devem estar relacionados dados técnicos tais como plano de manutenção preventiva, preditiva, histórico de corretivas, e dados auxiliares como custos de material, homem hora relacionado às atividades, importância operacional do ativo, dentre outros. Os Datasets do Terminal de Coari ficam disponíveis no centro T060 do sistema SAP Transpetro, e diversas transações são utilizadas de modo a obter os dados de interesse. Na Figura 3.1 é possível ver os dados de interesse do estudo disponíveis no software.

**Cumprimento de Programação das ordens**

Status da ordem

Pendente  Em processamento  Encerrado  Histórico

Status inclusivo  até

Status exclusivo  até

Seleção de ordens

Ordem			
Tipo de ordem	ZCOR		
Tipo atividade.manut.			
Centro localização	T060		
Divisão	ADM3		
Centro planejamento			
Grp.planej.manutenção			
Data de referência	01.01.2016	até	31.12.2019
Data de entrada		até	
Centro financeiro		até	
Data de encerramento		até	
Equipamento	10168824		

**Código para Manutenções Corretivas**

**Local da Unidade Operacional**

**intervalo de tempo que ocorreram as Manutenções**

**Código do equipamento objeto do estudo**

Figura 3.1 - Tela do sistema de armazenamento de dados dos equipamentos.

As informações estão organizadas em planilha com as datas das ocorrências, manutenções e disponibilidade, além da identificação breve da falha, conforme Figura 3.2. Estas informações são suficientes para gerar cálculos de parâmetros de interesse do estudo.

Data-base do início	Data real do fim	HH Previsto	HH Realizado	Custos totai	Custos tot.rea	Texto breve	Equipamento	Denominação objet
23/01/2017	25/01/2017	4	4	0	0	CORRIGIR FALHA NA BOMBA 8001A	10168824	BOMBA PET 700M3/I
11/10/2019	14/10/2019	12	12	0	0	REARME NO DISJUNTOR DA B-8001A	10168824	BOMBA PET 700M3/I
28/07/2017	03/08/2017	1	1	0	0	TROCA DE ÓLEO	10168824	
09/09/2019	11/09/2019	8	8	0	0	BOMBA PET B-8001A NÃO ARMA	10168824	
APURÇÃO DE FALHAS								
DATA E HORA DA FALHA	DATA E HORA DO INÍCIO DA MANUTENÇÃO	HORA DA VOLTA À DISPONIBILIDADE	TTR	TTF				
23/1/17 11:08	24/1/17 15:40	25/1/17 15:40	52:32:00	1/1/17 0:00	539:08:00			
29/7/17 15:18	3/8/17 10:00	3/8/17 11:00	115:42:00	25/1/17 15:40	4439:38:00			
19/9/17 14:55	14/3/18 9:30	14/3/18 16:00	4225:05:00	3/8/17 11:00	1131:55:00			
14/10/19 9:17	14/10/19 13:00	14/10/19 16:00	6:43:00	11/9/19 15:00	786:17:00			
			MTTR		MTTF			
			456:35:00	4565:50:00	1983:25:00			

Figura 3.2 - Planilha de informações e cálculos de parâmetros.

### 3.3 - ANÁLISE DAS MANUTENÇÕES PREDITIVAS

#### 3.3.1 - Análise de óleo

A coleta de óleo é realizada na caixa de mancal do conjunto motobomba através de uma bomba manual e posteriormente é armazenada a amostra em um recipiente se impurezas. A prática da coleta de óleo não pode ser menosprezada, pois uma mínima contaminação mascara todo o resultado e análise técnica. A amostra é enviada a um laboratório especializado para aplicação das técnicas evidenciadas na Figura 3.3.

Ensaio	Método
Aparência	IN HOUSE
PQI - Particle Quantification Index	ASTM D8184
Determinação de água em ppm	ASTM E2412 / E203
Espectrometria de emissão a plasma - 21 elementos	ASTM D5185
Espectrometria por infravermelho (FTIR) - Oxidação, Nitração, Sulfatação, Glicol e Fuligem	ASTM E2412
Viscosidade cinemática (100°CSt)	ASTM D445
Viscosidade cinemática (40°CSt)	ASTM D445
TBN - Número de basicidade total	ASTM D4739
Diluição por combustível em %	ASTM 7593
TAN - Número total de acidez	ASTM D664 / D974
Contagem de partículas - (4 µm, 6 µm, 14 µm)	ISO 4406
Contagem de partículas	SAE AS4059

Figura 3.3 - Ensaio físico-químico realizado no óleo lubrificante.

Os ensaios realizados aplicados à Análise de óleo estão relacionados às Normas nacionais e internacionais, e são suficientes para determinar a qualidade e condição do equipamento nas condições constatadas.

O resultado do estudo físico químico da amostra de óleo é apresentado em uma tabela com diversos parâmetros e referências, tal como um exame de sangue realizado em um ser humano. A Figura 3.4 demonstram esses dados coletados.

Ensaio	Método	Unidade	Valor	Limite	Limite	Limite	Limite	Condição
				LL	L	H	HH	
Ponto de fulgor COC								
Viscosidade 40°C								
Viscosidade 100°C								
IAT D-974								
IBT D-4739								
IBT D-2896								
Insolúveis visual								
Cont. Part. ISO								
Cont. Part. NAS 1638								
Cont. Part. ISO 4406 (> 4µm)								
Cont. Part. ISO 4406 (> 6µm)								
Cont. Part. ISO 4406 (> 10µm)								
Cont. Part. ISO 4406 (> 14µm)								
Cont. Part. ISO 4406 (> 21µm)								
Cont. Part. ISO 4406 (> 38µm)								
PQI								
Teor de cloro								
Teor de água destilado								
Teor de água KF								
Teor de glicol								
Diluição								
Fuligem								
Oxidação								
Nitração								
Sulfatação								
Zinco								
Boro								

Figura 3.4 - Resultado da análise de óleo.

### 3.3.2 - Análise de vibração

O estudo de Vibração está baseado na ISO 10826, especificamente em motores elétricos e bombas centrífugas, onde indicam os pontos que devem ser monitorados e os limites de aceitabilidade dos resultados da coleta.

A ISO 10816 – Vibrações Mecânicas, estabelece patamares de vibrações para determinar qualitativamente a condição do equipamento, como pode ser visto na Figura 3.5.

ENQUADRAMENTO NA NORMA ISO 10816					
ZONAS DE AVALIAÇÃO					
ZONA	DESCRIÇÃO	LIMITES DAS ZONAS (mm/s)			
		MOTOR		BOMBA	
		MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO
A	Níveis vibratórios baixos.				
B	Aceitável para longo período de operação.				
C	Não operar por longo período. Zona de atenção.				
D	Vibração capaz de causar danos. Zona de alerta.				

Figura 3.5 - Resultado de classificação da análise de vibração.

Os pontos de coleta da máquina são configurados no instrumento de análise através de rotas ou endereçamentos. Cada ponto de coleta tem seu endereço criado no Analisador que comunica, armazena e detalha os resultados diretamente no software instalado no computador.

As Figuras 3.6 e 3.7 mostram como estão organizadas as rotas de vibração coletadas pelo instrumento em conjuntos moto bombas na Unidade Industrial.

Código	Descrição	
9 X Y		
Piano de medição	Direção	V – Velocidade
		A – Aceleração
		E – Envelope
	Parâmetro	H – Horizontal
		V – Vertical
		X – Axial
		R – Radial
		1 – Mancal LNA do acionador
		2 – Mancal LA do acionador
		3 – Mancal LA do acionado
4 – Mancal LNA do acionado		

Figura 3.6 - Legenda dos pontos de medição para análise de vibração.

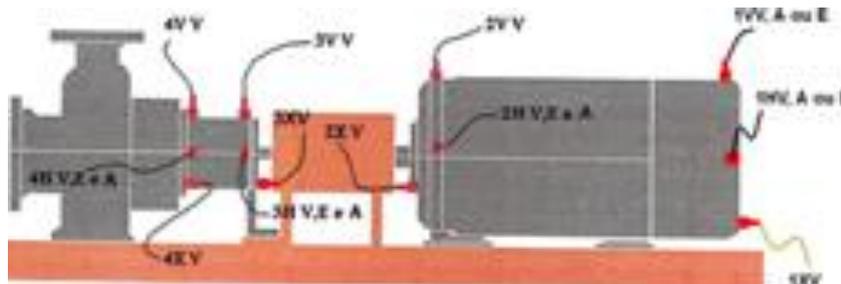


Figura 3.7 - Localização dos pontos de medição em motobomba hidráulica.

Os níveis de referência presentes na tabela de resultados são níveis históricos do equipamento, considerando os mesmos saudáveis ao longo do tempo. A classificação quanto a qualidade da condição operacional estará atrelada à variação do que foi medido ao nível histórico e a referência de variação aplicada à NBR 10082, indicando assim um grau de atenção com relação a mudança de comportamento do conjunto.

Aplicando-se a tolerância de 25% dos limites da NBR 10082, obtém-se:

- Limite de variação para Motor: 0,7 mm/s;
- Limite de variação para Bomba: 1,1 mm/s.

### 3.4 - CONFIGURAÇÃO DOS SISTEMAS

Os Sistemas e equipamentos em estudos são os sistemas de bombeio de Petróleo e GLP da Unidade, composto por 04 (quatro) e 02 (duas) bombas centrífugas horizontais, respectivamente. Para atender à solicitação do cliente a transferência de Petróleo deve contar com o êxito operacional de duas das quatro máquinas, já para o produto GLP apenas um equipamento desempenhando sua função é o suficiente.

Na Figura 3.8 está apresentado um quadro esquemático para cumprimento da transferência do Petróleo no Terminal para a embarcação.

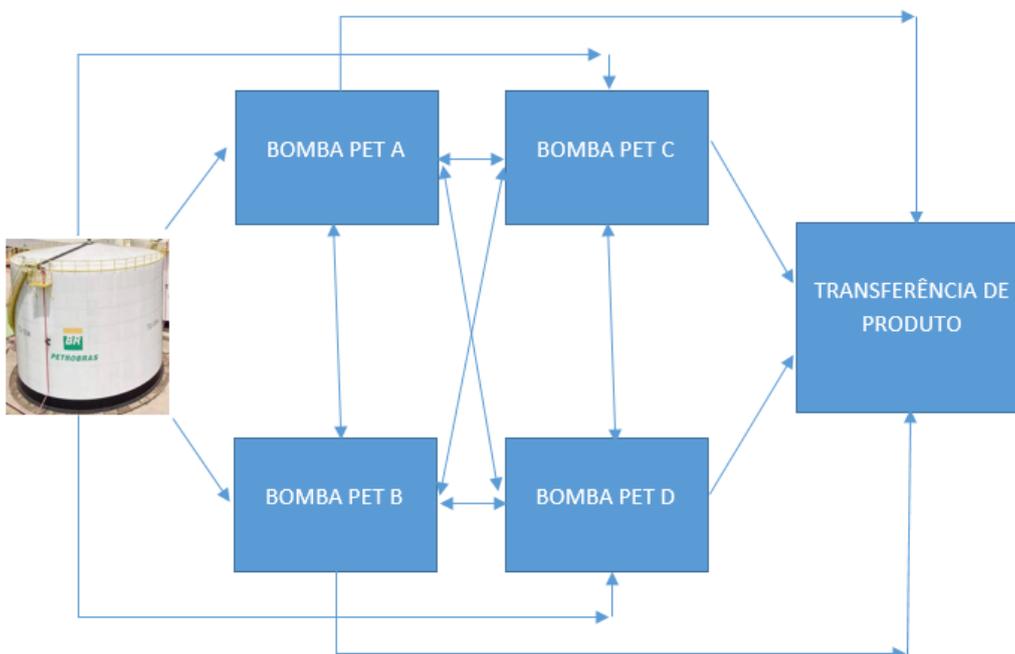


Figura 3.8 - Fluxo de transferência de petróleo.

São necessárias 02 bombas, com qualquer combinação entre elas, operando adequadamente para garantir a plena operação de transferência do Tanque instalado no Terminal para a embarcação que atracou na plataforma fluvial. A Tabela 3.1 apresenta as combinações entre equipamentos para realizar a função principal da Unidade de Petróleo, com destaque para as combinações suficientes, ou seja, a que apresenta condição para exercer a função com menor custo energético.

Tabela 3.1 - Tabela verdade para êxito da função principal do sistema de petróleo.

TABELA VERDADE				
BOMBAS				TRANFERÊNCIA
A	B	C	D	
F	F	F	F	F
F	F	F	V	F
F	F	V	F	F
F	F	V	V	V
F	V	F	F	F
F	V	F	V	V
F	V	V	F	V
F	V	V	V	V
V	F	F	F	F
V	F	F	V	V
V	F	V	F	V
V	F	V	V	V
V	V	F	F	V
V	V	F	V	V
V	V	V	F	V
V	V	V	V	V

As seis combinações em destaque na Tabela 3.1 serão foco do trabalho apresentado, relacionando os parâmetros técnicos e resultados esperados nos cenários de interesse. A Confiabilidade, disponibilidade e avaliação dos parâmetros na realização da função deste sistema serão sempre a complexa relação entre dois equipamentos.

Na Figura 3.9 está apresentado um quadro esquemático para cumprimento da transferência do GLP no Terminal para a embarcação.

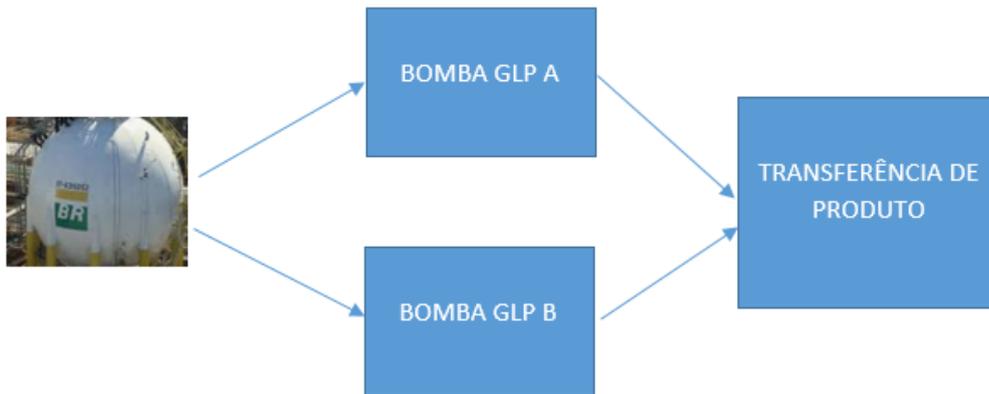


Figura 3.9 - Fluxograma de transferência de GLP.

No Sistema de Gás Liquefeito de Petróleo é necessária apenas uma máquina operando para cumprir a função. Sendo assim, o êxito para saída de transferência de GLP é apresentado na Tabela 3.2, com destaque para a configuração que atende a função da Unidade e apresenta menor gasto energético.

Tabela 3.2 - Tabela verdade para função de transferência de GLP.

TABELA VERDADE		
BOMBAS		TRANSFERÊNCIA
A	B	
F	F	F
V	F	V
F	V	V
V	V	V

A Confiabilidade, disponibilidade e avaliação dos parâmetros na realização da função deste sistema serão os mesmos do próprio equipamento que estiver em funcionamento, Bomba GLP A ou Bomba GLP B.

Nos Sistemas a confiabilidade do todo depende da confiabilidade individual de cada parte e de como as partes estão conectadas. A maioria dos sistemas são configurados em conexões série e paralelo. Sejam dois itens A e B. A conexão série ocorre quando a entrada do conjunto é a entrada de A, a saída de A é ligada à entrada de B e a saída de B é a saída do conjunto. A conexão paralela ocorre quando a entrada do conjunto é ligada às entradas de A e de B e a saída do conjunto é ligada às saídas de A e de B. O raciocínio

se estende a n itens, cujo cálculo é dado na Eq. (3.1) e Eq. (3.2). Conexões mistas podem ser calculadas decompondo o arranjo em suas conexões básicas (ELSAYED, 1996).

$$R_{série} = \prod_{i=1}^n R(n) \quad (3.1)$$

$$R_{paralelo} = \left[ 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R(n)) \right] \quad (3.2)$$

Com base nas equações comentadas acima pode-se concluir que para o Sistema de petróleo a confiabilidade será a multiplicação das confiabilidades individuais das bombas envolvidas na operação e para o sistema de GLP será a confiabilidade da própria e única bomba em atividade.

### 3.5 - ANÁLISE DE DADOS

Todas estas informações mais uma lista com o universo de ativos de interesse serão os inputs dos blocos que traduzirão a Confiabilidade do processo através do software ReliaSoft e sua ferramenta Webull ++, cuja tela de apresentação pode ser visualizada na Figura 3.10. Curvas de confiabilidade de cada equipamento ou subsistema serão elaboradas e registradas, considerando parâmetros cientificamente reconhecidos como MTBF, MTTR, disponibilidade, manutenibilidade e outros fatores pontuais que implicam no histórico.

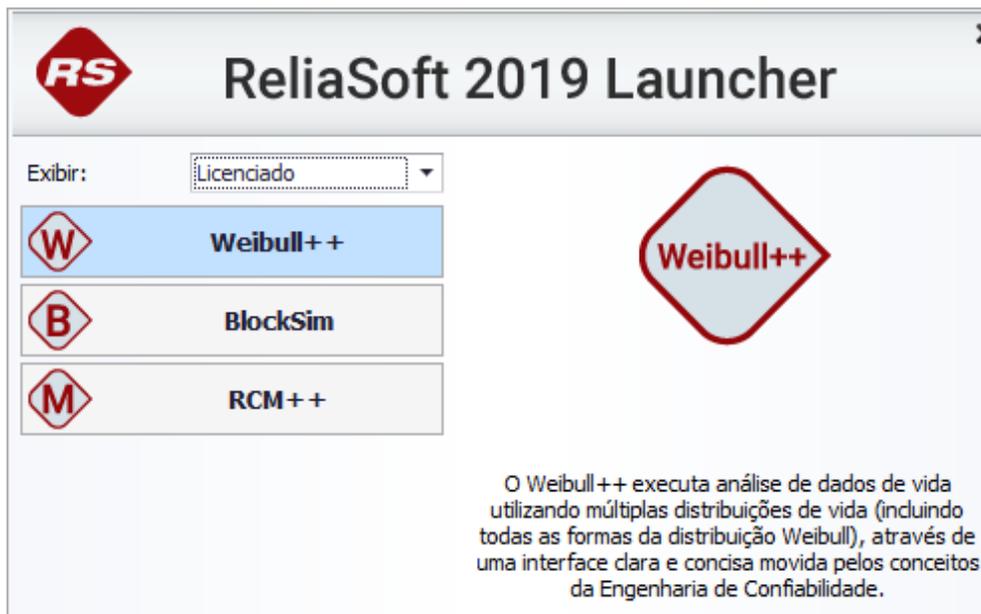


Figura 3.10 - Software utilizado para análises de confiabilidade.

As informações necessárias para que o Software possa realizar as devidas rotinas do estudo são as falhas e tempo até as mesmas ocorrências, como demonstrado na Figura 3.11. Os resultados de confiabilidade serão classificados em níveis de confiança, de acordo com considerações corporativas da empresa onde está sendo realizado o trabalho, como visto na Figura 3.12.

	Condição F ou S	Tempo até F ou S (h)
1		
2		
3		
4		
5		
6		

Figura 3.11 - Tela do Weibull++ com as informações necessárias para o estudo.

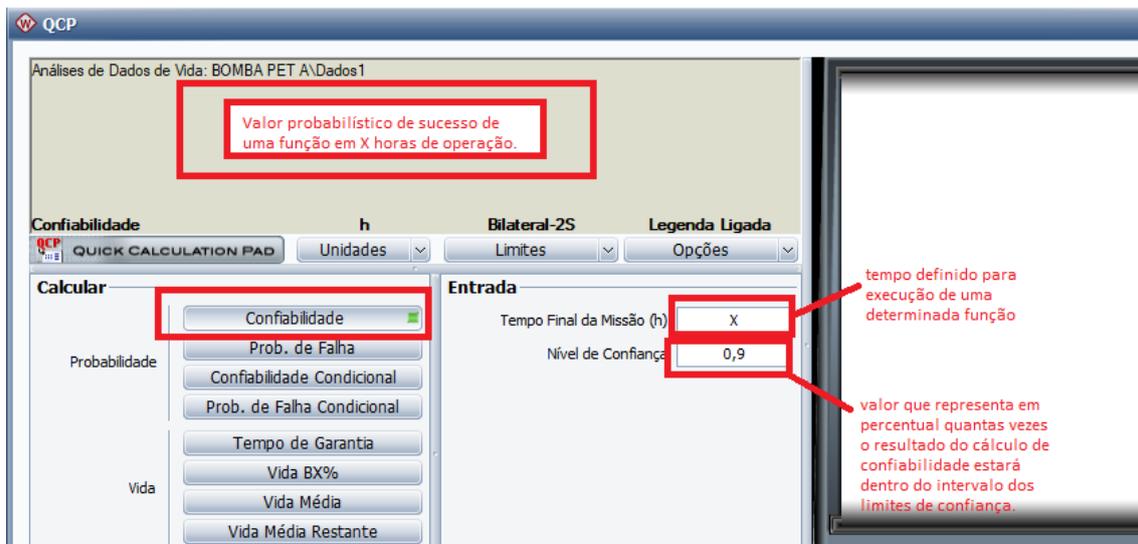


Figura 3.12 - Tela de apresentação do resultado de confiabilidade no Weibull++.

Os resultados das análises preditivas, Vibração e Óleo, também serão classificados em níveis qualitativos assim como a classificação do resultado de confiabilidade, para que a Modelagem de Inteligência seja realizada dentro de base de dados compatíveis.

### 3.6 - MODELAGEM DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Posteriormente, as respostas do Weibull ++ serão trabalhadas na ferramenta Fuzzy do software Matlab, uma ferramenta de Inteligência Artificial reconhecida por ajudar na tomada de decisão de situações complexas.

Serão atrelados aos *datasets* indicadores os ‘Péssimo’ – ‘Ruim’ – ‘Bom’ – ‘Muito bom’ – ‘Excelente’ para os resultados de Confiabilidade e Disponibilidade, de acordo com sua importância para a manutenção de cada Ativo e inseridos no bloco de inteligência baseado em Fuzzy. Este bloco que tem função de relacionar de maneira coerente todos os dados úteis terá como produto uma classificação decrescente, com relação à necessidade de intervenção, de todos os equipamentos de entrada da Unidade Industrial. Esta classificação indicará a Condição Operacional do equipamento ou Sistema e o planejamento de manutenção a curto ou médio prazo pode ser elaborado com base neste diagnóstico. A arquitetura geral de funcionamento do bloco Fuzzy no Matlab e exemplos de variação de entradas e saídas de sinais podem ser verificados nas Figuras 3.13 e 3.14.

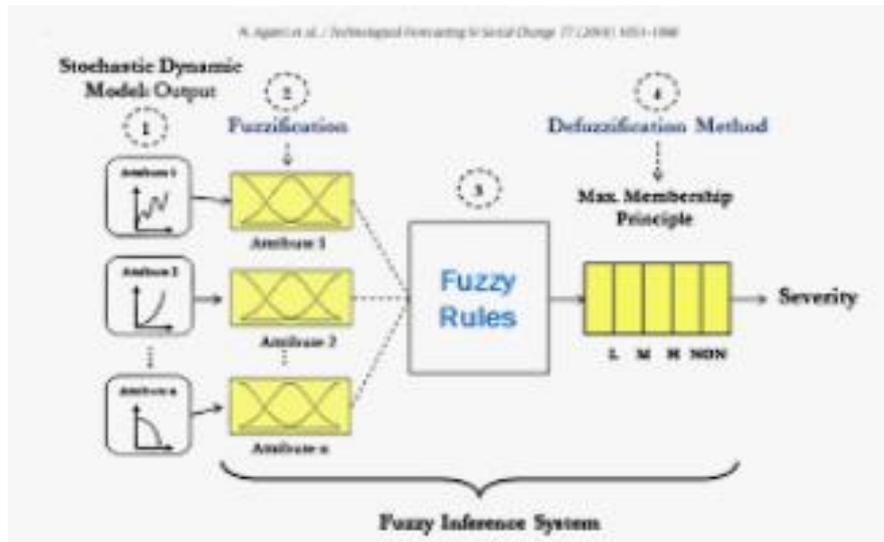


Figura 3.13 - Arquitetura básica dos sistemas *fuzzy* aplicado no Matlab.

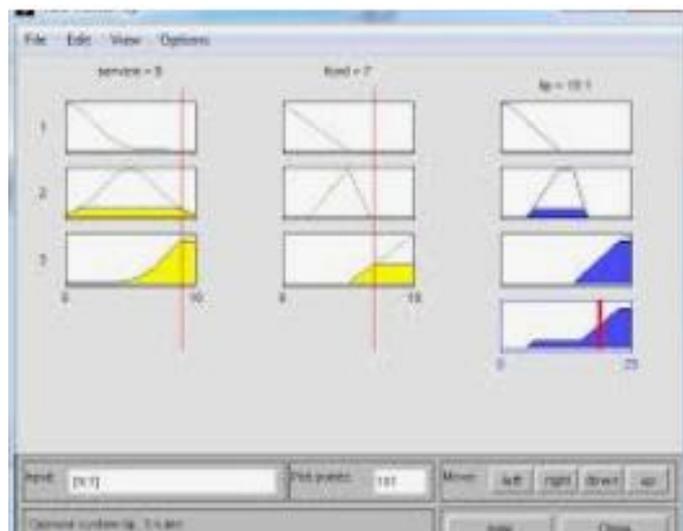


Figura 3.14 - Variação dos inputs e outputs do sistema no bloco *fuzzy* no Matlab.

As entradas do sistema possuem categorizações diferentes, níveis de avaliação qualitativa diferentes, por esse motivo é humanamente difícil determinar com exatidão um valor de saída que configure a condição operacional de um equipamento. Cada tipo de entrada contribui para o resultado final da análise de acordo com a criticidade e importância. Com base nesta hipótese, o estudo tem como base as Avaliações Qualitativas apresentadas nas Tabelas 3.3 e 3.4.

Tabela 3.3 - Tabela de avaliação final da condição de cada equipamento.

AVALIAÇÃO QUALITATIVA		
PARÂMETRO	AVALIAÇÃO	
CONFIABILIDADE	% X	NÍVEL
DISPONIBILIDADE	% X	NÍVEL
ANÁLISE DE ÓLEO	NÍVEL	
ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	NÍVEL	

A indicação em percentual é baseada em cálculos através das equações e sistemas abordados no trabalho. Os níveis qualitativos foram determinados de forma a abranger o mínimo de percepção humana sobre a condição operacional do sistema utilizando a linguagem comum não só no meio industrial, mas como na sociedade em geral quando qualifica qualquer condição de funcionamento de uma máquina. Por este motivo foram definidas palavras como: Excelente, Muito Bom, Bom, Ruim e Péssimo.

A Confiabilidade será determinada pelo software abordado no item 3.5.

A Disponibilidade será determinada pela Eq. (3.1).

Os resultados das Preditivas serão demonstrados com base na abordagem dos itens 3.3.1 e 3.3.2.

A Avaliação qualitativa das análises de óleo e vibração refletem a definição dos laudos técnicos destas manutenções: Inaceitável, quando o resultado indica uma situação que carece de uma ação corretiva imediata. Atenção, quando o sistema já apresenta variação da condição adequada e definida pelos fabricantes. Aceitável, quando os parâmetros estão dentro da faixa que garantem plenas condições de operar. Como um resultado de análise preditiva Inaceitável está relacionado a uma necessária programação de parada para revisar o sistema, esta característica dos “inputs” tiveram no bloco de Regras do Fuzzy uma relação direta com baixa avaliação do “output” Condição Operacional, ou seja, certamente o valor da saída será baixo caso seja Inaceitável o resultado de alguma preditiva.

Tabela 3.4 - Tabela de níveis possíveis de avaliação para cada parâmetro analisado.

NÍVEIS	
Possibilidades de Avaliação Análises de Vibração e Óleo	Possibilidades de Avaliação Confiabilidade e Disponibilidade
INACEITÁVEL	Péssimo 0 - 59,99%
	Ruim 40% - 79,99%
ATENÇÃO	Bom 70% - 89,99%
	Muito Bom 80% - 94,99%
ACEITÁVEL	Excelente 90% - 100%

Observa-se que há zonas confusas ou cinzentas entre os níveis de avaliação quanto a Confiabilidade e Disponibilidade, ou seja, uma avaliação de 73%, por exemplo, pode representar uma confiabilidade RUIM ou BOA, tornando a situação indeterminada do ponto de vista lógico.

Um percentual calculado e apresentado na tabela pode estar relacionado a mais de um tipo de avaliação qualitativa, dependendo do seu grau de pertinência. O exemplo pode ser visto na Figura 3.15. Esta situação ocorre porque a definição do que é RUIM ou BOM, depende do avaliador, do sistema, do contexto, indo contra a lógica convencional e convergindo com a ideia subjetiva. Um determinado nível de Disponibilidade de um equipamento pode parecer satisfatório para um gestor, mas pode parecer ruim para um outro profissional que atua na mesma empresa.

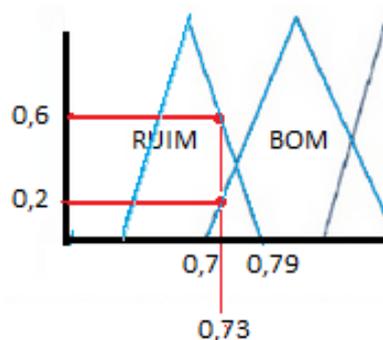


Figura 3.15 - Exemplo de resultado de aplicação da lógica difusa.

Um valor de 73% representa 20% da avaliação BOM e 60% da avaliação RUIM, não é RUIM ou BOM por inteiro, estes são os graus de pertinência para cada nível qualitativo. Quando uma organização não estabelece os limites qualitativos para estes indicadores é comum haver estas zonas confusas partindo da opinião ou avaliação de cada analista.

No software de simulação do bloco *fuzzy* os indicadores numéricos de cada input, disponibilidade, confiabilidade, análise de vibração e óleo, nesta ordem podem ser visualizados na Figura 3.16. Os valores possíveis na simulação variam de 0 (pior avaliação) a 99 (melhor avaliação). Quando o valor 100 foi aplicado o software apresentou um erro desconhecido, e como é um valor utópico, impraticável, foi desconsiderado no estudo.

Os valores de disponibilidade e confiabilidade aplicados ao simulador foram os valores calculados no estudo.

Os valores de Vibração e Óleo foram definidos da seguinte forma:

- INACEITÁVEL = 0
- ATENÇÃO = 50
- ACEITÁVEL = 99

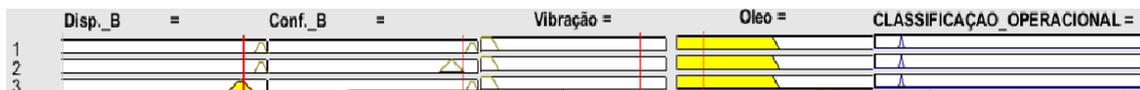


Figura 3.16 - Entradas e saídas no bloco *fuzzy* do Matlab.

A relação de Pertinência e Variáveis do presente trabalho pode ser visualizada na Figura 3.17. As Variáveis qualitativas da Confiabilidade e Disponibilidade dos sistemas possuem limites e zonas inter-relacionadas, apresentando regiões onde não é determinante ou absoluto um nível qualitativo. A predominância da avaliação qualitativa dos estudos no sistema é indicada pelo grau de pertinência de 0 a 1.

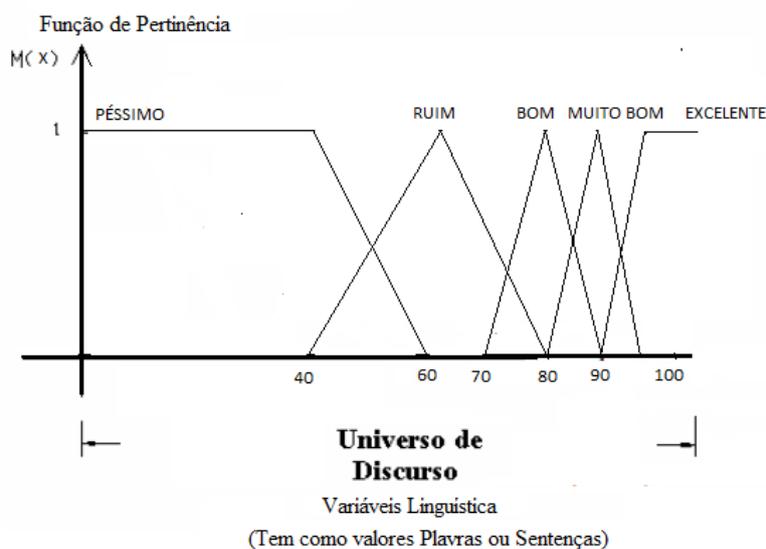


Figura 3.17 - Gráfico variáveis x pertinência.

É neste tipo de contexto que a aplicação da Lógica Fuzzy, as entradas ou *inputs* do sistema bem como sua lógica implementada a cada *dataset*, estão ligadas ao conhecimento, experiência e objetivo do Gestor do processo.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE E MANUTENÇÃO PREDITIVA

Os resultados serão apresentados com base na Eq. (3.1) no item 2.2.2, para cálculo de Disponibilidade em 10h de demanda operacional, no Software Weibull++, para Confiabilidade em 10h de demanda operacional e relatórios de Análise Preditiva, para Vibração e Óleo lubrificante dos mancais.

Finalmente, para cada equipamento haverá um resumo dos resultados na Tabela de Qualificação da Condição Operacional, que pode ser aplicada no sistema Fuzzy do Matlab e pode servir para fins comparativos diretos.

##### 4.1.1 - Bomba de petróleo A

###### 4.1.1.1 - Resultados de confiabilidade

Os dados de Falha foram dispostos em Planilha, com informações de data da ocorrência, data do início da manutenção e data do retorno operacional da máquina. Além destes dados a informação do horímetro que indica quantas horas o equipamento esteve em funcionamento até a falha está indicada e serve para entender o funcionamento do sistema.

Na apuração de Falhas da Bomba de Petróleo A, observa-se que as três primeiras falhas ocorreram sem alterar o horímetro, ou seja, o equipamento apresentou falha fora de operação. Outras ocorrências sucessivas também apresentaram mesmo cenário, sem alteração do período de funcionamento do sistema e falhas deste tipo comprometem diretamente a sua disponibilidade.

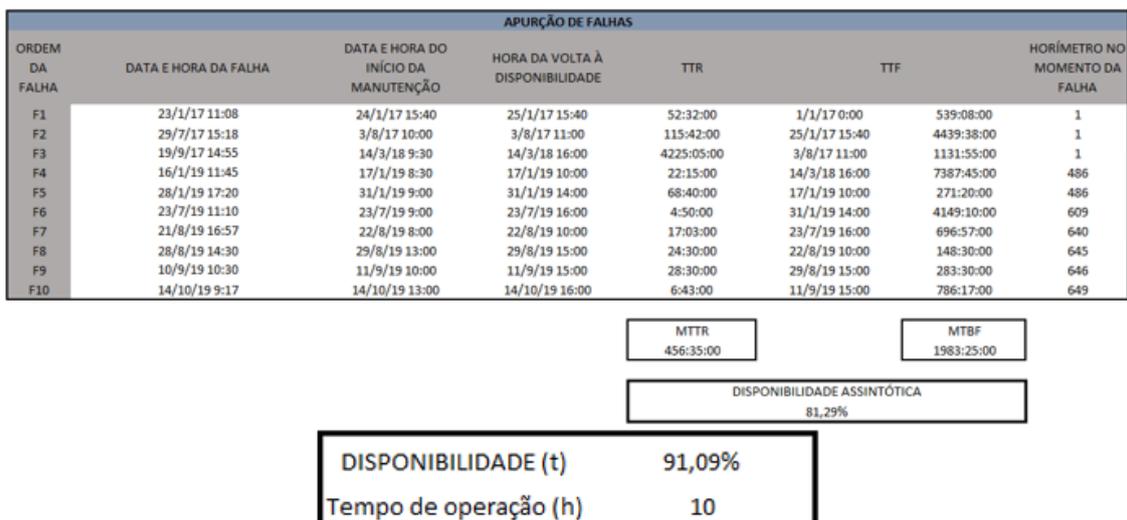


Figura 4.1 - Resultado de disponibilidade do sistema de bombeio A de petróleo.

A disponibilidade assintótica, ou seja, inerente do sistema é de 81,29%, enquanto a disponibilidade operacional, dentro da demanda utilizada de 10 horas de operação contínua, é de 91,09%. Então a chance de a máquina estar disponível a operar caso demandada é de 91,09%.

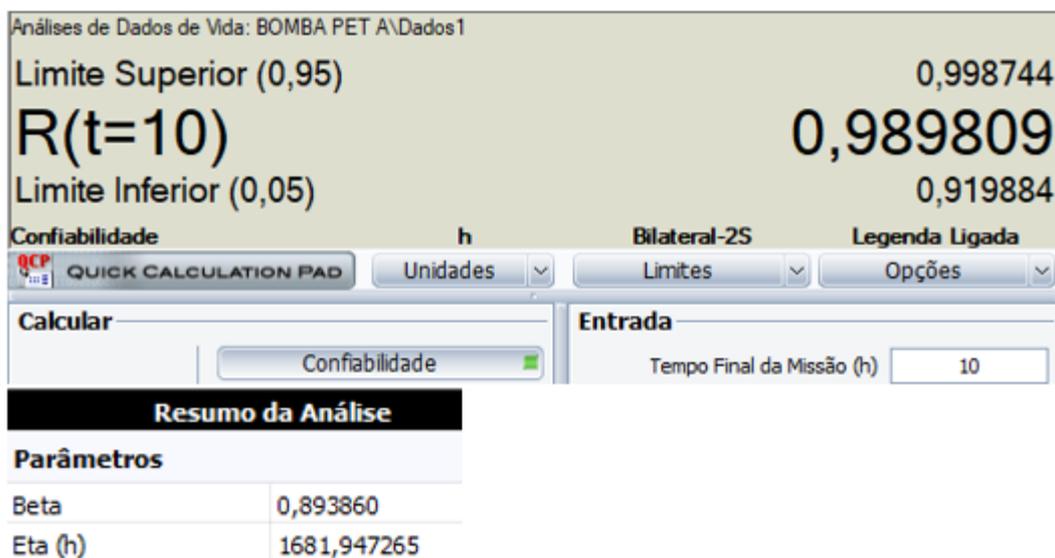


Figura 4.2 - Resultado de confiabilidade do Sistema de bombeio A, calculado pelo software.

A Confiabilidade calculada pelo sistema para 10 horas de operação é de 98,98%, ou seja, a chance de a máquina operar sem falha durante 10 horas de demanda é de 98,98%, com um nível de confiança de 0,9. O parâmetro de forma Beta, < 1, indica que o sistema tem a chama “morte prematura”

A curva de Confiabilidade do sistema indica a probabilidade de manter a operação do equipamento em função do tempo, ou seja, inversamente calcula-se a chance de perda da função com o tempo de operação contínua. Esta curva pode ser visualizada na Figura 4.3.

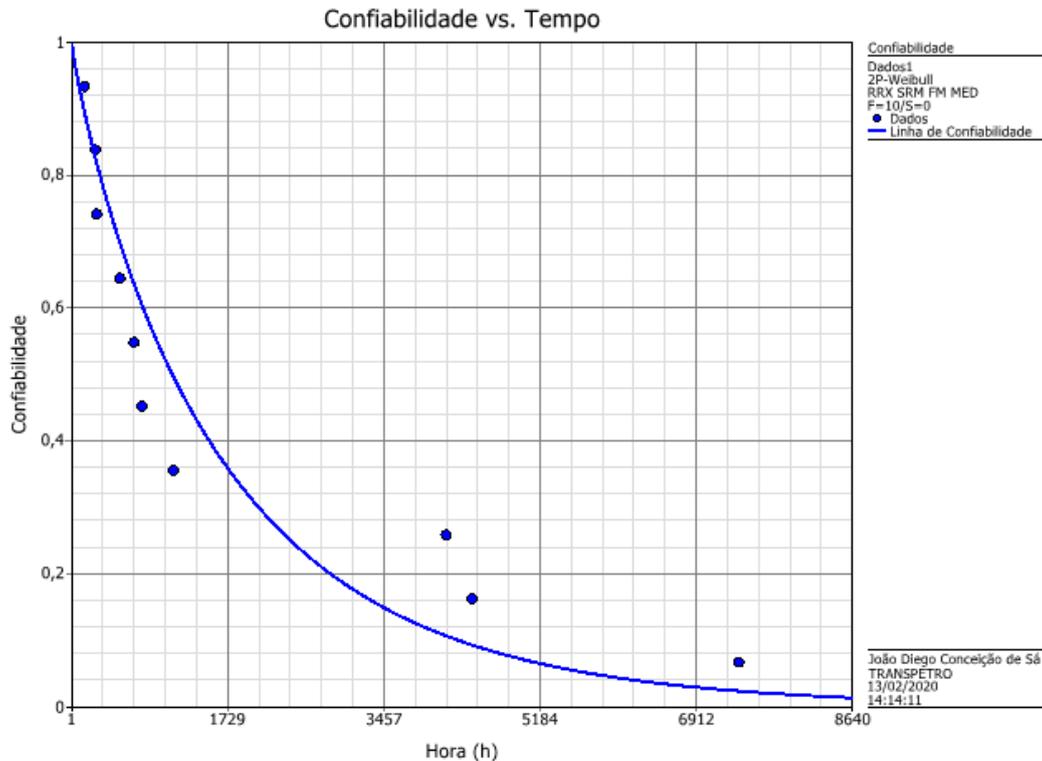


Figura 4.3 - Gráfico que demonstra a evolução da confiabilidade com o tempo da bomba petróleo A.

#### 4.1.1.2 - Resultados de manutenção preditiva

Cada ponto coletado apresenta um nível de vibração (mm/s) medido e comparado com a média histórica do equipamento. O resultado da Figura 4.4 indica um alerta nos Lados Acoplados do Motor e Bomba, caracterizando uma falha incipiente. Observa-se que a variação em um ponto no Motor ficou acima de 0,7 mm/s e a variação na Bomba acima do limite de 1,1 mm/s.

Para este local e nível de variação na vibração o diagnóstico é início de desgaste nos mancais do equipamento. Ações relacionadas a este cenário geralmente são de monitoramento constante e previsão de aquisição de material para troca futura.

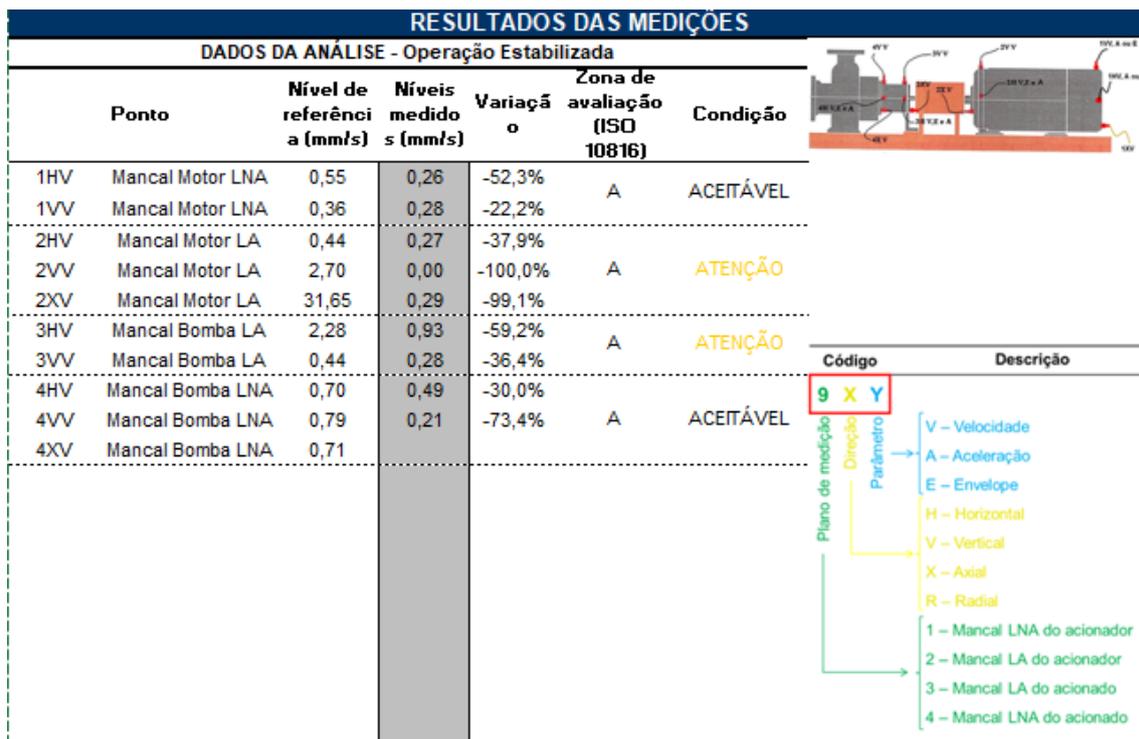


Figura 4.4 - Resultado da análise de vibração da bomba petróleo A.

O resultado demonstrado na Figura 4.5, para Análise de óleo, indica que o produto contido nos mancais do equipamento apresenta número de partículas acima do aceitável para um óleo adequado, entretanto não apresenta partículas metálicas. Este diagnóstico indica impureza ou sujeira no lubrificante e não indica desgaste dos componentes do equipamento. Cenário como este apresentado não está relacionado diretamente às partes da Motobomba e ação de filtragem do óleo é a mais recomendada.

Ensaio	Método	Unidade	Valor	Limite LL	Limite L	Limite H	Limite HH	Condição
Ponto de fulgor COC								
Viscosidade 40°C		cSt	63,97	61,2	62,55	81,6	85	ACEITÁVEL
Viscosidade 100°C								
IAT D-974		mgKOH/g	0,115				1	ACEITÁVEL
IBT D-4739								
IBT D-2896								
Insolúveis visual								
Cont. Part. ISO		-	21/19/15					
Cont. Part. NAS 1638			10				8	INACEITÁVEL
Cont. Part. ISO 4406 (> 4µm)		-	14765				2501	INACEITÁVEL
Cont. Part. ISO 4406 (> 6µm)		-	3050				641	INACEITÁVEL

Cont. Part. ISO 4406 (> 10µm)							
Cont. Part. ISO 4406 (> 14µm)		-	167			81	INACEITÁVEL
Cont. Part. ISO 4406 (> 21µm)							
Cont. Part. ISO 4406 (> 38µm)							
PQI		-	3				
Teor de cloro							
Teor de água destilado			0,0171			0,11	ACEITÁVEL
Teor de água KF		%	0				
Teor de glicol		%	1				
Diluição							
Fuligem		ABS/cm	0				
Oxidação		ABS/cm	3			5	ACEITÁVEL
Nitração		ABS/cm	3			5	ACEITÁVEL
Sulfatação		ABS/cm	14			18	ACEITÁVEL
Zinco			0,0005		0,0035	0,005	ACEITÁVEL
Boro			0		10	15	ACEITÁVEL
Ferro			0		35	50	ACEITÁVEL
Silício			0		20	25	ACEITÁVEL
Cobre			0		20	25	ACEITÁVEL
Chumbo			0		10	15	ACEITÁVEL
Cromo			0		20	25	ACEITÁVEL
Alumínio			0		20	25	ACEITÁVEL
Estanho			0		20	25	ACEITÁVEL
Níquel			0		10	15	ACEITÁVEL
Sódio			0		20	25	ACEITÁVEL
Vanádio			0		5	10	ACEITÁVEL
Titânio		ppm(m)	0		10	15	ACEITÁVEL
Manganês		ppm(m)	0		10	15	ACEITÁVEL
Potássio		ppm(m)	2		25	30	ACEITÁVEL
Bário		ppm(m)	0		25	30	ACEITÁVEL
Magnésio		ppm(m)	0		50	70	ACEITÁVEL
Fósforo		ppm(m)	5		50	70	ACEITÁVEL
Cálcio		ppm(m)	0		50	70	ACEITÁVEL
Molibdênio		ppm(m)	1		25	30	ACEITÁVEL
Prata		ppm(m)	0		25	30	ACEITÁVEL
Ferrog. Quanti L							
Ferrog. Quanti S							

Figura 4.5 - Resultado da análise de óleo da bomba petróleo A.

#### 4.1.1.3 - Tabela de qualificação da condição operacional

Tabela 4.1 - Qualificação da condição operacional bomba petróleo A.

AVALIAÇÃO QUALITATIVA	
PARÂMETRO	AVALIAÇÃO
CONFIABILIDADE	98,98% <b>EXCELENTE</b>
DISPONIBILIDADE	91,09% <b>MUITO BOM</b>
ANÁLISE DE ÓLEO	<b>INACEITÁVEL</b>
ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	<b>ATENÇÃO</b>

#### 4.1.2 - Bomba de petróleo B

##### 4.1.2.1 - Resultados de confiabilidade

APURÇÃO DE FALHAS							
ORDEM DA FALHA	DATA E HORA DA FALHA	DATA E HORA DO INÍCIO DA MANUTENÇÃO	HORA DA VOLTA À DISPONIBILIDADE	TTR	TTF	HORÍMETRO NO MOMENTO DA FALHA	
F1	24/7/17 11:39	28/7/17 9:25	28/7/17 11:00	95:21:00	1/1/17 0:00	4907:39:00	95
F2	28/7/17 15:23	3/8/17 11:00	3/8/17 12:00	140:37:00	28/7/17 11:00	4:23:00	111
F3	22/6/18 10:05	22/6/18 12:00	22/6/18 14:00	3:55:00	3/8/17 12:00	7750:05:00	414
F4	4/7/18 16:56	5/7/18 12:30	5/7/18 16:00	23:04:00	22/6/18 14:00	290:56:00	417
F5	23/11/18 12:40	26/11/18 13:00	26/11/18 15:00	74:20:00	5/7/18 16:00	3380:40:00	618
F6	17/12/18 16:00	18/12/18 9:00	18/12/18 16:30	24:30:00	26/11/18 15:00	505:00:00	629
F7	16/1/19 11:50	17/1/19 11:00	17/1/19 12:00	24:10:00	18/12/18 16:30	691:20:00	645
F8	22/1/19 18:06	15/3/19 10:30	18/3/19 17:00	1318:54:00	17/1/19 12:00	126:06:00	645
F9	23/7/19 11:07	24/7/19 9:00	24/7/19 12:00	24:53:00	18/3/19 17:00	3042:07:00	1103
F10	12/8/19 10:59	19/8/19 9:00	19/8/19 12:00	169:01:00	24/7/19 12:00	454:59:00	1155

MTTR 189:52:30	MTBF 2115:19:30
DISPONIBILIDADE Assintótica 91,76%	

Figura 4.6 - Resultado de disponibilidade do sistema de bombeio B de petróleo.

DISPONIBILIDADE (t)	93,84%
Tempo de operação (h)	10

A disponibilidade assintótica, ou seja, inerente do sistema é de 91,76%, enquanto a disponibilidade operacional, dentro da demanda utilizada de 10 horas de operação contínua, é de 93,84%. Então a chance de a máquina estar disponível a operar caso demandada é de 93,84%.



Figura 4.7 - Resultado de confiabilidade do sistema de bombeio B, calculado pelo software.

A Confiabilidade calculada pelo sistema para 10 horas de operação é de 93,22%, ou seja, a chance de a máquina operar sem falha durante 10 horas de demanda é de 93,22%, com um nível de confiança de 0,9.

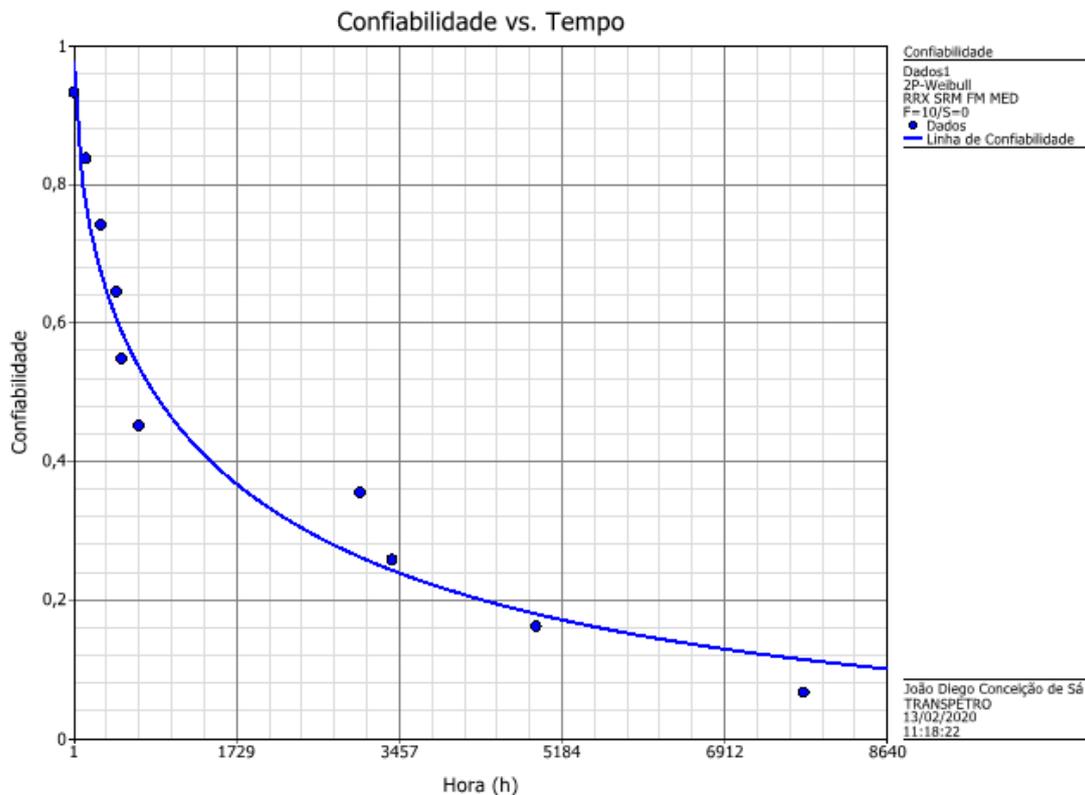


Figura 4.8 - Gráfico que demonstra a evolução da confiabilidade com o tempo da bomba petróleo B.

#### 4.1.2.2 - Resultados de manutenção preditiva

O resultado da Figura 4.9 indica que não houve variação acima das tolerâncias predeterminadas para cada ponto. As ações relacionadas a este cenário geralmente são de monitoramento normal, dentro do plano de Manutenção cadastrado.

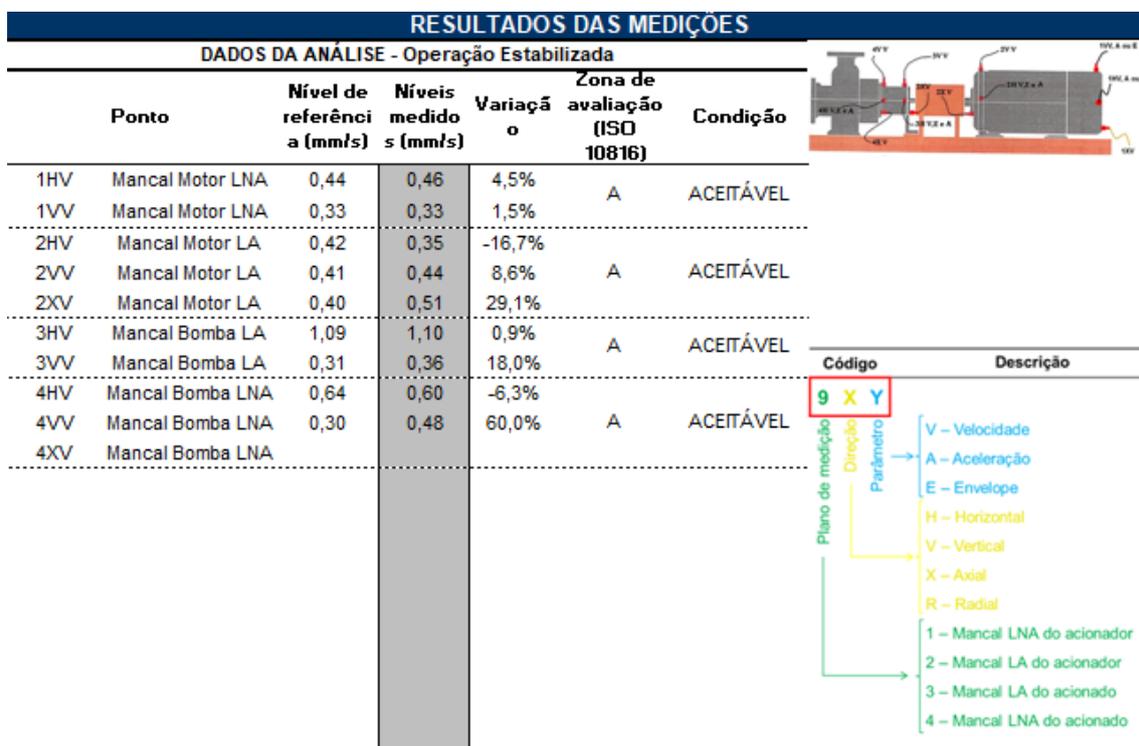


Figura 4.9 - Resultado da análise de vibração da bomba petróleo B.

O resultado demonstrado na Figura 4.10, para Análise de óleo, indica impureza ou sujeira no lubrificante e não indica desgaste dos componentes do equipamento. A filtragem do produto é a ação recomendada.

Ensaio	Método	Unidade	Valor	Limite LL	Limite L	Limite H	Limite HH	Condição
Ponto de fulgor COC								
Viscosidade 40°C		cSt	66,43	61,2	62,55	81,6	85	ACEITÁVEL
Viscosidade 100°C								
IAT D-974		mgKOH/g	0,108				1	ACEITÁVEL
IBT D-4739								
IBT D-2896								
Insolúveis visual								
Cont. Part. ISO		-	23/23/20					

Cont. Part. NAS 1638			14				8	INACEITÁVEL
Cont. Part. ISO 4406 (> 4µm)		-	72759				2501	INACEITÁVEL
Cont. Part. ISO 4406 (> 6µm)		-	44881				641	INACEITÁVEL
Cont. Part. ISO 4406 (> 10µm)								
Cont. Part. ISO 4406 (> 14µm)		-	7440				81	INACEITÁVEL
Cont. Part. ISO 4406 (> 21µm)								
Cont. Part. ISO 4406 (> 38µm)								
PQI		-	44					
Teor de cloro								
Teor de água destilado							0,11	
Teor de água KF		%	0,1804					
Teor de glicol		%	1					
Diluição								
Fuligem		ABS/cm	0					
Oxidação		ABS/cm	3				5	ACEITÁVEL
Nitração		ABS/cm	3				5	ACEITÁVEL
Sulfatação		ABS/cm	14				18	ACEITÁVEL
Zinco			0,0005			0,0035	0,005	ACEITÁVEL
Boro			0			10	15	ACEITÁVEL
Ferro			1			35	50	ACEITÁVEL
Silício			7			20	25	ACEITÁVEL
Cobre			0			20	25	ACEITÁVEL
Chumbo			0			10	15	ACEITÁVEL
Cromo			0			20	25	ACEITÁVEL
Alumínio			1			20	25	ACEITÁVEL
Estanho			2			20	25	ACEITÁVEL
Níquel			0			10	15	ACEITÁVEL
Sódio			0			20	25	ACEITÁVEL
Vanádio			0			5	10	ACEITÁVEL
Titânio		ppm(m)	0			10	15	ACEITÁVEL
Manganês		ppm(m)	0			10	15	ACEITÁVEL
Potássio		ppm(m)	0			25	30	ACEITÁVEL
Bário		ppm(m)	0			25	30	ACEITÁVEL
Magnésio		ppm(m)	0			50	70	ACEITÁVEL
Fósforo		ppm(m)	8			50	70	ACEITÁVEL
Cálcio		ppm(m)	1			50	70	ACEITÁVEL
Molibdênio		ppm(m)	0			25	30	ACEITÁVEL
Prata		ppm(m)	0			25	30	ACEITÁVEL
Ferrog. Quanti L								
Ferrog. Quanti S								

Figura 4.10 - Resultado da análise de óleo da bomba petróleo B.

#### 4.1.2.3 - Tabela de qualificação da condição operacional

Tabela 4.2 - Qualificação da condição operacional bomba petróleo B.

AVALIAÇÃO QUALITATIVA		
PARÂMETRO	AVALIAÇÃO	
CONFIABILIDADE	93,22%	MUITO BOM
DISPONIBILIDADE	93,84%	MUITO BOM
ANÁLISE DE ÓLEO	INACEITÁVEL	
ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	ACEITÁVEL	

#### 4.1.3 - Bomba de petróleo C

##### 4.1.3.1 - Resultados de confiabilidade

APURÇÃO DE FALHAS							
ORDEM DA FALHA	DATA E HORA DA FALHA	DATA E HORA DO INÍCIO DA MANUTENÇÃO	HORA DA VOLTA À DISPONIBILIDADE	TTR	TTF	HORÍMETRO NO MOMENTO DA FALHA	
F1	24/7/17 10:57	27/7/17 9:35	27/7/17 11:00	72:03:00	1/1/17 0:00	4906:57:00	127
F2	28/7/17 15:25	3/8/17 13:30	3/8/17 14:30	143:05:00	27/7/17 11:00	28:25:00	149
F3	4/7/18 17:00	5/7/18 14:00	5/7/18 17:00	24:00:00	3/8/17 14:30	8042:30:00	458
F4	20/7/18 10:05	23/7/18 8:30	23/7/18 10:30	72:25:00	5/7/18 17:00	353:05:00	458
F5	7/8/18 7:40	7/8/18 14:00	7/8/18 16:00	8:20:00	23/7/18 10:30	357:10:00	458
F6	2/10/18 16:20	25/10/18 13:00	25/10/18 17:00	552:40:00	7/8/18 16:00	1344:20:00	458
F7	16/1/19 11:54	17/1/19 13:30	17/1/19 15:00	27:06:00	25/10/18 17:00	1986:54:00	515
F8	22/1/19 18:13	27/3/19 10:00	27/3/19 17:00	1534:47:00	17/1/19 15:00	123:13:00	515
F9	9/8/19 10:32	20/8/19 10:00	20/8/19 11:00	264:28:00	27/3/19 17:00	3233:32:00	537
F10	21/8/19 16:52	22/8/19 10:00	22/8/19 12:00	19:08:00	20/8/19 11:00	29:52:00	537
F11	28/8/19 14:26	29/8/19 10:00	29/8/19 12:00	21:34:00	22/8/19 12:00	146:26:00	537
F12	29/8/19 13:00	29/8/19 13:00	30/8/19 14:00	25:00:00	29/8/19 12:00	1:00:00	537

MTTR  
230:23:00

MTTF  
1561:48:12

DISPONIBILIDADE ASSINTÓTICA  
87,15%

Figura 4.11 - Resultado de disponibilidade do sistema de bombeio C de petróleo.

DISPONIBILIDADE (t)	91,03%
Tempo de operação (h)	10

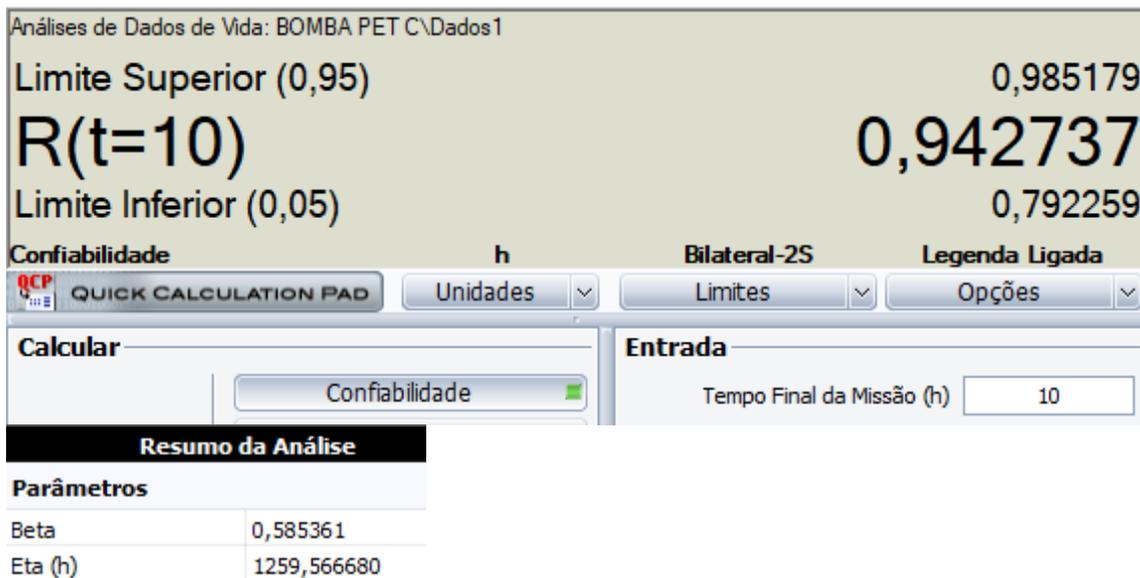


Figura 1 - Resultado de confiabilidade do sistema de bombeio C, calculado pelo software.

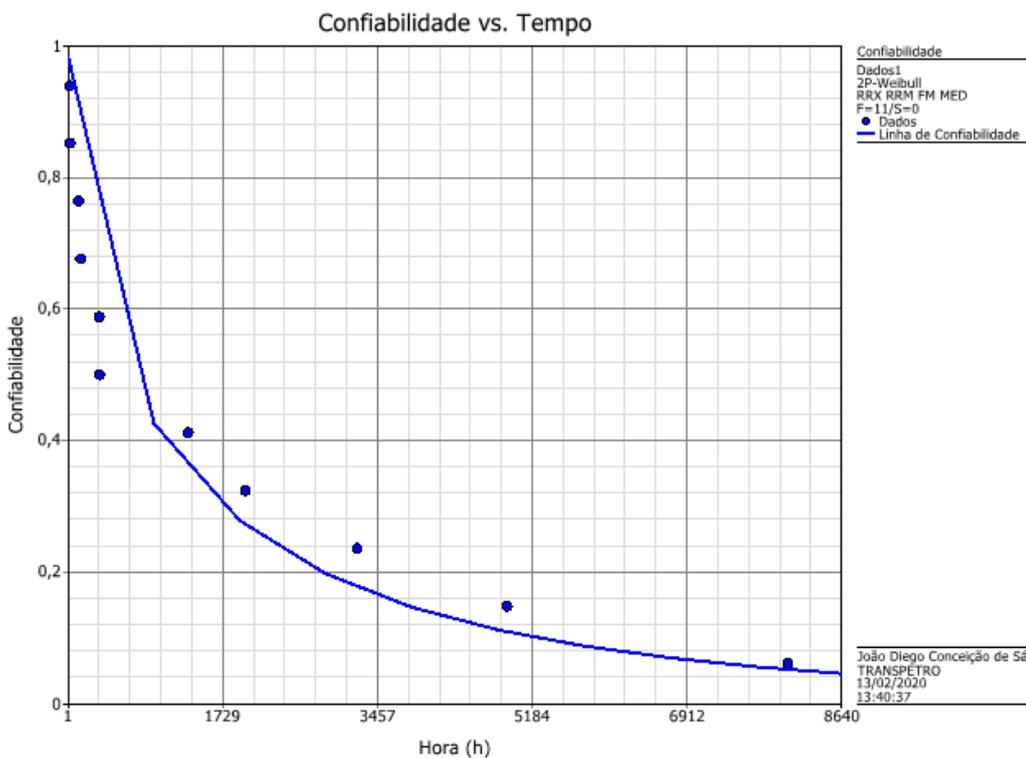


Figura 4.13 - Gráfico que demonstra a evolução da confiabilidade com o tempo da bomba petróleo C.

O resultado da Figura 4.14 indica que não houve variação acima das tolerâncias predeterminadas para cada ponto.um Ações relacionadas a este cenário geralmente são de monitoramento normal, dentro do plano de Manutenção cadastrado.

#### 4.1.3.2 - Resultados de manutenção preditiva

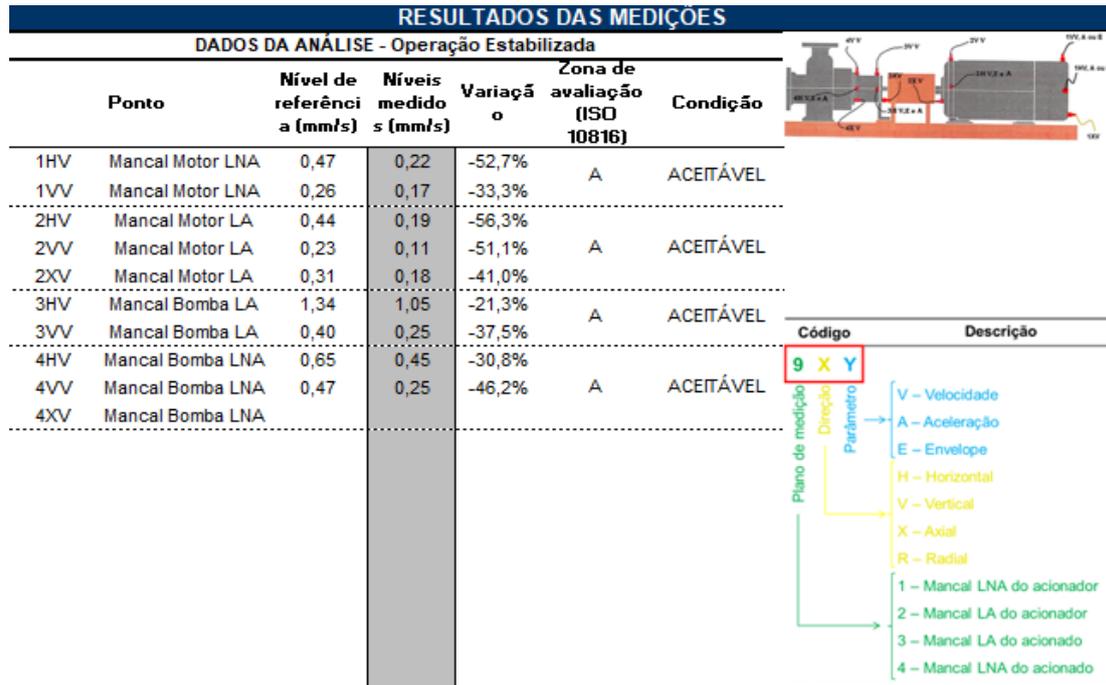


Figura 4.14 - Resultado da análise de vibração da bomba petróleo C.

O resultado demonstrado na Figura 4.15, para Análise de óleo, indica impureza ou sujeira no lubrificante e não indica desgaste dos componentes do equipamento. A filtragem do produto é a ação recomendada.

Ensaio	Método	Unidade	Valor	Limite LL	Limite L	Limite H	Limite HH	Condição
Ponto de fulgor COC								
Viscosidade 40°C		cSt	65,13	61,2	62,55	81,6	85	ACEITÁVEL
Viscosidade 100°C								
IAT D-974		mgKOH/g	0,102				1	ACEITÁVEL
IBT D-4739								
IBT D-2896								
Insolúveis visual								
Cont. Part. ISO		-	21/20/16					
Cont. Part. NAS 1638			12				8	INACEITÁVEL
Cont. Part. ISO 4406 (> 4µm)		-	19912				2501	INACEITÁVEL
Cont. Part. ISO 4406 (> 6µm)		-	6423				641	INACEITÁVEL
Cont. Part. ISO 4406 (> 10µm)								
Cont. Part. ISO 4406 (> 14µm)		-	442				81	INACEITÁVEL
Cont. Part. ISO 4406 (> 21µm)								
Cont. Part. ISO 4406 (> 38µm)								
PQI		-	6					

Teor de cloro							
Teor de água destilado						0,11	
Teor de água KF		%	0,0183				
Teor de glicol		%	1				
Diluição							
Fuligem		ABS/cm	0				
Oxidação		ABS/cm	3			5	ACEITÁVEL
Nitração		ABS/cm	3			5	ACEITÁVEL
Sulfatação		ABS/cm	14			18	ACEITÁVEL
Zinco			0,0004		0,0035	0,005	ACEITÁVEL
Boro			0		10	15	ACEITÁVEL
Ferro			0		35	50	ACEITÁVEL
Silício			5		20	25	ACEITÁVEL
Cobre			0		20	25	ACEITÁVEL
Chumbo			0		10	15	ACEITÁVEL
Cromo			0		20	25	ACEITÁVEL
Alumínio			0		20	25	ACEITÁVEL
Estanho			0		20	25	ACEITÁVEL
Níquel			0		10	15	ACEITÁVEL
Sódio			0		20	25	ACEITÁVEL
Vanádio			0		5	10	ACEITÁVEL
Titânio		ppm(m)	0		10	15	ACEITÁVEL
Manganês		ppm(m)	0		10	15	ACEITÁVEL
Potássio		ppm(m)	1		25	30	ACEITÁVEL
Bário		ppm(m)	0		25	30	ACEITÁVEL
Magnésio		ppm(m)	0		50	70	ACEITÁVEL
Fósforo		ppm(m)	5		50	70	ACEITÁVEL
Cálcio		ppm(m)	0		50	70	ACEITÁVEL
Molibdênio		ppm(m)	0		25	30	ACEITÁVEL
Prata		ppm(m)	0		25	30	ACEITÁVEL
Ferrog. Quanti L							
Ferrog. Quanti S							

Figura 4.15 - Resultado da análise de óleo da bomba petróleo C.

#### 4.1.3.3 - Tabela de qualificação da condição operacional

Tabela 4.3 - Qualificação da condição operacional bomba petróleo C.

AVALIAÇÃO QUALITATIVA	
PARÂMETRO	AVALIAÇÃO
CONFIABILIDADE	93,27% MUITO BOM
DISPONIBILIDADE	91,03% MUITO BOM
ANÁLISE DE ÓLEO	INACEITÁVEL
ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	ACEITÁVEL

#### 4.1.4 - Bomba de petróleo D

##### 4.1.4.1 - Resultados de confiabilidade

APURÇÃO DE FALHAS							
ORDEM DA FALHA	DATA E HORA DA FALHA	DATA E HORA DO INÍCIO DA MANUTENÇÃO	HORA DA VOLTA À DISPONIBILIDADE	TTR	TTF	HORÍMETRO NO MOMENTO DA FALHA	
F1	28/3/17 14:55	30/3/17 13:45	30/3/17 16:30	49:35:00	1/1/17 0:00	86,621528	14
F2	28/7/17 15:28	3/8/17 14:30	3/8/17 15:30	144:02:00	30/3/17 16:30	119,95694	198
F3	11/6/18 9:30	12/6/18 9:15	12/6/18 12:30	27:00:00	3/8/17 15:30	311,75	647
F4	27/6/18 10:08	29/6/18 8:00	29/6/18 17:00	54:52:00	12/6/18 12:30	14,901389	671
F5	2/10/18 0:00	25/10/18 8:00	25/10/18 12:00	564:00:00	29/6/18 17:00	94,291667	671
F6	16/1/19 12:00	17/1/19 15:00	17/1/19 16:30	28:30:00	25/10/18 12:00	83	714
F7	22/1/19 18:20	28/3/19 10:00	28/3/19 17:00	1558:40:00	17/1/19 16:30	5,0763889	715
F8	28/6/19 9:50	3/7/19 9:00	3/7/19 16:30	126:40:00	28/3/19 17:00	91,701389	899
F9	28/8/19 14:20	29/8/19 9:00	29/8/19 11:00	20:40:00	3/7/19 16:30	55,909722	935

MITTR	MTBF
285:59:53	2301:53:27

DISPONIBILIDADE ASSINTÓTICA
88,95%

Figura 4.16 - Resultado de disponibilidade do sistema de bombeio D de petróleo.

DISPONIBILIDADE (t)	93,25%
Tempo de operação (h)	10

Análises de Dados de Vida: BOMBA PET D\Dados1

Limite Superior (0,95) 0,999487

**R(t=10) 0,993481**

Limite Inferior (0,05) 0,920000

Confiabilidade h Bilateral-2S Legenda Ligada

QUICK CALCULATION PAD Unidades Limites Opções

Calcular Entrada

Confiabilidade

Tempo Final da Missão (h) 10

**Resumo da Análise**

Parâmetros	
Beta	0,896412
Eta (h)	2734,072802

Figura 27 - Resultado de confiabilidade do sistema de bombeio D, calculado pelo software.

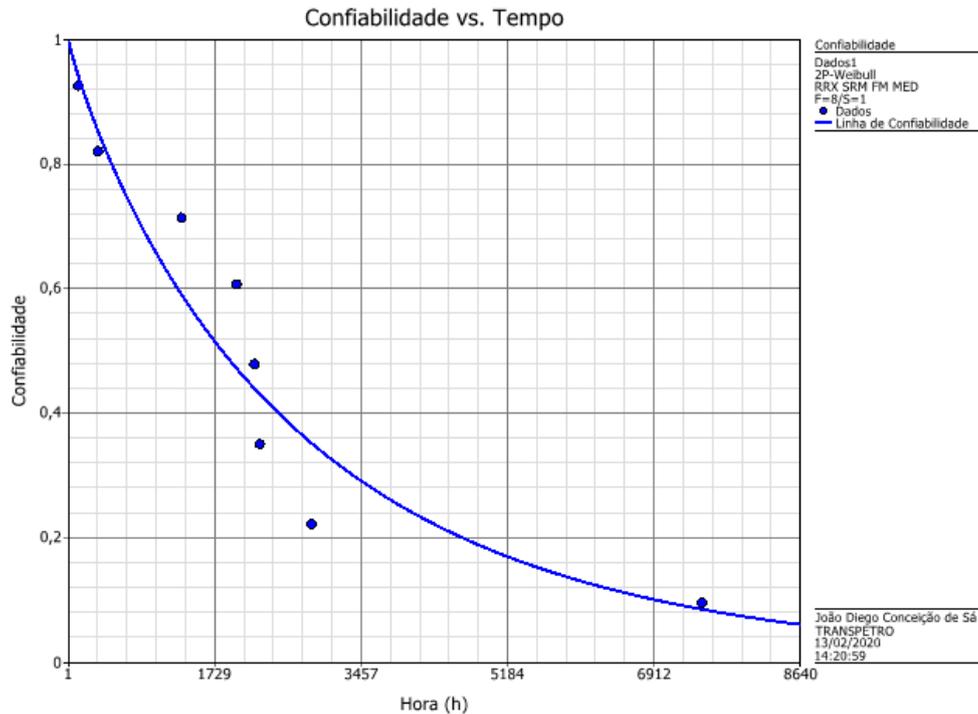


Figura 4.18 - Gráfico que demonstra a evolução da confiabilidade com o tempo da bomba petróleo D.

#### 4.1.4.2 - Resultados de manutenção preditiva

O resultado da Figura 4.19 indica que houve variação muito acima da tolerância indicada para o Lado Acoplado do Motor. Esta variação geralmente indica a iminência de quebra de um mancal, acoplamento ou desalinhamento do conjunto que pode gerar uma quebra de eixo ou de outro componente.

Observa-se que a variação em um ponto no Motor foi de 10,74 mm/s, ou seja, acima de 0,7 mm/s. O equipamento deve ser imediatamente inspecionado, seus mancais devem ser trocados e um alinhamento realizado após a remontagem do equipamento.

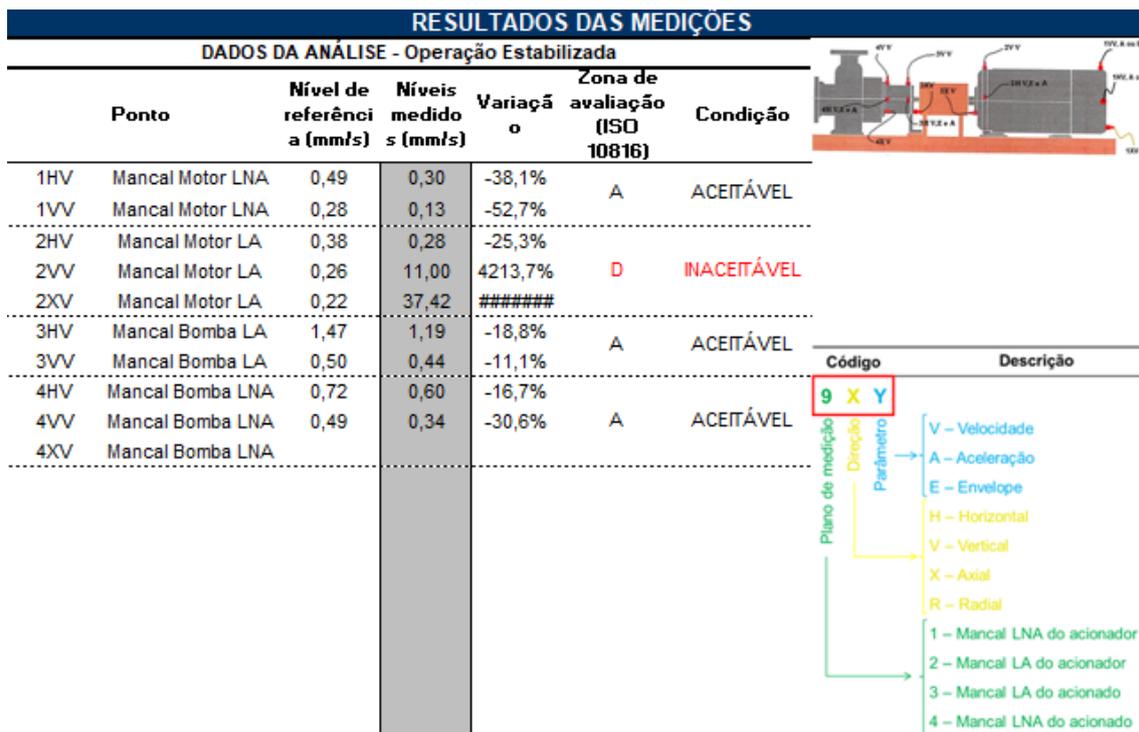


Figura 4.19 - Resultado da análise de vibração da bomba petróleo D.

O resultado demonstrado na Figura 4.20, para Análise de óleo, indica impureza ou sujeira no lubrificante e não indica desgaste dos componentes do equipamento. A filtragem do produto é a ação recomendada.

Ensaio	Método	Unidade	Valor	Limite LL	Limite L	Limite H	Limite HH	Condição
Ponto de fulgor COC								
Viscosidade 40°C		cSt	65,19	61,2	62,55	81,6	85	ACEITÁVEL
Viscosidade 100°C								
IAT D-974		mgKOH/g	0,109				1	ACEITÁVEL
IBT D-4739								
IBT D-2896								
Insolúveis visual								
Cont. Part. ISO		-	21/20/16					
Cont. Part. NAS 1638			11				8	INACEITÁVEL
Cont. Part. ISO 4406 (> 4µm)		-	14619				2501	INACEITÁVEL
Cont. Part. ISO 4406 (> 6µm)		-	5200				641	INACEITÁVEL
Cont. Part. ISO 4406 (> 10µm)								
Cont. Part. ISO 4406 (> 14µm)		-	372				81	INACEITÁVEL
Cont. Part. ISO 4406 (> 21µm)								
Cont. Part. ISO 4406 (> 38µm)								
PQI		-	5					
Teor de cloro								
Teor de água destilado		%	0,0173				0,11	ACEITÁVEL

Teor de água KF		%	0				
Teor de glicol		%	1				
Diluição							
Fuligem		ABS/cm	0				
Oxidação		ABS/cm	3			5	ACEITÁVEL
Nitração		ABS/cm	3			5	ACEITÁVEL
Sulfatação		ABS/cm	14			18	ACEITÁVEL
Zinco		%(m)	0,0002		0,0035	0,005	ACEITÁVEL
Boro		ppm(m)	0		10	15	ACEITÁVEL
Ferro		ppm(m)	0		35	50	ACEITÁVEL
Silício		ppm(m)	5		20	25	ACEITÁVEL
Cobre		ppm(m)	0		20	25	ACEITÁVEL
Chumbo		ppm(m)	0		10	15	ACEITÁVEL
Cromo		ppm(m)	0		20	25	ACEITÁVEL
Alumínio		ppm(m)	0		20	25	ACEITÁVEL
Estanho		ppm(m)	1		20	25	ACEITÁVEL
Níquel		ppm(m)	0		10	15	ACEITÁVEL
Sódio		ppm(m)	0		20	25	ACEITÁVEL
Vanádio		ppm(m)	0		5	10	ACEITÁVEL
Titânio		ppm(m)	0		10	15	ACEITÁVEL
Manganês		ppm(m)	0		10	15	ACEITÁVEL
Potássio		ppm(m)	2		25	30	ACEITÁVEL
Bário		ppm(m)	0		25	30	ACEITÁVEL
Magnésio		ppm(m)	0		50	70	ACEITÁVEL
Fósforo		ppm(m)	38		50	70	ACEITÁVEL
Cálcio		ppm(m)	1		50	70	ACEITÁVEL
Molibdênio		ppm(m)	0		25	30	ACEITÁVEL
Prata		ppm(m)	0		25	30	ACEITÁVEL
Ferrog. Quanti L							
Ferrog. Quanti S							

Figura 4.20 - Resultado da análise de óleo da bomba petróleo D.

#### 4.1.4.3 - Tabela de qualificação da condição operacional

Tabela 4.4 - Qualificação da condição operacional bomba petróleo D.

AVALIAÇÃO QUALITATIVA	
PARÂMETRO	AVALIAÇÃO
CONFIABILIDADE	99,34% EXCELENTE
DISPONIBILIDADE	93,25% MUITO BOM
ANÁLISE DE ÓLEO	INACEITÁVEL
ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	INACEITÁVEL

## 4.1.5 - Bomba de GLP A

### 4.1.5.1 - Resultados de confiabilidade

APURÇÃO DE FALHAS						
ORDEM DA FALHA	DATA E HORA DA FALHA	DATA E HORA DO INÍCIO DA MANUTENÇÃO	HORA DA VOLTA À DISPONIBILIDADE	TTR	TTF	HORÍMETRO NO MOMENTO DA FALHA
F1	28/7/17 15:00	4/8/17 10:30	4/8/17 11:30	164:30:00	1/1/17 0:00	5007:00:00
F2	29/8/17 11:20	29/8/17 14:45	29/8/17 15:00	3:40:00	4/8/17 11:30	599:50:00
F3	16/11/17 15:25	1/12/17 9:00	1/12/17 10:00	354:35:00	29/8/17 15:00	1896:25:00
F4	19/3/18 16:18	21/3/18 9:00	21/3/18 10:00	41:42:00	1/12/17 10:00	2598:18:00
F5	22/1/19 17:14	29/1/19 10:30	29/1/19 17:00	167:46:00	21/3/18 10:00	7375:14:00
F6	5/2/19 15:05	7/2/19 9:30	8/2/19 16:00	72:55:00	29/1/19 17:00	166:05:00
F7	13/2/19 7:00	13/2/19 7:15	13/2/19 11:00	4:00:00	8/2/19 16:00	111:00:00
F8	13/2/19 17:19	13/6/19 9:00	1/8/19 16:30	4055:11:00	13/2/19 11:00	6:19:00
F9	3/10/19 17:00	7/10/19 8:00	7/10/19 12:00	91:00:00	1/8/19 16:30	1512:30:00

MTRR 550:35:27	MTBF 2141:24:33
DISPONIBILIDADE ASSINTÓTICA 79,55%	

Figura 4.21 - Resultado de disponibilidade do sistema de bombeio A de GLP.

DISPONIBILIDADE (t)	91,37%
Tempo de operação (h)	10

Análises de Dados de Vida: BOMBA GLP A\Dados 1

Limite Superior (0,95) 0,982051

**R(t=10) 0,928006**

Limite Inferior (0,05) 0,734740

Confiabilidade h Bilateral-2S Legenda Ligada

QUICK CALCULATION PAD Unidades Limites Opções

Calcular Entrada

Confiabilidade  Tempo Final da Missão (h) 10

**Resumo da Análise**

Parâmetros	
Beta	0,498578
Eta (h)	1817,949155

Figura 4.22 - Resultado de confiabilidade do sistema de bombeio D, calculado pelo software.

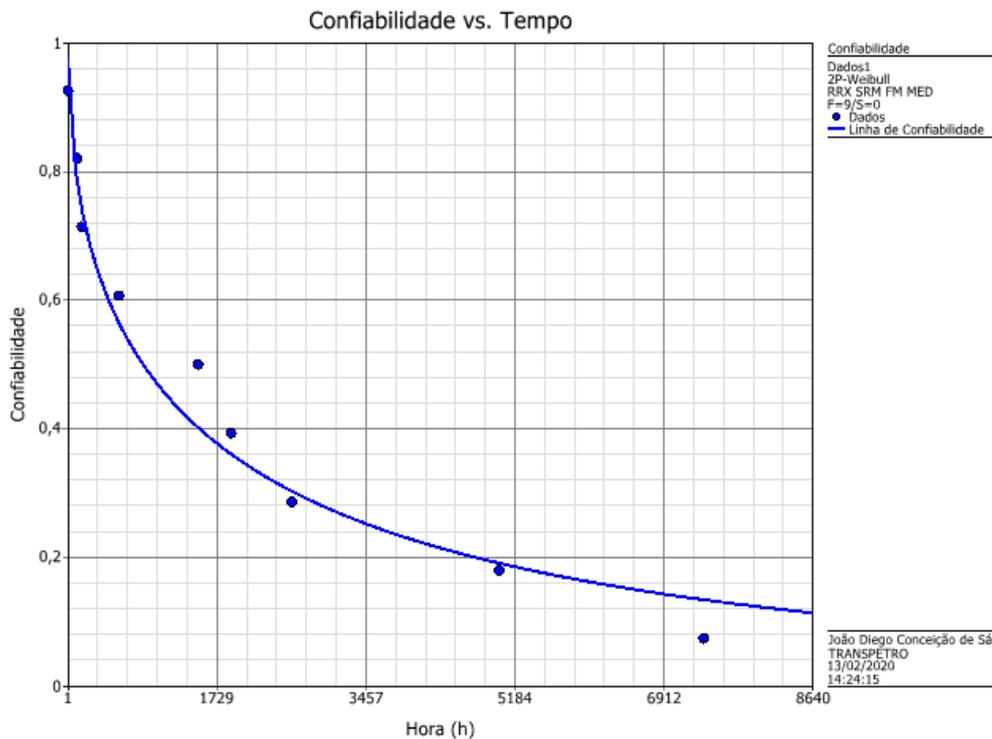


Figura 4.23 - Gráfico que demonstra a evolução da confiabilidade com o tempo da bomba GLP A.

#### 4.1.5.2 - Resultados de manutenção preditiva

O resultado da Figura 4.24 indica um alerta no Lado Acoplado da Bomba, caracterizando uma falha incipiente. Para este local e nível de variação na vibração o diagnóstico é início de desgaste nos mancais do equipamento.

Observa-se que a variação em um ponto na Bomba foi de 1,13 mm/s, ou seja, acima do limite de 1,1 mm/s. Ações relacionadas a este cenário geralmente são de monitoramento constante e previsão de aquisição de material para troca futura.

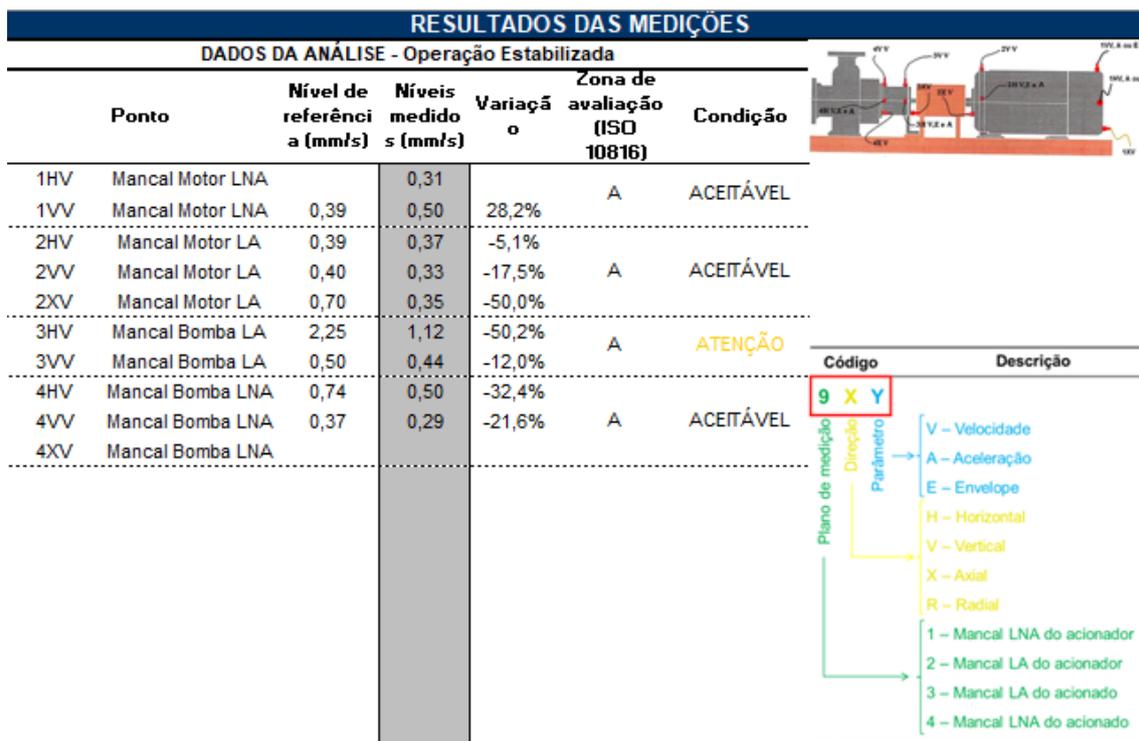


Figura 4.24 - Resultado da análise de vibração da bomba GLP A.

O resultado demonstrado na Figura 4.25, para Análise de óleo, indica impureza ou sujeira no lubrificante e não indica desgaste dos componentes do equipamento. A filtragem do produto é a ação recomendada.

Ensaio	Método	Unidade	Valor	Limite LL	Limite L	Limite H	Limite HH	Condição
Ponto de fulgor COC								
Viscosidade 40°C		cSt	63,79	61,2	62,55	81,6	85	ACEITÁVEL
Viscosidade 100°C								
IAT D-974		mgKOH/g	0,107				1	ACEITÁVEL
IBT D-4739								
IBT D-2896								
Insolúveis visual								
Cont. Part. ISO		-	22/20/15					
Cont. Part. NAS 1638			12				8	INACEITÁVEL
Cont. Part. ISO 4406 (> 4µm)		-	30015				2501	INACEITÁVEL
Cont. Part. ISO 4406 (> 6µm)		-	6600				641	INACEITÁVEL
Cont. Part. ISO 4406 (> 10µm)								
Cont. Part. ISO 4406 (> 14µm)		-	162				81	INACEITÁVEL
Cont. Part. ISO 4406 (> 21µm)								
Cont. Part. ISO 4406 (> 38µm)								
PQI		-	19					

Teor de cloro							
Teor de água destilado		%	0,0183				0,11 ACEITÁVEL
Teor de água KF		%	0				0,11 ACEITÁVEL
Teor de glicol		%	1				
Diluição							
Fuligem		ABS/cm	0				
Oxidação		ABS/cm	3			5	ACEITÁVEL
Nitração		ABS/cm	3			5	ACEITÁVEL
Sulfatação		ABS/cm	13			18	ACEITÁVEL
Zinco		%(m)	0,0015		0,0035	0,005	ACEITÁVEL
Boro		ppm(m)	0		10	15	ACEITÁVEL
Ferro		ppm(m)	2		35	50	ACEITÁVEL
Silício		ppm(m)	1		20	25	ACEITÁVEL
Cobre		ppm(m)	0		20	25	ACEITÁVEL
Chumbo		ppm(m)	0		10	15	ACEITÁVEL
Cromo		ppm(m)	0		20	25	ACEITÁVEL
Alumínio		ppm(m)	1		20	25	ACEITÁVEL
Estanho		ppm(m)	0		20	25	ACEITÁVEL
Níquel		ppm(m)	1		10	15	ACEITÁVEL
Sódio		ppm(m)	1		20	25	ACEITÁVEL
Vanádio		ppm(m)	0		5	10	ACEITÁVEL
Titânio		ppm(m)	0		10	15	ACEITÁVEL
Manganês		ppm(m)	0		10	15	ACEITÁVEL
Potássio		ppm(m)	0		25	30	ACEITÁVEL
Bário		ppm(m)	0		25	30	ACEITÁVEL
Magnésio		ppm(m)	7		50	70	ACEITÁVEL
Fósforo		ppm(m)	8		50	70	ACEITÁVEL
Cálcio		ppm(m)	0		50	70	ACEITÁVEL
Molibdênio		ppm(m)	0		25	30	ACEITÁVEL
Prata		ppm(m)	0		25	30	ACEITÁVEL
Ferrog. Quanti L							
Ferrog. Quanti S							

Figura 4.25 - Resultado da análise de óleo da bomba GLP A.

#### 4.1.5.3 - Tabela de qualificação da condição operacional

Tabela 4.5 - Qualificação da condição operacional bomba GLP A.

AVALIAÇÃO QUALITATIVA	
PARÂMETRO	AVALIAÇÃO
CONFIABILIDADE	92,80% MUITO BOM
DISPONIBILIDADE	91,37% MUITO BOM
ANÁLISE DE ÓLEO	INACEITÁVEL
ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	ATENÇÃO

## 4.1.6 - Bomba de GLP B

### 4.1.6.1 - Resultados de confiabilidade

APURÇÃO DE FALHAS							
ORDEM DA FALHA	DATA E HORA DA FALHA	DATA E HORA DO INÍCIO DA MANUTENÇÃO	HORA DA VOLTA À DISPONIBILIDADE	TTR	TTF	HORÍMETRO NO MOMENTO DA FALHA	
F1	30/1/17 15:55	31/1/17 14:00	31/1/17 15:00	23:05:00	1/1/17 0:00	711:55:00	60
F2	28/7/17 15:15	4/8/17 9:00	4/8/17 10:00	162:45:00	31/1/17 15:00	4272:15:00	215
F3	26/10/17 16:32	13/11/17 10:30	13/11/17 11:00	426:28:00	4/8/17 10:00	1998:32:00	423
F4	3/1/18 17:42	4/1/18 9:00	8/3/18 14:00	1532:18:00	13/11/17 11:00	1230:42:00	605
F5	26/3/18 10:34	26/3/18 13:30	26/3/18 14:30	3:56:00	8/3/18 14:00	428:34:00	734
F6	15/1/19 10:53	15/1/19 9:30	21/1/19 17:00	150:07:00	26/3/18 14:30	7076:23:00	1623
F7	22/1/19 17:34	25/3/19 9:00	26/3/19 17:00	1511:26:00	21/1/19 17:00	24:34:00	1624
F8	30/3/19 15:42	5/4/19 8:30	3/7/19 15:00	2279:18:00	26/3/19 17:00	94:42:00	1625
F9	24/9/19 16:49	25/9/19 8:30	25/9/19 9:30	16:41:00	3/7/19 15:00	1993:49:00	1851
F10	3/10/19 17:00	7/10/19 8:00	7/10/19 12:00	91:00:00	25/9/19 9:30	199:30:00	1876
F11	7/10/19 13:00	7/10/19 13:00	7/10/19 16:30	3:30:00	7/10/19 12:00	1:00:00	1877

MTTR	MTBF
563:41:16	1732:00:06

DISPONIBILIDADE ASSINTÓTICA
75,45%

Figura 4.26 - Resultado de disponibilidade do sistema de bombeio B de GLP.

DISPONIBILIDADE (t)	89,41%
Tempode operação (h)	10

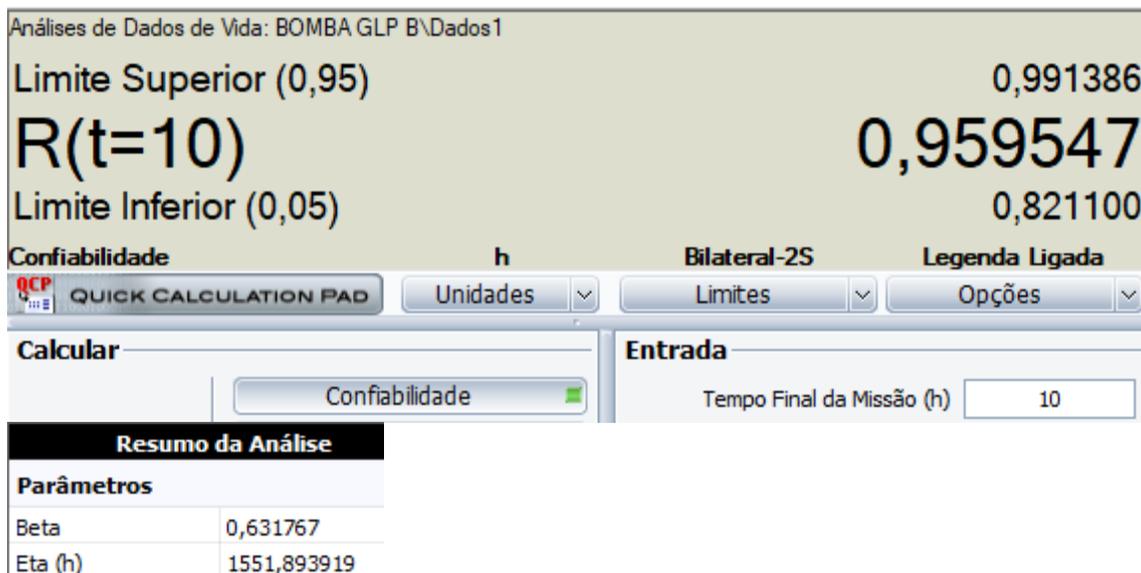


Figura 4.27 - Resultado de confiabilidade do sistema de bombeio GLP B, calculado pelo software.

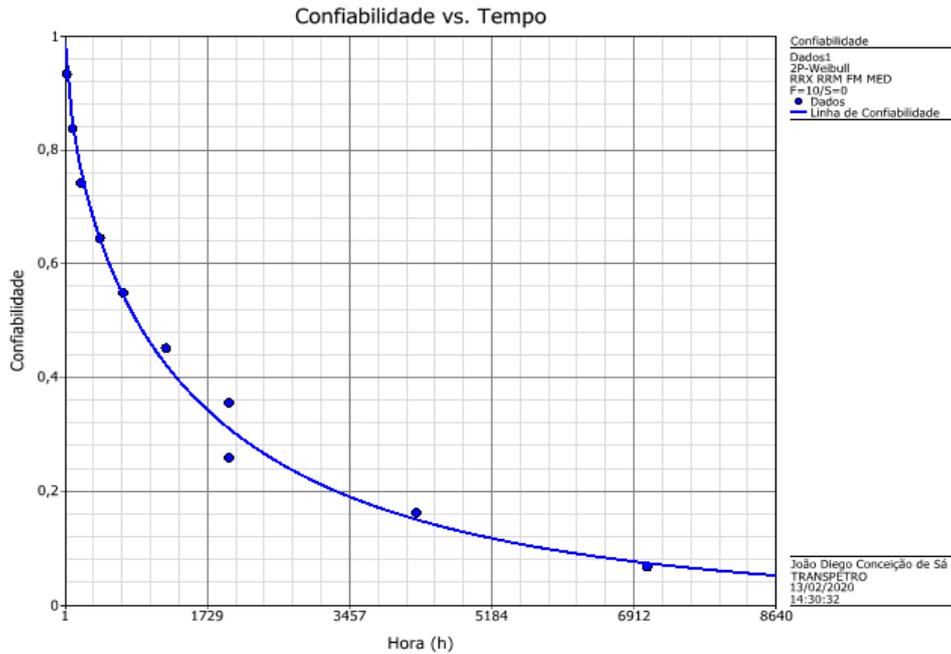


Figura 4.28 - Gráfico que demonstra a evolução da confiabilidade com o tempo da bomba GLP B.

#### 4.1.6.2 - Resultados de manutenção preditiva

O resultado da Figura 4.29 indica que não houve variação acima das tolerâncias predeterminadas para cada ponto um ações relacionadas a este cenário geralmente são de monitoramento normal, dentro do plano de manutenção cadastrado.

RESULTADOS DAS MEDIÇÕES					
DADOS DA ANÁLISE - Operação Estabilizada					
Ponto	Nível de referência (mm/s)	Níveis medidos (mm/s)	Variação	Zona de avaliação (ISO 10816)	Condição
1HV	Mancal Motor LNA	0,27		A	ACEITÁVEL
1VV	Mancal Motor LNA	0,19		A	ACEITÁVEL
2HV	Mancal Motor LA	0,23		A	ACEITÁVEL
2VV	Mancal Motor LA	0,18		A	ACEITÁVEL
2XV	Mancal Motor LA	0,22		A	ACEITÁVEL
3HV	Mancal Bomba LA	1,03		A	ACEITÁVEL
3VV	Mancal Bomba LA	0,33		A	ACEITÁVEL
4HV	Mancal Bomba LNA	0,65		A	ACEITÁVEL
4VV	Mancal Bomba LNA	0,30		A	ACEITÁVEL
4XV	Mancal Bomba LNA	0,35		A	ACEITÁVEL

Código	Descrição
9 X Y	
Plano de medição	
Direção	
Parâmetro	
	V – Velocidade
	A – Aceleração
	E – Envelope
	H – Horizontal
	V – Vertical
	X – Axial
	R – Radial
	1 – Mancal LNA do acionador
	2 – Mancal LA do acionador
	3 – Mancal LA do acionado
	4 – Mancal LNA do acionado

Figura 4.29 - Resultado da análise de vibração da bomba GLP B.

Ensaio	Método	Unidade	Valor	Limite LL	Limite L	Limite H	Limite HH	Condição
Ponto de fulgor COC								
Viscosidade 40°C		cSt	64,32	61,2	62,55	81,6	85	ACEITÁVEL
Viscosidade 100°C								
IAT D-974		mgKOH/g	0,162				1	ACEITÁVEL
IBT D-4739								
IBT D-2896								
Insolúveis visual								
Cont. Part. ISO		-	19/17/13					
Cont. Part. NAS 1638			8				8	INACEITÁVEL
Cont. Part. ISO 4406 (> 4µm)		-	3866				2501	INACEITÁVEL
Cont. Part. ISO 4406 (> 6µm)		-	781				641	INACEITÁVEL
Cont. Part. ISO 4406 (> 10µm)								
Cont. Part. ISO 4406 (> 14µm)		-	41				81	ACEITÁVEL
Cont. Part. ISO 4406 (> 21µm)								
Cont. Part. ISO 4406 (> 38µm)								
PQI		-	0					
Teor de cloro								
Teor de água destilado		%	0,0161				0,11	ACEITÁVEL
Teor de água KF		%	0				0,11	ACEITÁVEL
Teor de glicol		%	1					
Diluição								
Fuligem		ABS/cm	0					
Oxidação		ABS/cm	3				5	ACEITÁVEL
Nitração		ABS/cm	3				5	ACEITÁVEL
Sulfatação		ABS/cm	13				18	ACEITÁVEL
Zinco		%(m)	0			0,0035	0,005	ACEITÁVEL
Boro		ppm(m)	0			10	15	ACEITÁVEL
Ferro		ppm(m)	0			35	50	ACEITÁVEL
Silício		ppm(m)	0			20	25	ACEITÁVEL
Cobre		ppm(m)	0			20	25	ACEITÁVEL
Chumbo		ppm(m)	0			10	15	ACEITÁVEL
Cromo		ppm(m)	0			20	25	ACEITÁVEL
Alumínio		ppm(m)	0			20	25	ACEITÁVEL
Estanho		ppm(m)	0			20	25	ACEITÁVEL
Níquel		ppm(m)	0			10	15	ACEITÁVEL
Sódio		ppm(m)	0			20	25	ACEITÁVEL
Vanádio		ppm(m)	0			5	10	ACEITÁVEL
Titânio		ppm(m)	0			10	15	ACEITÁVEL
Manganês		ppm(m)	0			10	15	ACEITÁVEL
Potássio		ppm(m)	1			25	30	ACEITÁVEL
Bário		ppm(m)	0			25	30	ACEITÁVEL
Magnésio		ppm(m)	1			50	70	ACEITÁVEL

Fósforo		ppm(m)	1			50	70	ACEITÁVEL
Cálcio		ppm(m)	0			50	70	ACEITÁVEL
Molibdênio		ppm(m)	0			25	30	ACEITÁVEL
Prata		ppm(m)	0			25	30	ACEITÁVEL
Ferrog. Quanti L								
Ferrog. Quanti S								

Figura 4.30 - Resultado da análise de óleo da bomba GLP B.

#### 4.1.6.3 - Tabela de qualificação da condição operacional

Tabela 4.6 - Qualificação da condição operacional bomba GLP B.

AVALIAÇÃO QUALITATIVA	
PARÂMETRO	AVALIAÇÃO
CONFIABILIDADE	95,95% EXCELENTE
DISPONIBILIDADE	89,41% BOM
ANÁLISE DE ÓLEO	INACEITÁVEL
ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	ACEITÁVEL

## 4.2 - CONFIABILIDADE DO SISTEMA

### 4.2.1 - Confiabilidade do sistema de petróleo

Em termos práticos, na maioria das necessidades são utilizadas duas Bombas de Petróleo para operação simultânea e a análise da confiabilidade da operação passa a ser o produto da confiabilidade dos equipamentos isolados. Sendo assim as alternativas possíveis para a Operação da Unidade e o nível de confiabilidade com base nos dados coletados são demonstrados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Tabela de confiabilidade por sistema combinado bombas petróleo.

TABELA VERDADE					
CONFIABILIDADE BOMBAS PETRÓLEO				CONFIABILIDADE DO SISTEMA	
A	B	C	D		
F	F	93,27%	99,34%	92,65%	MUITO BOM
F	93,22%	F	99,34%	92,60%	MUITO BOM
F	93,22%	93,27%	F	86,95%	BOM
98,98%	F	F	99,34%	98,33%	EXCELENTE
98,98%	F	93,27%	F	92,32%	MUITO BOM
98,98%	93,22%	F	F	92,27%	MUITO BOM

Observa-se que a combinação que representa maior Confiabilidade para Operação com Petróleo é a atuação das Bombas A e D com uma percepção de nível EXCELENTE. Em contrapartida a operação conjunta das Bombas B e C representam menor nível de Confiabilidade, com a a percepção apenas de BOM nível.

#### 4.2.2 - Disponibilidade do sistema de petróleo

Em termos de Disponibilidade todas as combinações possíveis entre as Bombas de Petróleo indicam mesma percepção, nível BOM, apesar de numericamente a combinação B e D apresentar maior Disponibilidade.

Tabela 4.8 - Tabela de disponibilidade por sistema combinado bombas petróleo.

TABELA VERDADE					
DISPONIBILIDADE BOMBAS PETRÓLEO				DISPONIBILIDADE DO SISTEMA	
A	B	C	D		
F	F	91,03%	93,25%	84,89%	BOM
F	93,84%	F	93,25%	87,51%	BOM
F	93,84%	91,03%	F	85,42%	BOM
91,09%	F	F	93,25%	84,94%	BOM
91,09%	F	91,03%	F	82,92%	BOM
91,09%	93,84%	F	F	85,48%	BOM

#### 4.2.3 - Confiabilidade do sistema de GLP

A Confiabilidade do Sistema de GLP é a própria Confiabilidade do equipamento porque somente é utilizado um equipamento, então a tabela verdade deste sistema é simples como demonstrada na Figura 4.9.

Tabela 4.9 - Tabela de confiabilidade por sistema combinado bombas petróleo.

TABELA VERDADE			
CONFIABILIDADE BOMBAS GLP		CONFIABILIDADE DO SISTEMA	
A	B		
92,80%	F	92,80%	MUITO BOM
F	95,95%	95,95%	EXCELENTE

#### 4.2.4 - Disponibilidade do sistema de GLP

Assim como a Confiabilidade, a Disponibilidade do sistema de GLP é simplesmente a Disponibilidade do equipamento isolado.

Tabela 4.10 - Tabela de disponibilidade por sistema combinado bombas GLP.

TABELA VERDADE			
DISPONIBILIDADE BOMBAS GLP		DISPONIBILIDADE DO SISTEMA	
A	B		
91,37%	F	91,37%	MUITO BOM
F	89,41%	89,41%	BOM

#### 4.3 - RESPOSTA DA LÓGICA FUZZY

A Ferramenta *Fuzzy* no programa MatLab é configurada para trabalhar com as entradas do sistema, ou variáveis que interferem no resultado final, o bloco de regras, que é onde são inseridas as relações que devem existir entre as entradas para que seja obtido um resultado dentro da realidade do sistema, e a própria saída do sistema *Fuzzy*, que é o produto final do projeto.

No presente trabalho foram consideradas 04 (quatro) entradas, 01 (bloco de regras) e 01 (uma) saída, como pode ser visualizado na Figura 4.31.

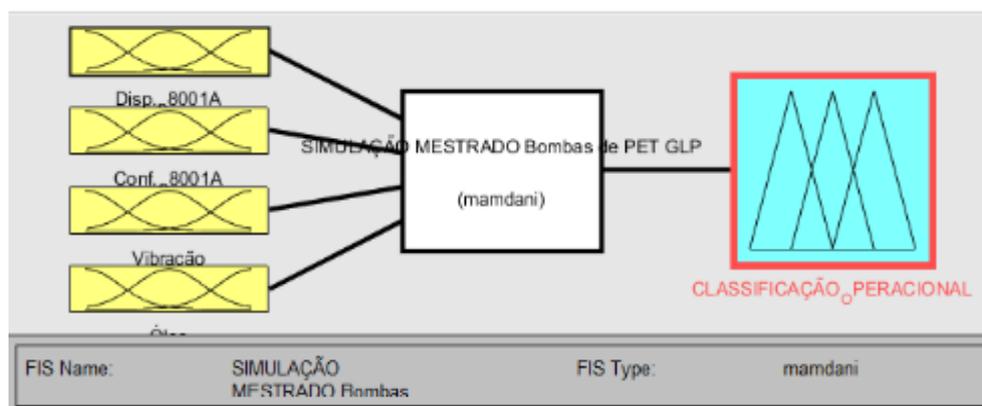


Figura 4.31 - Configuração dos blocos de entrada, lógica e saída do sistema aplicado ao *fuzzy*.

As entradas ‘Disponibilidade’ e ‘Confiabilidade’ possuem 05 (cinco) possibilidades, cada: Excelente, Muito Bom, Bom, Ruim e Péssimo e tem curvas

triangulares caracterizadas pelo intervalo e pico considerando o senso comum de profissionais da área industrial. As curvas podem ser vistas na Figura 4.32.

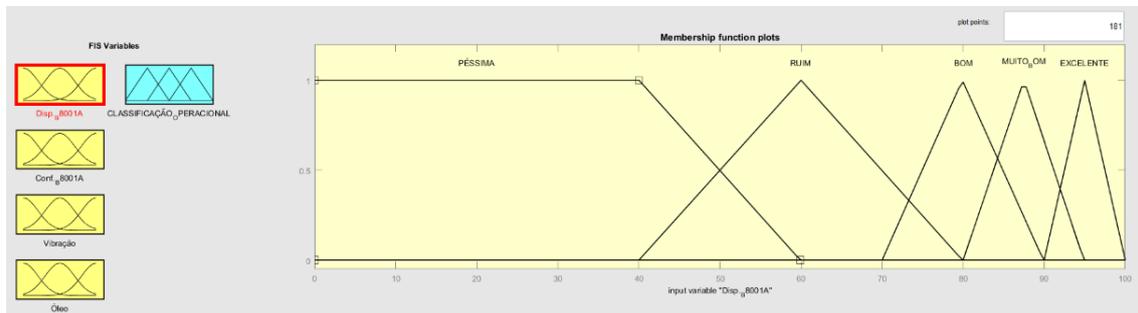


Figura 4.32 - Curvas de entrada confiabilidade e disponibilidade, com os intervalos e níveis de percepção.

As entradas relacionadas às Análises Preditivas, ‘Vibração’ e ‘Óleo’, possuem 03 (três) estados, cada: Inaceitável, Atenção e Aceitável. Ao contrário dos *inputs* Confiabilidade e Disponibilidade, as Preditivas não são opiniões embasadas em experiência e qualificação do que é adequado, mas sim determinação objetiva do resultado de uma análise científica. Por este motivo as possibilidades de entrada de óleo e vibração são constantes, mas delimitadas por intervalos, para separar os estados possíveis, conforme demonstra a Figura 4.33.

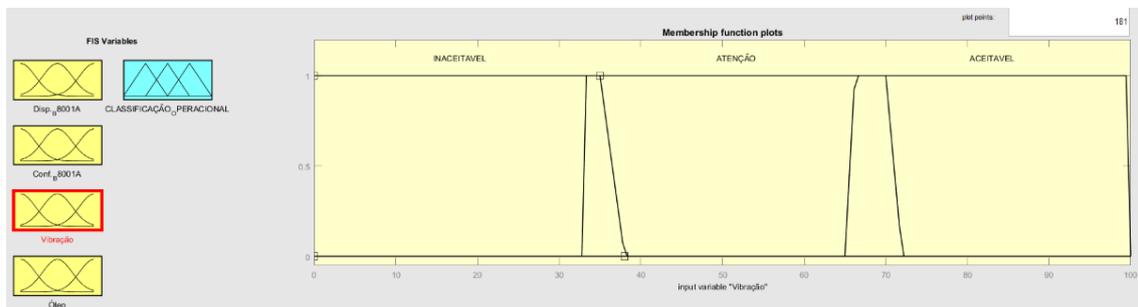


Figura 4.33 - Curvas de entrada vibração e óleo com os intervalos e níveis de resultado.

A saída ou resultado esperado pode assumir 11 (onze) estados, 01 (um) a 10 (dez), que são chamados de notas ou condição operacional do equipamento com base nas entradas já citadas. Em algumas pesquisas realizadas a função *constante* do *fuzzy* foram utilizadas para representar um número racional, que seria o resultado esperado na saída, entretanto por não estar disponível a *constante* foi utilizada a curva triangular com os três pontos exigidos (inicial, pico e final) iguais. Este recurso foi utilizado para indicar que as saídas devem assumir apenas números naturais pré-determinados, mas como pode ser visto na Figura 4.34, há distorções na base consequente do imprevisto da função.

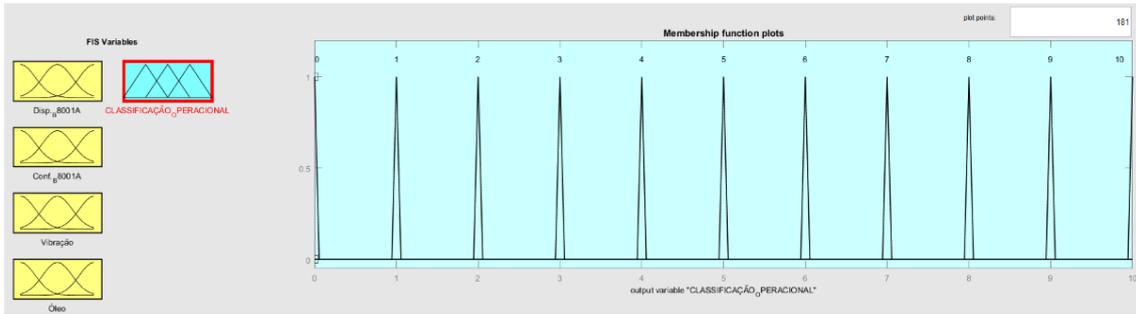


Figura 4.34 - Gráfico representando as notas das possíveis saídas do sistema.

O bloco de Regras é onde todo o processo de interação das entradas e determinação da saída ocorre. É o processador ou cérebro do projeto, responsável por substituir o que a mente humana seria incapaz de realizar em tempo hábil.

Todas as relações entre as entradas devem ser consideradas neste bloco que sempre será regido pelo *if* ou *'se'*, ou seja, qual deve ser a saída se as entradas assumirem tal condição.

Para as considerações já feitas, com os cinco estados de Confiabilidade e Disponibilidade, e mais três estados de vibração e óleo, totalizam-se 225 (duzentas e vinte e cinco) saídas possíveis, muitas delas com mesmo resultado numérico, consideração esta, feita pelo projetista do sistema. A Figura 4.35 mostra algumas das possíveis saídas do sistema, considerando algumas possíveis entradas sendo “amarradas” pela lógica *and* ou *'e'*.

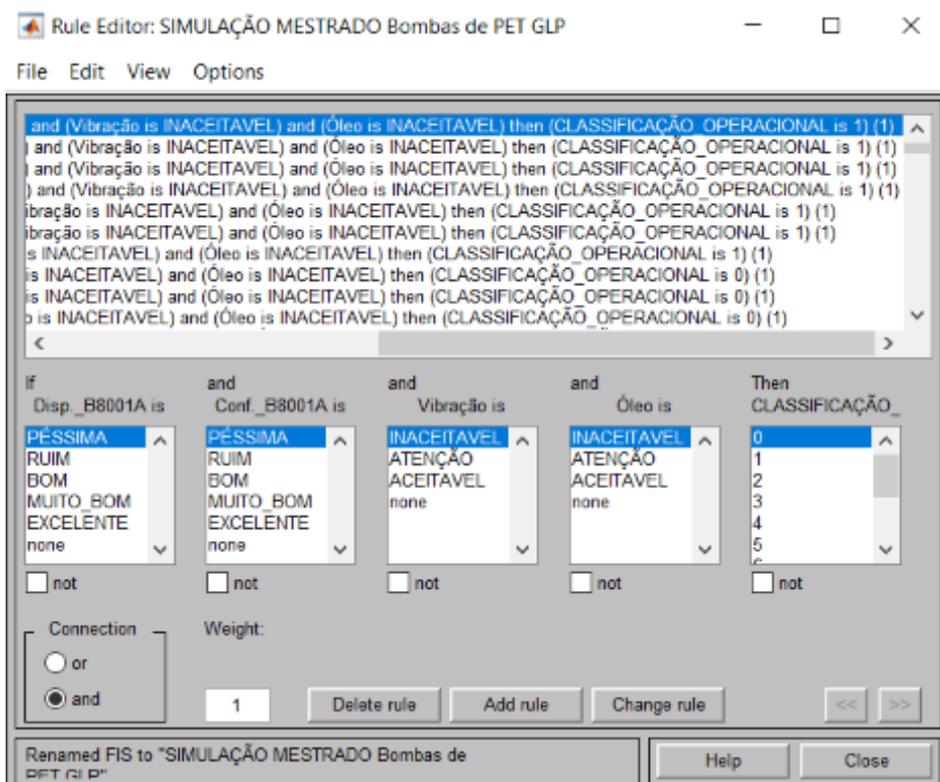


Figura 4.35 - Demonstração do bloco lógico do sistema, relacionando as entradas e a saída.

Após a configuração dos *inputs*, *rules* e *outputs*, o sistema foi testado em seu pior caso e melhor caso, e as saídas foram devidamente correspondidas com notas mínima e máxima para a condição operacional do equipamento, conforme Figuras 4.36 e 4.37.



Figura 4.36 - Simulação com níveis mais baixos das entradas e sua saída correspondente.



Figura 4.37 - Simulação com níveis mais altos das entradas e sua saída correspondente.

O perfil tridimensional da saída do sistema relacionados às entradas Confiabilidade e Disponibilidade, pode ser observado na Figura 4.38.

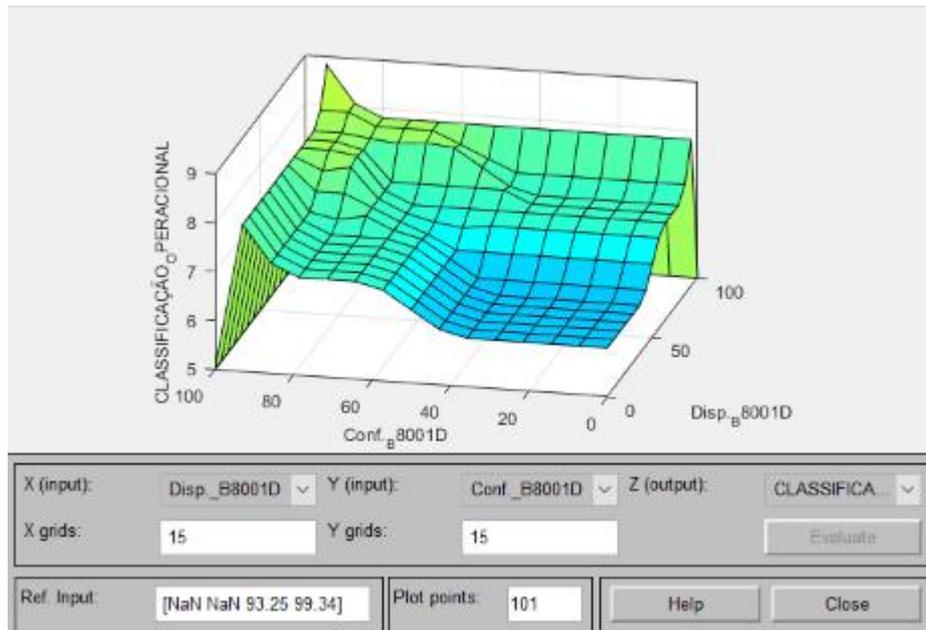


Figura 4.38 - Perfil tridimensional da saída do sistema considerando as entradas confiabilidade e disponibilidade.

As entradas baixas de Confiabilidade e Disponibilidade, ainda permite que seja obtido uma saída com uma nota intermediária. Esta característica do sistema mostra que o efeito histórico dos equipamentos tem uma influência, mas pode não ser determinante ou ter um peso grande na real condição operacional atual da máquina.

O perfil tridimensional da saída do sistema relacionados às entradas Análises de Vibração e Óleo, pode ser observado na Figura 4.39.

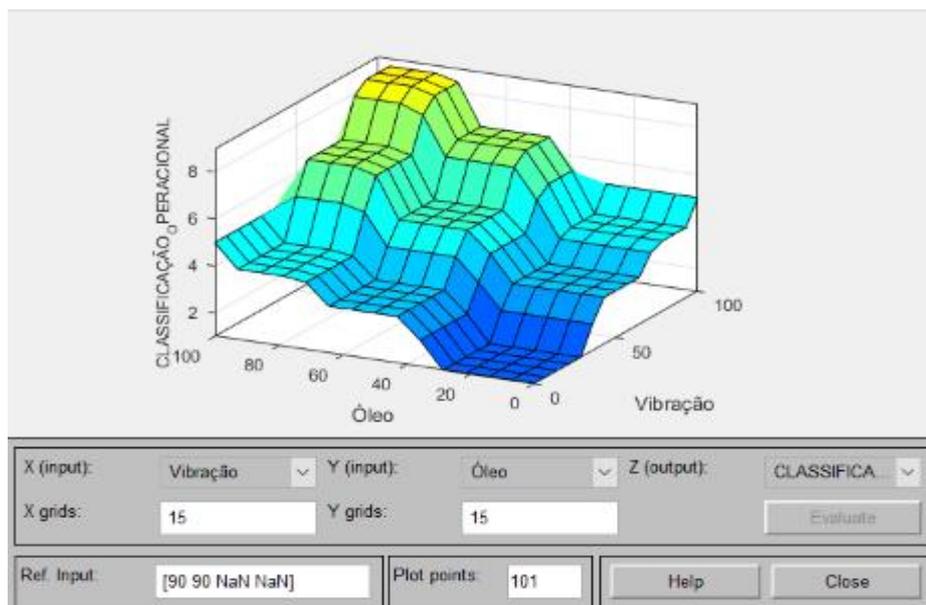


Figura 4.39 - Perfil tridimensional da saída do sistema considerando as entradas vibração e óleo.

Ao contrário do que se observou na relação entre os *inputs* que se baseiam em dados históricos de manutenção, a relação entre os resultados preditivos e condição operacional é mais direta o que indica uma influência maior destas entradas. Observa-se que com resultados baixos para ambas as entradas a saída é certamente baixa, quanto mais varia positivamente a classificação de uma entrada isto se traduz na variação do resultado final.

As Figuras de 4.40 a 4.51, correspondem aos resultados da condição operacional dos equipamentos B8001 A, B, C, D e B8002 A e B. Todas as simulações do sistema foram realizadas com base nos resultados de análise preditiva e dados de confiabilidade das máquinas. São duas formas de representar os resultados obtidos, pelo simulador Matlab e por diagrama de blocos, no qual fica clara, inclusive, os processos de fuzzificação. No resultado em blocos, há a identificação de onde ocorre a tradução da linguagem numérica em linguagem nebulosa, para as entradas de Confiabilidade e Disponibilidade. As entradas de dados Preditivos já participam do processo com o grau de pertinência. A defuzzificação transforma a linguagem subjetiva, nebulosa, em número exato, uma quantidade nítida e objetiva.

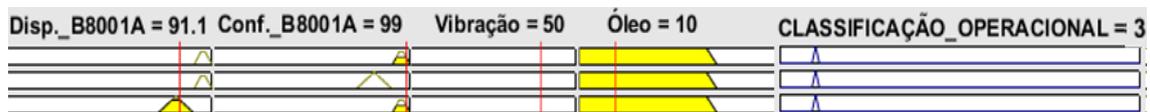


Figura 4.40 - Simulação das entradas e saídas da bomba petróleo A.

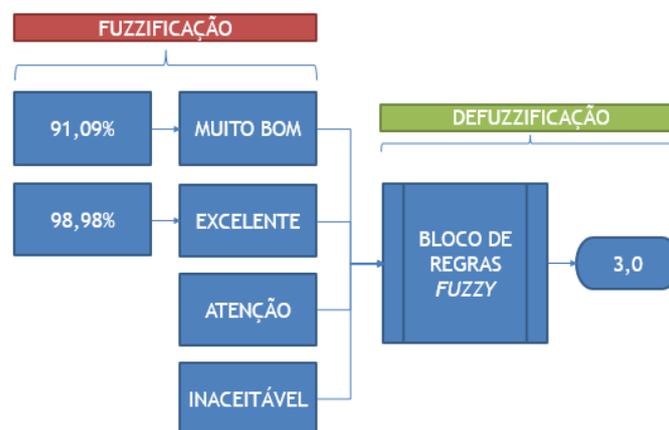


Figura 4.41 - Processos de fuzzificação e defuzzificação para bomba petróleo A.

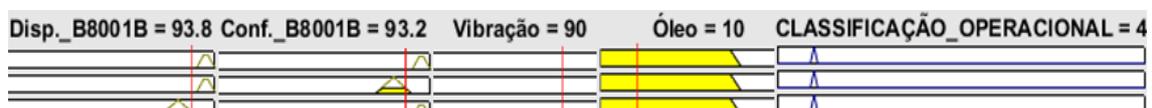


Figura 4.42 - Simulação das entradas e saídas da bomba petróleo B.

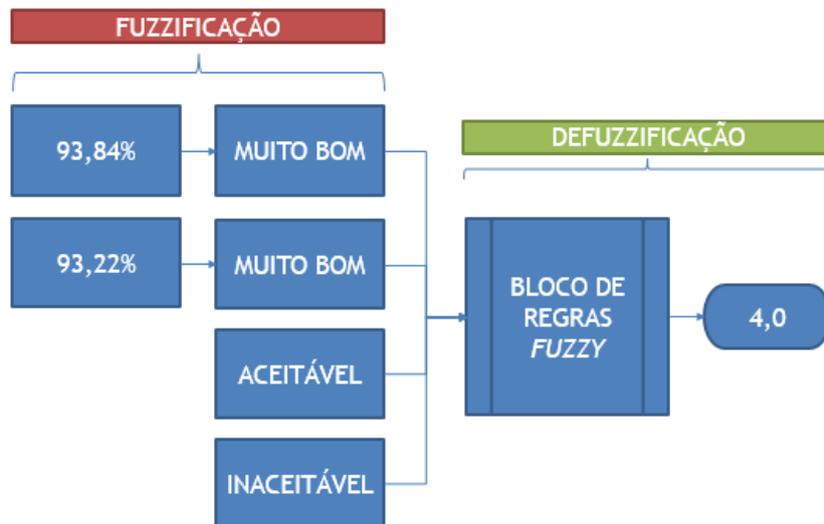


Figura 4.43 - Processos de fuzzificação e defuzzificação para bomba petróleo B.

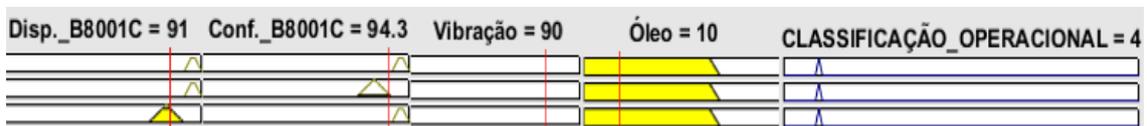


Figura 4.44 - Simulação das entradas e saídas da bomba petróleo C.

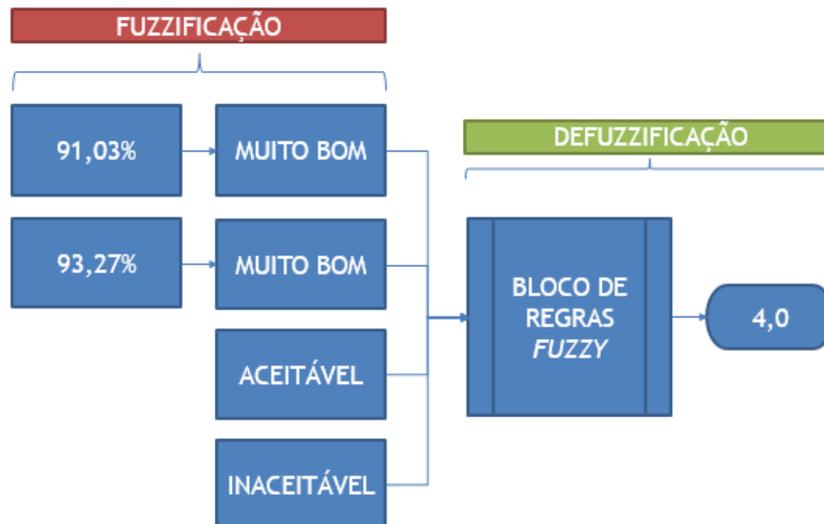


Figura 4.45 - Processos de fuzzificação e defuzzificação para bomba petróleo C.

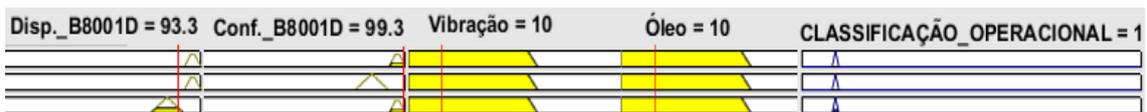


Figura 4.46 - Simulação das entradas e saídas da bomba petróleo D.

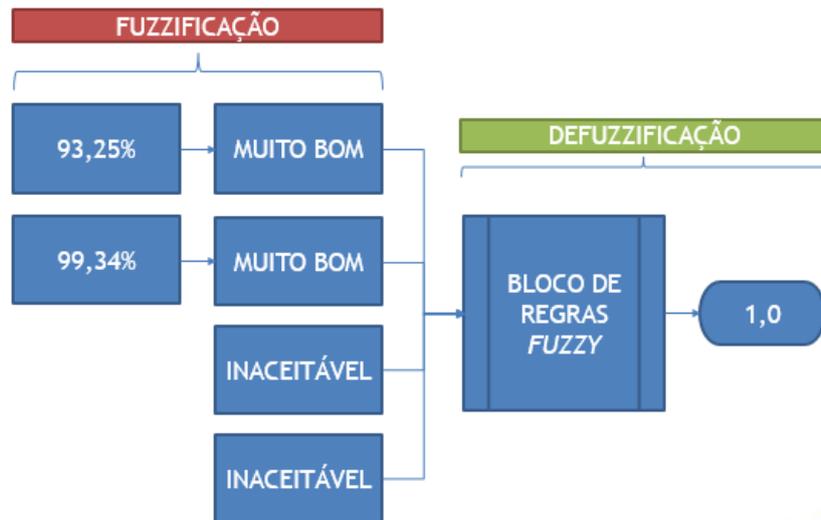


Figura 4.47 - Processos de fuzzificação e defuzzificação para bomba petróleo D.

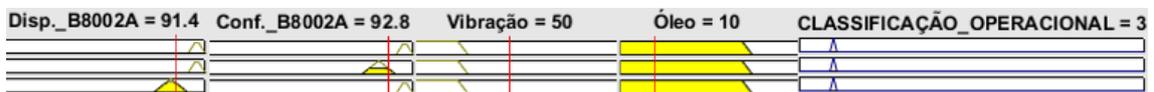


Figura 4.48 - Simulação das entradas e saídas da bomba GLP A.

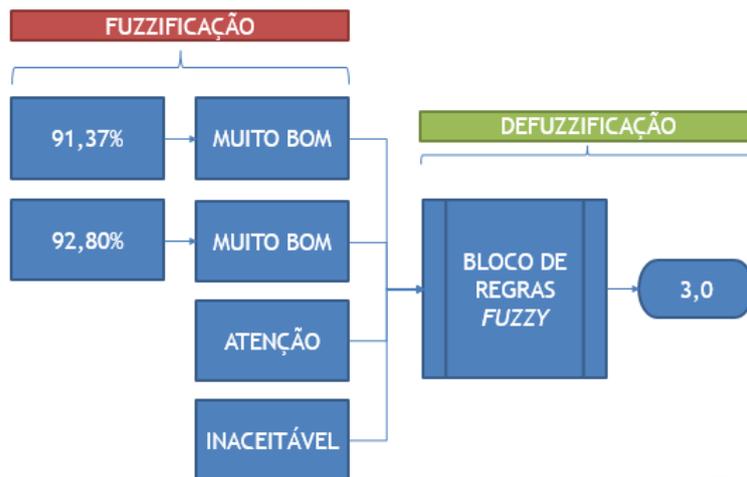


Figura 4.49 - Processos de fuzzificação e defuzzificação para bomba GLP A.



Figura 4.50 - Simulação das entradas e saídas da bomba GLP B.

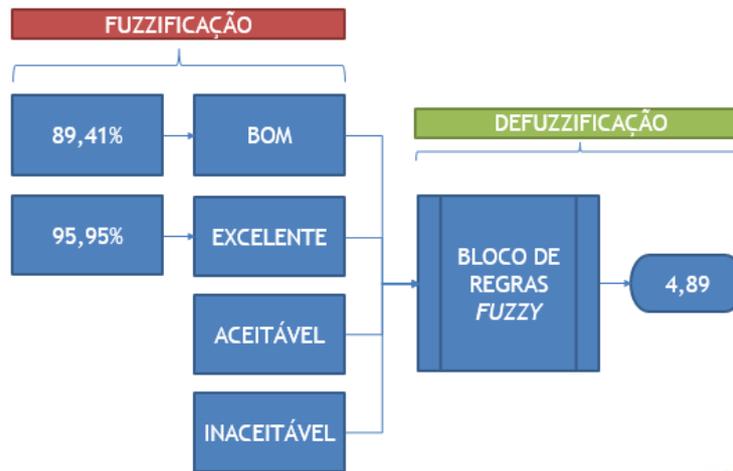


Figura 4.51 - Processos de fuzzificação e defuzzificação para bomba GLP B.

Para cada simulação foram inseridos os valores calculados de Confiabil

Em uma escala de 0 a 10, após as simulações foi possível determinar um ranking de condição operacional dos equipamentos, como demonstrado na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Tabela de ranking confiança operacional das bombas.

RANKING DE CONDIÇÃO OPERACIONAL		
CLASSIFICAÇÃO	BOMBA	NOTA
1º	8002 B	4,89
2º	8001 B	4,00
3º	8001 C	4,00
4º	8001 A	3,00
5º	8002 A	3,00
6º	8001 D	1,00

Todas as bombas tiveram resultado para análise de óleo Inaceitável o que fez com que todos já tivessem sua nota de saída comprometida, pois uma condição precária do óleo de um equipamento rotativo pode indicar desgastes de material interno crucial para seu pleno funcionamento, por exemplo. Este cenário geralmente já indica uma para programada para revitalização da situação encontrada de modo a não correr o risco de perder componentes e até todo equipamento em uma falha operacional.

A Bomba 8001 D, apresentou a pior condição operacional por ter seus dois resultados preditivos reprovados, apresentando apenas um excelente histórico de confiabilidade e uma muito boa disponibilidade, que fizeram com que o equipamento não obtivesse nota mínima no projeto.

O estado Inaceitável para análise de óleo geralmente é revertido por uma troca do mesmo ou uma “filtragem”, técnica de limpeza bastante utilizada na indústria que oferece bons resultados e um custo menor quando comparada à troca de todo o óleo.

Uma Análise de vibração Inaceitável geralmente é tratada com troca de mancais de sustentação da máquina e seu correto alinhamento. Diversas outras ações podem ser tomadas de acordo com a identificação do problema.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

#### 5.1 - CONCLUSÕES

A partir do conhecimento da Lista dos equipamentos ou sistemas prioritários ou que apresentam menor confiabilidade, o Gestor do negócio terá a previsibilidade de falha dos ativos de modo ordenado, podendo assim atuar no problema mais grave presente na sua Unidade responsável. Espera-se que o tempo destinado a elaboração de um processo de contratação, compra de material aplicado ou do serviço propriamente dito, seja o mais eficiente possível, pois todo este recurso estará sendo aplicado no equipamento que comprometeria a operação da Planta industrial primeiro. O resultado do projeto ainda poderá determinar com maior eficiência a alteração no plano de Manutenção preventiva e preditiva de um equipamento, indicando que o número de intervenções e ordens de manutenção aplicadas podem ser reduzidas, gerando economia com hora de serviço e possível redução de pessoal.

O resultado indesejado nas análises preditivas já indica uma parada programada do equipamento para que seja permitida a recuperação da condição adequada seja do óleo, vibração, no caso deste trabalho, ou quaisquer outros parâmetros observados.

Fica evidente que a contribuição para o output é menor para as análises de histórico de falha do equipamento se comparadas às análises de Manutenção Preditiva, e esta correlação faz sentido pois o objetivo é se aproximar numericamente de uma situação atual, presente, apresentada pelo equipamento. O histórico e estudo de confiabilidade vai levar à um ajuste fino da tradução numérica de uma saída efetivamente conotativa ou subjetiva do ponto de vista do profissional que trabalha diretamente com o sistema industrial.

O produto final do sistema Fuzzy é o ranking de condição operacional, no qual permite os funcionários conhecerem o estado atual de operação do equipamento e planejar uma programação de prioridade operacional com base em apenas um parâmetro, que é a saída deste sistema.

Além do resultado concreto, com números apresentados, há o ganho na cultura implantada na equipe que atua no Terminal Aquaviário. Este projeto traz consigo uma visão integrada da Unidade, relacionando a Manutenção de campo com as áreas de apoio

logístico, financeiro e a própria Operação. Torna-se mais fácil enxergar a contribuição de cada setor da empresa em um resultado final e contínuo, valorizando cada ação e cada contribuição prestada. Os resultados apresentados podem ser utilizados em estudos e aplicações de TPM (Total Productive Maintenance) ou Manutenção Produtiva Total, que tem como princípios relacionar melhorias das pessoas, dos equipamentos e da qualidade total. O trabalho ainda evidencia que a Inteligência Artificial pode proporcionar resultados práticos relacionando a objetividade dos números, em suas análises quantificadas, à linguística intrinsecamente ligada aos seres humanos dentro de uma planta industrial.

O sistema elaborado com base nos estudos de histórico de falha e manutenção preditiva contemplam apenas alguns parâmetros de um complexo sistema industrial. A tentativa de aproximação da situação operacional traduzida em um só número se mostra interessante, mas ainda incompleta por apresentar apenas algumas variáveis de tantas possíveis. Outros tipos de Análise Preditiva como, Análise de Assinatura Elétrica, Termografia, e diversas outras considerações pertinentes podem ser incorporadas a esta proposta seja como inputs ou componentes do bloco de regras.

Traduzir um sentimento ou opinião humana em um número não é tarefa das mais simples e exige muita discussão e dedicação em adotar um modelo que mais possa indicar a realidade do campo operacional e industrial.

Pode-se resumir em tópicos trabalhados:

- Níveis de Confiabilidade e Disponibilidade foram identificados para todos os equipamentos do estudo;
- As percepções qualitativas de Confiabilidade foram definidas em limites percentuais com base em opiniões de profissionais experientes e tecnicamente capacitados;
- Foram realizadas coleta de dados e Análise de óleo e Vibração de todas as máquinas durante o período de estudo;
- Com os resultados das Análises Preditivas e de Confiabilidade as Fichas de Avaliação dos Equipamentos foram devidamente preenchidas;
- A lógica *Fuzzy* foi utilizada para quantificar a correlação entre as percepções de confiabilidade e resultados preditivos para as máquinas.
- Através da quantificação obtida da ferramenta de Inteligência Artificial, foi obtido um ranking dos equipamentos para condição operacional e necessidade de

realização de intervenção ou maior preocupação da Manutenção. Este “ranqueamento” pode ser utilizado como Guia de decisões da Supervisão ou Gerência da Unidade Operacional.

## 5.2 - SUGESTÕES

Este trabalho engloba assuntos bastante debatidos na comunidade científica e industrial atualmente, além de ter uma vasta área para crescimento e desenvolvimento. Para continuação e desenvolvimento deste trabalho ficam as seguintes sugestões:

- Incluir outras análises de manutenção preditiva e preventiva para melhorar a precisão do diagnóstico da condição geral de um equipamento;
- Ampliar o nível de percepção dos profissionais que trabalham com os ativos da unidade industrial para que os níveis qualitativos das análises estejam mais aderentes à realidade;
- Utilizar outra ferramenta de Inteligência Artificial que possa demonstrar resultados mais amplos, precisos e rápidos;
- Realizar Análise de Risco dos Ativos que farão parte do estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAH, L. **Fuzzy multi criteria decision making and its applications: A brief review of category.** Procedia - Social and Behavioral Sciences 97, pág. 131 – 136, (2013).

ABNT NBR 10082:2011: **Ensaio Não Destrutivo – Análise de Vibrações – Avaliação da vibração mecânica de máquinas com velocidade de operação de 600 rpm a 15.000 rpm.** Rio de Janeiro, 2011. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

ALBERNETHY, R. A **Weibull New Handbook.** 5ª Edição. Editora Chapman and Hall/CRC, 2008.

AZEVEDO, C. **Se as Máquinas Falassem.** s.l.: Saraiva, 2007.

CORRÊA, M. V.; BAÉSSA, J. P. D. **Identificação de sistemas dinâmicos não-lineares utilizando Lógica Fuzzy.** Disponível em: <[http://www.unilestemg.br/principiumonline/publicacoes/03/downloads/68\\_86\\_identificacao\\_de\\_sistemas.pdf](http://www.unilestemg.br/principiumonline/publicacoes/03/downloads/68_86_identificacao_de_sistemas.pdf)>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2020, 20h15min.

BALDISSARELLI, L.; FABRO, E. **Manutenção Preditiva na indústria 4.0.** Scientia cum Industria. Vol. 7, No. 2. 2019.

BANDEMER, H.; GOTTWALD, S. **Fuzzy sets, fuzzy logic, fuzzy methods.** New York: Editora John Wiley e Sons, Inc. 1996.

CAVALCANTI, J.; MELOP, H.; SOUTO, C. CAVALCANTI, M. J. H. F. **Lógica fuzzy aplicada às engenharias.** João Pessoa-PB. 2012. Livro. Disponível em: <[http://www.logicafuzzy.com.br/wp-content/uploads/2013/04/logica\\_fuzzy\\_aplicada\\_as\\_engenharias.pdf](http://www.logicafuzzy.com.br/wp-content/uploads/2013/04/logica_fuzzy_aplicada_as_engenharias.pdf)>. Acesso em: 14 de agosto de 2020, 20h15min.

CHENCI G. P.; RIGNEL, D. G. S.; LUCAS, C. A. **Uma Introdução à Lógica Fuzzy.** Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e Gestão Tecnológica. Volume 01, No. 01. 2011. Multisector Asset Management Case Studies – Presented by U.S. Environmental Protection Agency and U.S. Department of Transportation, 2011.

COLOSIMO, E. A.; GIOLO, S. R. **Análise de Sobrevivência Aplicada.** São Paulo: Editora Edgar Blucher, 2006.

CORREA, R. *et al.* **Modelagem matemática para otimização de periodicidade nos planos de manutenção preventiva.** Gest. Prod. vol.23 no.2 São Carlos Apr./June 2016.

DE ALMEIDA, M. T. **Manutenção Preditiva: Benefícios e Lucratividade.** Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 2010.

Documento Nacional da Manutenção: a Situação da manutenção no Brasil. Associação Brasileira de Manutenção ABRAMAN. 2011.

DUBOIS, D.; PRADE, H.; YAGER, R. **Fuzzy information engineering: a guided tour of applications.** New York: Editora John Wiley e Sons, Inc. 1997.

ELSAYED, E. **System reliability engineering.** Reading, Massachusetts: Addison Wesley Longman, 1996.

FILHO, L. F. S. **Manutenção por análise de vibrações: uma valiosa ferramenta para gestão de ativos.** Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Naval e Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 57p., 2013.

FILHO, V. B. **Confiabilidade Básica e Prática.** 1ª Edição. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda. 1997.

FLOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. **Confiabilidade e Manutenção Industrial.** Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda. 2009.

GARDONI, P. **Risk and Reliability Analysis: Theory and Applications.** Editora Sringer. 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTZATION. ISSO 20816: Mechanical Vibration. 2016.

KARDEC, A. *et al.* **Manutenção – Função Estratégica.** 4ª Edição, 2009.

LEITCH, R. D., 1995. **Reliability Analysis for Engineers: An Introduction.** OUP Catalogue, Oxford University Pres.

LEI, T., HERDER, P., WIJNIA, Y. **Asset Management: The State of the Art in Europe from a LifeCycle Perspective.** Editora Sringer, 2012.

MARÇAL, R. F.; KOVALESKI, J. L. **Implementação de um sistema de controle inteligente utilizando a lógica fuzzy**. XI SIMPEP - Bauru, SP, Brasil, 08 a 10 de novembro de 2004.

MARQUES, A. C.; BRITO, J. N. Importância da manutenção preditiva para diminuir o custo em manutenção e aumentar a vida útil dos equipamentos. **Brazilian Journal of Development**. Vol. 5, No. 7, 2019.

NASCIF, J.; DORIGO, L. C. **Manutenção Orientada para Resultados**. Rio de Janeiro: Quality Mark, 2010.

Project Management Institute. **Um Guia do Conhecimento em Gerenciamento de Projetos (Guia Pmbok®)**. s.l.: Saraiva, 2013.

RIGNEL, D. *et al.* **Uma Introdução a Lógica Fuzzy**. Resiget, Vol01, 2011.

SCHNEIDER, J. **Asset management techniques**. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. Vol. 28, ano 2006, pág. 643–654. Disponível em: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0142061506000834?token=EB42E33D7CA47CBC14278C79F5AAD71A8DB4B125DB814D2E6311AE33E8112AF5A0375DC72611B32AD9317CBFBEE9D85E>>. Acesso em: 13 de janeiro de 2020, 19h45min.

SELLITO, M. A. **Inteligência Artificial: uma aplicação em uma indústria de processo contínuo**. Gest. Prod. vol.9 no.3 São Carlos Dec. 2002.

SIQUEIRA, I. P. **Manutenção Centrada em Confiabilidade: Manual de implementação**. 3ª Edição. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora. 2014.

VARNIER, D. Why Industry Needs Asset Management Tools. **Journal of Computing in Civil Engineering**, Volume 15 Issue 1 - January, 2001.