INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

Análise dos dados de manutenção corretiva e preditiva do conjunto motobomba no
circuito primário de refrigeração do Reator IEA-R1

ALEXANDRE RUBIO DE OLIVEIRA

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências na área de Tecnologia Nuclear -
Reatores

Orientador: Prof. Dr. Thadeu das Neves Conti

São Paulo

2020

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

Análise dos dados de manutenção corretiva e preditiva do conjunto motobomba no
circuito primário de refrigeração do Reator IEA-R1

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

ALEXANDRE RUBIO DE OLIVEIRA

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências na área de Tecnologia Nuclear -
Reatores

Orientador: Prof. Dr. Thadeu das Neves Conti

São Paulo

2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

Como citar:

RUBIO DE OLIVEIRA, A. **Análise dos dados de manutenção corretiva e preditiva do conjunto motobomba no circuito primário de refrigeração do Reator IEA-R1**. 2020. 110 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: (10/07/2020)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN/USP, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

FOLHA DE APROVAÇÃO

Rubio de Oliveira, Alexandre

Análise dos dados de manutenção corretiva e preditiva do conjunto motobomba no circuito primário de refrigeração do Reator IEA-R1 / Alexandre Rubio de Oliveira; orientador Thadeu das Neves Conti. -- São Paulo, 2020. 110 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Reatores) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2020.

1. Alinhamento de eixos por laser. 2. Análise de vibrações. 3. Indicadores de manutenção. I. das Neves Conti, Thadeu, orient. II. Título.

Autor: Alexandre Rubio de Oliveira

Título: Análise dos dados de manutenção corretiva e preditiva do conjunto motobomba no circuito primário de refrigeração do Reator IEA-R1

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Data: 10 / 07 / 2020

Banca Examinadora

Prof. Dr.: Thadeu das Neves Conti (Presidente)

Instituição: IPEN/USP

Julgamento:_____

Prof. Dr.: Cyro Albuquerque Neto (Titular)

Instituição: Centro Universitário FEI

Julgamento:_____

Prof. Dr.: Jose Roberto Berretta

Instituição: Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo Julgamento:_____

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer toda a equipe do reator IEA-R1 especialmente para o Marcos Rodrigues de Carvalho e Mauro Onofre Martins onde disponibilizaram diversas horas de trabalho contribuindo com as coletas de dados. O Rafael Musarra da Empresa R&DAMASCO Soluções Industriais que nos ajudou na coleta de dados do alinhamento de eixos por laser.

Gostaria de agradecer também a minha esposa Daniele Leme e meus filhos Arthur Rubio e Davi Rubio pelo incentivo e apoio nos momentos de estudo, pesquisa e elaboração deste trabalho.

Um agradecimento especial ao professor orientador Thadeu das Neves Conti que está sempre nos ajudando a encontrar a melhor solução para resolução dos problemas e ao SENAI que proporcionou este momento de valorização do conhecimento.

RESUMO

RUBIO DE OLIVEIRA, A. ***Análise dos dados de manutenção corretiva e preditiva do conjunto motobomba no circuito primário de refrigeração do Reator IEA-R1.*** 2020. 110 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

Devido a evolução tecnológica as mudanças na manutenção industrial tem recebido um impacto muito grande com as tomadas de decisões durante as intervenções, pois estamos entrando na indústria 4.0. Cada vez mais existe um interesse muito grande das empresas em analisar os dados dos equipamentos para identificar o que chamamos de ponto preditivo, ou seja, o momento certo de parada do equipamento para realizar as atividades de manutenção garantindo a confiabilidade do sistema. O trabalho apresenta a análise dos dados de manutenção corretiva (mecânica) e preditiva (Vibrações mecânicas) dos conjuntos motobomba coletados em 8 anos de trabalho indicando os pontos críticos, consumo de energia e indicadores de classe mundial utilizados nas indústrias que buscam a excelência na manutenção industrial.

Palavras-chave: Alinhamento por laser; Análise de vibrações; Indicadores de manutenção.

ABSTRACT

RUBIO DE OLIVEIRA, A. Analysis of corrective and predictive maintenance data for the pump set in the primary refrigeration circuit of the IEA-R1 Reactor. 2020. 110 p. Dissertation (Master in Nuclear Technology), Institute of Energy and Nuclear Research, IPEN-CNEN / SP, São Paulo.

Due to technological developments, changes in industrial maintenance have received a very large impact with decision making during interventions, as we are entering Industry 4.0. Increasingly, there is a great interest by companies in analyzing equipment data to identify what we call a predictive point, that is, the right time to stop the equipment to perform maintenance activities, ensuring system reliability. The work presents the analysis of the corrective (mechanical) and predictive (mechanical vibration) maintenance data of the pump sets collected in 8 years of work, indicating the critical points, energy consumption and world-class indicators used in the industries that seek excellence in maintenance. industrial.

Keywords: Laser alignment; Vibration analysis; Maintenance indicators.

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Características das Bombas.....	35
Tabela 2 - Valores de referência de vibração.....	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparativo do conjunto desalinhado e alinhado	16
Figura 2 - Porcentagem dos problemas das máquinas rotativas.....	17
Figura 3 - Tempo estimado até a falha de máquinas rotativas devido ao desalinhamento do eixo.	18
Figura 4 - Métodos de alinhamento de eixos.....	19
Figura 5 – Efeitos no consumo de energia.....	20
Figura 6 - Comparativo de reparos de selos mecânicos de bombas.....	20
Figura 7 - Comparativo de reparos de bombas	21
Figura 8 - Relação entre paralelismo e ciclo de vida de rolamento.	21
Figura 9 - Imagem termográfica do conjunto motobomba alinhado e desalinhado. ...	25
Figura 10 - Núcleo do Reator IEA-R1 do IPEN.	30
Figura 11 - Fluxograma simplificado do circuito primário IEA-R1	31
Figura 12 - Modelo 3D do circuito primário IEA-R1	32
Figura 13 - Modelo 3D do circuito primário e secundário IEA-R1.....	33
Figura 14 - Corte lateral do reator com os pavimentos.	36
Figura 15 - Classificação dos tipos de bombas.	37
Figura 16 - Bomba centrífuga.....	38
Figura 17 - Tipos e formas dos rotores.	38
Figura 18 - Bomba centrífuga com rotor em balanço, simples estágio, monobloco. .	39
Figura 19 - Bomba centrífuga com rotor em balanço, simples estágio, bomba e motor separado.	39
Figura 20 - Bomba centrífuga com rotor em balanço, simples estágio, bomba e motor separado.	40

Figura 21 - Bomba centrífuga com rotor entre mancais, multiestágio, bomba e motor separados.....	40
Figura 22 - Eixos colineares	45
Figura 23 - Problemas causados pelo desalinhamento do eixo: Distorção do eixo...	45
Figura 24 - Efeito da dilatação térmica.....	46
Figura 25 - Desalinhamento desconhecido	47
Figura 26 - Condições do desalinhamento.....	47
Figura 27 - Tipos de pé manco.....	48
Figura 28 – Método radial e axial.	52
Figura 29 - Método reverso.	53
Figura 30 – Método de alinhamento por laser.....	54
Figura 31 - Posição do sensor.....	57
Figura 32 - Identificação dos sensores.....	64
Figura 33 - Posição dos sensores do motor e volante de inércia.....	65
Figura 34 - Posição dos sensores da bomba.	66
Figura 35 - Painel com conectores para medição de vibração.....	66
Figura 36 – Sistema COMPASS	67
Figura 37 – Sistema de manutenção.....	70
Figura 38 - Monitor do alinhador a laser.....	73
Figura 39 - Motor elétrico e volante de inércia	74
Figura 40 - Bomba centrífuga e volante de inércia.....	74
Figura 41 - Medição para coleta de dados	75
Figura 42 - Digitação dos dados.....	75
Figura 43 - Seleção dos símbolos	76
Figura 44 - Posição Vertical	76

Figura 45 - Posição Horizontal	77
Figura 46 - Pontos de coleta	79
Figura 47 - Gráfico do sensor A1	79
Figura 48 - Gráfico do sensor A2	80
Figura 49 - Gráfico do sensor A3	80
Figura 50 - Gráfico do sensor A4	81
Figura 51 - Gráfico do sensor A5	81
Figura 52 - Gráfico do sensor A6	82
Figura 53 - Gráfico do tempo médio entre falhas (MTBF) das bombas A e B.....	83
Figura 54 - Gráfico do tempo médio para reparos (MTTR) das bombas A e B.	84
Figura 55 - Gráfico da disponibilidade das bombas A e B.....	85
Figura 56 - Gráfico da confiabilidade das bombas A e B (1mês).	86
Figura 57 - Gráfico da confiabilidade das bombas A e B (2meses).....	87
Figura 58 - Produtividade das bombas A e B.....	88
Figura 59 - Gráfico do consumo em quilowatt-hora por ano.	90
Figura 60 - Custo estimado de energia do circuito primário.	90
Figura 61 - Economia estimada.....	91
Figura 62 - Medição trem de máquina.....	92
Figura 63 - Medição individual – Bomba e Volante.	93
Figura 64 - Medição individual – Volante e Motor Elétrico.	93
Figura 65 – Parede de chumbo.....	94

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS

B101A – BOMBA A

B101B – BOMBA B

CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR

CP-BOM-01 – BOMBA A DO CIRCUITO PRIMÁRIO

CP-BOM-02 – BOMBA B DO CIRCUITO PRIMÁRIO

DISP – DISPONIBILIDADE

EUA – ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA

IEA-R1 - REATOR NUCLEAR DE PESQUISA DO IPEN, ANTIGO IEA (INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA)

IPEN – INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

LA – LADO ACOPLADO

LOA – LADO OPOSTO AO ACOPLADO

LCC – LIFE CYCLE COST

LÂMBDA – TAXA DE FALHAS

MTBF - MEAN TIME BETWEEN FAILURES – TEMPO MÉDIO ENTRE FALHAS

MTTR - MEAN TIME TO REPAIR - TEMPO MÉDIO PARA REPAROS

N – FREQUÊNCIA DE ROTAÇÃO

NBR – NORMA BRASILEIRA

NU – CODIFICAÇÃO DO ROLAMENTO

NR – NÚMERO DE REPAROS

PCM – PLANEJAMENTO E CONTROLE DA MANUTENÇÃO

R – RELIABILITY (CONFIABILIDADE)

RMC – RELETÓRIO DE MANUTENÇÃO CORRETIVA

RMS – ROOT MEAN SQUARE (RAIZ QUADRADA MÉDIA)

RMSv - ROOT MEAN SQUARE (RAIZ QUADRADA MÉDIA) VALOR DE REFERÊNCIA DO RELATÓRIO

T – TEMPO PARA PROJEÇÃO

TC1A – TROCADOR DE CALOR 1A

TC1B – TROCADOR DE CALOR 1B

TMEF – TEMPO MÉDIO ENTRE FALHAS

TO – TEMPO DE OPERAÇÃO

TR – TEMPO DE REPARO

KPI – KEY PERFORMANCE INDICATORS

WCM- WORLD CLASS MAINTENANCE

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	22
1.2	Justificativa	23
2	DELIMITADORES	24
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	30
4.1	Reator IEA-R1	30
4.2	Bomba centrífuga	37
4.3	Tipos de Manutenção	42
4.4	Alinhamento de corpos rotativos	45
4.5	Técnicas de alinhamento de corpos rotativos	51
4.6	Monitoramento de máquinas e equipamentos	56
4.7	Indicadores de Manutenção	60
5	METODOLOGIA	64
5.1	Primeira Etapa: Coleta de dados de vibração	64
5.2	Segunda Etapa: Coleta de dados das O.S's (Manutenção Corretiva)	70
5.3	Terceira Etapa: Coleta de dados de corrente elétrica	72
5.4	Quarta Etapa: Alinhamento por laser no conjunto motobomba	73
6	RESULTADOS	78
6.1	Primeira Etapa: Análise de dados de vibração das bombas do circuito primário	79
6.2	Segunda Etapa: Análise de dados dos Indicadores de manutenção	83
6.3	Terceira Etapa: Análise de dados de corrente elétrica	90
6.4	Quarta Etapa: Análise do Alinhamento por laser	92
7	CONCLUSÕES	95
8	TRABALHOS FUTUROS	96
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
APÊNDICE A – Coleta de dados de vibrações mecânicas de 2012 a 2019		103
APÊNDICE B – Coleta de dados das ordens de serviços		105
APÊNDICE C – Produtividade das Bombas		106
APÊNDICE D – Valores de tensão e corrente elétrica		107
APÊNDICE E – Consumo do reator em kWh		108
APÊNDICE F – Custo da energia e economia estimada		109

1 INTRODUÇÃO

As intervenções realizadas para troca de componentes na manutenção corretiva ou preventiva em conjunto motobomba requerem a desmontagem parcial ou total. Durante a desmontagem mesmo demarcando a posição dos componentes que estão fixados, na montagem não é garantido que o conjunto vá trabalhar em harmonia porque existe um período de acomodação e, além disso, não tem precisão de ajustes por ser um processo manual. Os níveis excessivos de vibração e ruído associados às bombas industriais são uma preocupação cada vez maior - tanto por razões de desempenho quanto pela conformidade com a legislação existente. Frequentemente, as causas raízes dos níveis excessivos de vibração e ruído estão relacionadas ao alinhamento deficiente dos eixos, lubrificação inadequada, procedimento de montagem incorreto e arranjos de rolamentos inadequados ou arrefecimento ineficiente. Seja qual for a causa, altos níveis de vibração aumentam o atrito, o consumo de energia e o desgaste de componentes, muitas vezes levando a: (SKF,2017)

- Falhas prematuras nos equipamentos;
- Manutenção cara;
- Tempo de parada não programada;
- Perdas de produção.

O desalinhamento causa a diminuição do MTBF (Mean Time Between Failures - Tempo Médio entre Falhas) das máquinas ou equipamentos porque induz a ocorrência de esforços que provocam o desgaste prematuro dos componentes. Um estudo na Inglaterra mostrou que de 160 máquinas escolhidas aleatoriamente em diversas empresas químicas de grande porte somente 7% estavam dentro dos limites de tolerância aceitáveis para o alinhamento. (KARDEC, 2013)

As máquinas precisam estar alinhadas tanto no plano horizontal quanto no vertical. O desalinhamento pode ser causado na posição paralela ou angular (Figura 1). As

possíveis consequências do desalinhamento dos eixos são graves para o resultado financeiro de qualquer empresa e incluem: (SKF,2017).

- maior atrito e, portanto, maior consumo de energia;
- falha prematura de rolamentos e vedações;
- falha prematura de eixos e acoplamentos;
- vazamento excessivo de lubrificante através das vedações;
- falhas nos acoplamentos e nos parafusos de fixação às fundações;
- maior nível de vibração e ruído.

Figura 1 - Comparativo do conjunto desalinhado e alinhado

Fonte: SKF, 2017.

Os maiores problemas de máquinas e equipamentos rotativos são relacionados ao alinhamento, desbalanceamento e outros problemas, podendo variar de empresa para empresa (Figura 2). (LIFETIME RELIABILITY SOLUTIONS, 2017).

Figura 2 - Porcentagem dos problemas das máquinas rotativas

Fonte: LIFETIME RELIABILITY SOLUTIONS, 2017.

O desalinhamento pode se disfarçar muito bem em máquinas rotativas. O que se observa são os efeitos secundários de desalinhamento, como ele lentamente danifica a máquina durante longos períodos de tempo. Alguns dos sintomas comuns de desalinhamento são: (PIOTROWSKI, 2006).

- Falhas prematuras de rolamento, vedação, eixo ou acoplamento;
- Temperaturas elevadas perto dos rolamentos;
- Excesso de vazamento de lubrificante nas vedações dos mancais;
- Temperaturas mais elevadas do que as normais em certos tipos de acoplamentos flexíveis quando estiverem funcionando ou imediatamente após a unidade ser desligada;
- Números excessivos de falhas de acoplamento ou desgaste rápido;
- Parafusos de fundação soltos, normalmente causados por uma condição de "pé manco" ou por desalinhamento.

Com a operação contínua do equipamento, existe um potencial de danos severos a rotores, rolamentos e acoplamentos, portanto ocorre uma decomposição inicial dos componentes das máquinas. A Figura 3 apresenta o tempo estimado até a falha do equipamento. Exemplo: Se o conjunto estiver com um desalinhamento de 1,27mm, o tempo estimado de operação contínua é de aproximadamente 2 meses, mas se o conjunto estiver com um desalinhamento de 0,1mm, o tempo estimado é de aproximadamente 100 meses (PIOTROWSKI, 2006).

Figura 3 - Tempo estimado até a falha de máquinas rotativas devido ao desalinhamento do eixo.

Fonte: PIOTROWSKI, 2006

A vibração da máquina aumenta com o desalinhamento. Alta vibração leva à fadiga dos componentes da máquina e consequentemente a uma falha prematura. (PRUFTECHNIK, 2012).

A maioria das falhas, cerca de 80%, é causada por vibrações. Os restantes 20% são resultantes dos efeitos da temperatura. Em quase todas as situações os custos envolvidos são elevados, e um montante significativo é despendido para fazer frente a degradação nos equipamentos do sistema secundário. (MANESCHY, 2014).

Para minimizar os problemas causados por desalinhamento, são utilizados os métodos nas manutenções corretivas ou preventivas apresentados na Figura 4: (SKF, 2017).

Figura 4 - Métodos de alinhamento de eixos

Fonte: SKF, 2017.

- Tradicional com régua e calibrador de folgas - Rápido, mas não tem precisão;
- Com relógio comparador - Preciso, demorado e requer habilidade e experiência do operador;
- Por laser - Preciso, rápido e não requer muita habilidade e experiência do operador.

O alinhamento a laser traz inúmeros benefícios como: (PRUFTECHNIK, 2017).

1. **Redução no consumo de energia em até 10%.** A Figura 5 apresenta a variação do consumo de energia em função do desalinhamento paralelo em mm.

Figura 5 – Efeitos no consumo de energia.

Fonte: PRUFTECHNIK, 2017.

2. **Redução de Falhas inesperadas** – reduz até 65% em reparos de selos mecânicos e até 30% de reparos de bombas. As Figuras 6 e 7 trazem o comparativo entre o número de reparos de selos e reparo de bombas, podendo observar a redução de falhas após o alinhamento do conjunto.

Figura 6 - Comparativo de reparos de selos mecânicos de bombas.

Fonte: PRUFTECHNIK, 2017

Figura 7 - Comparativo de reparos de bombas

Fonte: PRUFTECHNIK, 2017.

3. **Vida de máquina mais longa.** A Figura 8 apresenta o aumento do ciclo de vida dos rolamentos em função da redução do desalinhamento paralelo.

Figura 8 - Relação entre paralelismo e ciclo de vida de rolamento.

Fonte: PRUFTECHNIK, 2017.

1.1 Objetivos

O trabalho tem como objetivo geral analisar o comportamento dos conjuntos motobomba B101A e B101B, do circuito primário do reator IEA-R1, com o auxílio da análise de vibração de nível global, alinhamento de eixos por laser e histórico de manutenção corretiva e preditiva para avaliar o seu funcionamento e identificar seus pontos críticos.

Objetivos específicos são:

- Calcular o custo de energia elétrica do conjunto motobomba estimando redução do consumo através do alinhamento do conjunto;
- Calcular o MTBF (Mean Time Between Failures - Tempo Médio Entre Falhas), MTTR (Mean Time To Repair - Tempo Médio Para Reparo), Disponibilidade, Confiabilidade e Produtividade que são considerados indicadores de manutenção de classe mundial para avaliação de máquinas e equipamentos.

1.2 Justificativa

Durante a análise técnica da manutenção corretiva realizada nas bombas do circuito primário foi detectado um desgaste severo na ponta do eixo no lado do acoplamento tendo que recuperar com soldagem e usinagem, o que demanda um tempo muito grande e custo elevado de manutenção (LEITE, 2002). No relatório fica bem claro que não tinham dados suficientes para a parada antecipada de troca dos componentes impedindo a danificação do eixo e não apresentava informações do alinhamento do conjunto.

A bomba de refrigeração e seus componentes, por serem vitais para o funcionamento do processo, requerem uma atenção especial na manutenção para formar dados suficientes durante as tomadas de decisões precisas nas intervenções da equipe de manutenção. Por isso a proposta do trabalho é realizar o monitoramento e avaliação através dos dados de manutenção utilizando um alinhador de eixos por laser que é o método mais atualizado e preciso para redução dos problemas que mais afetam as máquinas rotativas, e que deverá garantir a confiabilidade do sistema reduzindo o consumo de energia e os números de paradas para manutenção corretiva.

2 DELIMITADORES

Os dados de vibrações coletados para o desenvolvimento deste trabalho foram analisados utilizando como referência as frequências de coletas mensais, considerando o valor de nível global. Através das coletas mensais foram calculadas as médias anuais.

Os cálculos dos indicadores de classe mundial foram utilizados as horas de trabalho anuais do Reator e das manutenções corretivas mecânicas.

No cálculo de consumo foram utilizados com referência o consumo mensal do Reator e os dados de corrente elétrica durante o funcionamento das bombas.

Para finalizar, na verificação do alinhamento foi considerado que o motor elétrico e a bomba centrífuga trabalham com as mesmas temperaturas, pois não existe um controle de temperatura individual destes equipamentos.

Como o Reator não opera de modo contínuo tendo algumas paradas semanais estes delimitadores foram utilizados para garantir uma maior confiabilidade dos resultados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica aqui descrita tem como objetivo buscar na literatura as pesquisas de casos sobre desalinhamento de eixos, onde apresentam informações relacionadas às vibrações mecânicas, temperatura e corrente elétrica, que são as principais variáveis das máquinas e equipamentos em termos de manutenção.

Um estudo foi conduzido pelo Instituto de Infraestrutura nos EUA para avaliar o efeito do desalinhamento em elementos vitais da máquina, tais como rolamentos, vedações e acoplamentos. Em uma série de testes, o desalinhamento foi introduzido em um conjunto motobomba. Em cada novo intervalo de desalinhamento foram tiradas fotografias termográficas para identificar o grau de aumento de temperatura nos componentes vitais. Os testes foram conduzidos com diversos tipos de acoplamentos flexíveis. Sem exceção, todos os acoplamentos, rolamentos e caixas da máquina (e, portanto, selos) apresentaram aumento significativo de temperatura. A Figura 9 mostra o efeito do desalinhamento nos componentes quando o conjunto da máquina foi alinhado a $\pm 0,05\text{mm}$ de tolerância e quando o desalinhamento foi aumentado para $+ 0,5\text{mm}$ (LUDECA, 2002).

Figura 9 - Imagem termográfica do conjunto motobomba alinhado e desalinhado.

Fonte: LUDECA, 2002.

Não só foi demonstrado que o elemento flexível do acoplamento aquece, mas as próprias máquinas também desenvolvem temperaturas elevadas particularmente em torno dos alojamentos de rolamentos (LUDECA, 2002). Os rolamentos e vedações não são projetados para operar a temperaturas elevadas causadas por desalinhamento por períodos prolongados de tempo. Um resultado inevitável do seu

funcionamento nestas condições é uma falha prematura e uma redução da vida útil da máquina (PRUFTECHNIK, 2012).

De acordo com KARDEC e NASCIF (2013), o alinhamento mal feito leva à diminuição do Tempo Médio entre Falhas dos equipamentos, pois induz a ocorrência de esforços que provocam o desgaste prematuro dos componentes.

Para SCHEFFER e GIRDHAR (2004), o desalinhamento de uma máquina causa forças de atrito e de flexão dentro do acoplamento. Isso leva a tensões anormais nos rolamentos anti-fricção, bem como desgaste e aquecimento do acoplamento. O eixo também pode falhar devido à fadiga causada por tensão cíclica maior que a do projeto. Tensões cíclicas nos rolamentos criam vibrações axiais e radiais. Além das sobrecargas, elas causam vibrações que são transmitidas para outras partes do equipamento. Bombas e turbinas equipadas com vedantes especiais são particularmente suscetíveis a falhas devido a vibrações excessivas. As vibrações podem ser transmitidas para máquinas de reserva e podem danificar seus rolamentos (falso polimento) e também suas vedações. Assim, quando são necessárias, até as máquinas de reposição não estão disponíveis. Para evitar todos os problemas associados ao desalinhamento, torna-se essencial conduzir este procedimento de manutenção com absoluta certeza. No entanto, deve-se notar que todas as máquinas não exigem o mesmo nível de precisão no alinhamento. Depende do tipo, velocidade e confiabilidade esperados de uma máquina que determina o esforço necessário para alinhá-la.

Para JESSE, HINES e EDMONDSON (2015) o projeto de pesquisa financiado pelo Centro de Manutenção e Confiabilidade para examinar as características do desalinhamento de máquinas rotativas determinou que os resultados desses testes mostram que quantidades relativamente pequenas de desalinhamento do eixo podem ter um impacto significativo na vida operacional de um rolamento. A magnitude da redução da vida útil do rolamento varia com o tipo de acoplamento, a capacidade de carga do rolamento e as dimensões do motor. Os resultados desta pesquisa mostram que, em alguns casos, até 50% da vida útil esperada do rolamento pode ser perdida com um desalinhamento de 0,127mm.

De acordo com JESSE e HINES (2019) muitos pesquisadores afirmaram que a eficiência energética aumentará com o alinhamento aprimorado. Isso acontece porque os acoplamentos e mancais operando em um estado desalinhado consomem energia,

tem um custo elevado de manutenção corretiva e não é apenas desperdiçado, mas atua contra sistemas mecânicos. Para verificar essas alegações, foram realizados experimentos controlados na Universidade do Tennessee e no Oak Ridge Center for Electric Machinery System Testing para definir claramente as relações entre o desalinhamento do motor e a eficiência do motor.

O alinhamento de eixos é responsável por até 50% de todos os custos relacionados com paradas de máquinas rotativas. Os eixos alinhados com precisão podem evitar um grande número de paradas nas máquinas e reduzir o tempo de parada não planejada, que resulta em uma perda de produção. No ambiente da indústria 4.0 que exige redução de custos e otimização de ativos, a necessidade do alinhamento de eixos com precisão é primordial para vida útil dos ativos (SKF,2017).

De acordo com PIOTROWSKI (2006) o principal objetivo do alinhamento preciso é aumentar o tempo de vida operacional das máquinas rotativas. Para atingir esse objetivo, os componentes de maquinário com maior probabilidade de falha devem operar dentro de seus limites de projeto. Como as peças com maior probabilidade de falhar são os rolamentos, vedações, acoplamentos e eixos, a maquinaria alinhada com precisão reduzirá as forças axiais e radiais excessivas nos mancais para garantir maior vida útil do mancal e estabilidade do rotor sob condições operacionais dinâmicas. Alinhamento preciso reduzirá a possibilidade de falha do eixo devido a fadiga cíclica, minimizará a quantidade de desgaste nos componentes do acoplamento, aliviará a quantidade de flexão do eixo desde o ponto de transmissão de energia no acoplamento até o rolamento da extremidade do acoplamento e manterá as folgas internas adequadas do rotor.

Para a PRUFTECHNIK (2017) o maquinário rotativo é suscetível ao desalinhamento. Máquinas que são bem alinhadas na fase de comissionamento e consequentemente conservadas regularmente, reduzirão a longo prazo tanto o custo de operação quanto os custos de manutenção. Alinhamento de precisão a laser estende a disponibilidade da máquina conforme o Tempo Médio Entre Falhas (Mean Time Between Failure - MTBF) aumenta. Isso protege os bens e aumenta a qualidade do produto, conforme a vibração é reduzida para níveis muito baixos. Quando desalinhados, a carga dos eixos aumenta dramaticamente devido às forças de reação criadas dentro do acoplamento.

De acordo com BENEVENUTI (2004, p. 31 apud Wowk, 1991) desalinhamento é o segundo problema mais comum em máquinas rotativas, respondendo por aproximadamente 30% dos casos. Ele ocorre sempre que dois eixos acoplados não se encontram sobre uma mesma reta. Existem basicamente dois tipos de desalinhamento de eixos, o paralelo (off-set) e o angular: o desalinhamento é dito paralelo quando os dois eixos encontram-se sobre direções paralelas e não colineares, e é chamado de angular quando os eixos acoplados encontram-se sobre direções não paralelas mas que se cruzam no acoplamento; normalmente ocorre uma combinação dos dois casos. As consequências mais comuns de um desalinhamento são um rápido desgaste dos rolamentos e uma deterioração acelerada do próprio acoplamento.

O desalinhamento entre a bomba e o Motor Elétrico é uma das principais causas da vibração, juntamente com o desbalanceamento. O diagnóstico para identificar o desalinhamento é realizado através das frequências de vibrações mecânicas. O desalinhamento pode causar vibração nas frequências de $1N$, $2N$, $3N$, $4N$ e $6N$. As mais usuais são $1N$ e $2N$, onde N é a frequência de rotação. Quando a frequência predominante é de $2N$, a causa mais provável é desalinhamento. (DRUMMOND, 2006).

LEUGNER (2018) comenta que o desalinhamento de eixo da máquina pode causar até 50% dos problemas de vibração da máquina. Como consequência disso tem-se duas condições comuns. O desalinhamento de deslocamento paralelo é uma condição em que as linhas centrais dos dois eixos não se encontram, enquanto o deslocamento angular ocorre onde as linhas centrais dos eixos não são paralelas entre si. Paralelo e angular também podem existir ao mesmo tempo. Para garantir que as máquinas rotativas sejam confiáveis, produtivas e eficientes, é extremamente importante que os problemas de desalinhamento sejam eliminados.

Para LOBANOFF (2006) o causador de desalinhamento entre motor e bomba é gerado pelo deslocamento dos pés da fundação da bomba ou da tubulação. Os mancais podem apresentar alterações nas vibrações e para fazer o alinhamento são utilizados relógios comparadores ou alinhador por laser quando requerer maior precisão.

As forças resultantes do desalinhamento nos eixos da máquina, motor e bomba causam desgaste avançado nos rolamentos e vedações, resultando em desperdício de energia, além disso, à medida que os componentes, como rolamentos, correias de transmissão ou engrenagens, ficam desgastados, eles podem causar vibrações aumentando a temperatura de trabalho (BERNET, 2016).

Uma avaria em máquinas ou equipamentos causa perdas de produção devastadoras. Quase 50% de todas as avarias de máquinas são resultantes do desalinhamento de eixos (FIXTURLASER, 2019).

Um estudo realizado pela PRÜFTECHNIK (2017) identificou que 50% de todos os danos nas bombas são causados por desalinhamento. Se um conjunto de 95 ativos estiver operando com uma diversidade de bombas de 50 a 200 CV desalinhadas a 0,38 mm com o custo da eletricidade de R\$ 0,70 / kWh (média dos EUA) e o custo de reparo da bomba de R\$ 582,00 / h de mão-de-obra, pode-se economizar R\$ 1.002.553,2 por ano se todas as bombas estiverem alinhadas a 0,001 mm. Foram encontradas quatro categorias de economia: consumo de energia, vedações, rolamentos e custo de reparo da bomba.

Para YAMAMOTO (2017) as vibrações não podem ser totalmente eliminadas, mas podem ser medidas e analisadas para orientar as ações corretivas. Mesmo se os dois eixos desalinhados estiverem com acoplamento flexível, o acoplamento compensará o desalinhamento por pouco tempo e introduzirá vibrações nas instalações. A vibração cria forças prejudiciais nos rolamentos, causando desgaste prematuro, o que aumenta ainda mais a vibração de nível global e com isso o problema se agravará até que um ou mais rolamentos falhem. As vedações mecânicas da bomba também podem sofrer danos e começar um vazamento de óleo ou do produto que está transportando e em pouco tempo, a instalação deve passar por uma intervenção.

Uma máquina desalinhada, desbalanceada, com problemas de fixação e ressonância que está vibrando consome mais energia. Assim como a energia necessária para a máquina desempenhar sua função requerida, uma energia adicional também é necessária para sustentar a vibração. Esses problemas podem ser minimizados com o monitoramento constante das máquinas (COMMTTEST,2006).

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Reator IEA-R1

O reator IEA-R1 é um reator de pesquisa tipo piscina, moderado a água leve e utiliza o berílio e o grafite como refletores. Sua primeira criticalidade foi em 1957 no IEA (Instituto de Energia Atômica), antigo nome do IPEN (Instituto de Pesquisa Nuclear e Energia), em São Paulo. O projeto original foi desenvolvido pela empresa americana Babcock Wilcox e o reator iniciou com potência de 2 MW. Desde o início em 1957, o IEA-R1 foi modificado por vários motivos, como substituição de estruturas e componentes envelhecidos, atualização de sistemas, e adequação aos códigos e normas de segurança que foram alterados ao longo dos anos. As principais modificações realizadas no circuito primário até 2012 estão listadas abaixo: (FAINER, 2013).

- 1974: Duplicação do sistema de refrigerante primário para redundância e introdução de volantes nas bombas centrífugas primárias;
- 2002: Manutenção principal de bombas do circuito primário.

FAINER et al., 2013 relata que o circuito primário fornece a água para resfriar o núcleo do reator. É um circuito aberto, uma vez que a refrigeração é fornecida pela própria água do poço do reator. Nesse sistema, a água passa através das placas do núcleo do reator localizado no fundo da piscina (Figura 10).

Figura 10 - Núcleo do Reator IEA-R1 do IPEN.

Fonte: IPEN, 2019.

Em seguida, passa por um tanque de decaimento de nitrogênio que é bombeada pelas bombas B101A e / ou B101B para o respectivo trocador de calor TC1 A e / ou TC1B, onde é resfriada retornando, então, para a piscina através de um difusor conectado ao bocal da tubulação. O sistema possui bombas redundantes, trocadores de calor e válvulas conforme fluxograma simplificado representado na Figura 11 (FAINER, 2013).

Figura 11 - Fluxograma simplificado do circuito primário IEA-R1

Fonte: FAINER et al., 2015.

A Figura 12 representa o modelo tridimensional do circuito primário com todas as instalações nas devidas posições de trabalho, facilitando o entendimento de montagem e proporção de tamanho.

Figura 12 - Modelo 3D do circuito primário IEA-R1

Fonte: FAINER et al., 2015.

De acordo com a Figura 13, o circuito secundário fornece água para resfriar o trocador de calor TC1-A e / ou TC1-B. Também é um circuito aberto, pois a refrigeração é fornecida pelas torres de resfriamento TR1-A e / ou TR1-B. A água retornada é bombeada através das bombas A e B do circuito secundário para o respectivo trocador de calor TC1-A e / ou TC1-B (FAINER, 2013).

Figura 13 - Modelo 3D do circuito primário e secundário IEA-R1

Fonte: FAINER et al., 2013.

No caso de uma parada de bomba, a vazão no circuito primário irá diminuir progressivamente. Quando a vazão atingir 90% da vazão nominal, detectada pelo sensor de vazão no circuito primário ou pela diferença de pressão no núcleo, o reator será automaticamente desligado pelo Sistema de Proteção. O tempo máximo de queda das barras de controle é cerca de 1 segundo, a partir do sinal de desligamento até o início do trecho de amortecimento da barra na base do núcleo.

Por questões de segurança a bomba de refrigeração do circuito primário continua em funcionamento, com rotação decrescente, por 80 segundos, após o início da perda de alimentação, devido à atuação do volante de inércia acoplado ao eixo da bomba e motor elétrico. No entanto, verifica-se que ocorre o desacoplamento da válvula de acoplamento aos 24 segundos do início do evento, ocorrendo a partir de então, o resfriamento do núcleo por circulação natural. Estes 80 segundos são necessários para resfriar o núcleo devido ao calor de decaimento dos produtos de fissão. Após a redução do fluxo de nêutrons, devido ao desligamento do reator, os produtos de fissão continuam gerando calor no núcleo. Por especificação de projeto este tempo é suficiente para remoção deste calor.

De acordo com BRANCO FILHO (2016, p.2):

“A redundância de válvulas, bombas e trocadores de calor faz parte dos requisitos de segurança do reator e a alternância no uso das bombas e dos trocadores de calor faz parte dos procedimentos de operação inerentes ao programa de gerenciamento de vida da instalação.”

Conforme as operações de números 74, 75 e 76 dos dias 29, 30 e 31 de julho/2019, a temperatura de entrada da água para refrigeração do circuito primário em uma potência de 4,5 MW durante 8 horas por dia, é de aproximadamente 31°C e saída de 35,9°C e do circuito secundário a entrada é de 22,3°C e saída de 27,2°C. As temperaturas são consideradas valores médios e podem variar conforme a temperatura externa no dia, mas a diferença entre elas (ΔT) não tem muitas variações.

De acordo com LEITE (2002) as duas bombas apresentam as características da Tabela 1:

Tabela 1 – Características das Bombas

Fabricante:	KSB do Brasil
Modelo:	SPK-250-31
Tipo:	Centrífuga
Rotor:	Helicoidal
Eixo:	Horizontal
Vedação:	Gaxetas
Vazão Máxima:	890 m ³ /h
Vazão de Operação:	681 m ³ /h
Altura Manométrica:	27,4 a 18,5 m.c.a
Rotação:	1760 r.p.m
Potência consumida:	57 kW
Acionamento:	Motor elétrico Arno Carcaça tipo AR-315 AB Potência: 100 CV - 73,6 kW Tensão: 440 V - 60 Hz Corrente elétrica: 111 A
Volantes:	Diâmetro: 650 mm Largura: 210 mm Momento de Inércia: 29 kgf.m ²

Fonte: V. LEITE et al., 2002

As bombas utilizam de 4 a 5 litros de óleo TALPA SAE 30 - SHELL e GEAR 220 SAE30 – LUBRAX com periodicidade anual. Os mancais do volante de inércia e do motor elétrico são lubrificados com LITH 2 - Lubrax e RETINAX HD – Shell com periodicidade bimestral.

De acordo com MARTINS 2015, o prédio do Reator possui 5 pavimentos:

- **Subsolo:** encontra-se a casa de máquinas que acomoda os sistemas de resfriamento e retratamento de água da piscina. Local onde se encontra as duas bombas de refrigeração do circuito primário e secundário;
- **Primeiro pavimento:** encontram-se os tubos de irradiação horizontal, canais que disponibilizam os feixes de nêutrons para os experimentos de física nuclear, física da matéria condensada e aplicações comerciais de neutrongrafia;

- **Segundo pavimento:** acomoda a casa de máquinas do sistema de ventilação e ar-condicionado, almoxarifados e sala de apoio da proteção radiológica;
- **Terceiro pavimento:** encontram-se a sala de controle, o saguão da piscina e a oficina mecânica. No interior da piscina localiza-se a placa matriz que acomoda os elementos combustíveis, elementos combustíveis de controle, refletores, dispositivos para irradiação de amostras e os canais para medição da potência do Reator;
- **Quarto pavimento:** localiza-se o sistema de exaustão normal e de emergência do prédio do Reator. A Figura 14 apresenta um corte lateral do prédio do Reator.

Figura 14 - Corte lateral do reator com os pavimentos.

Fonte: MARTINS, 2015.

4.2 Bomba centrífuga

Bomba é uma máquina operatriz hidráulica que transfere energia ao fluido com a finalidade de transportá-lo de um ponto a outro. Recebe energia de um motor ou turbina e cede parte dessa energia potencial ao fluido aumentando pressão, energia cinética ou ambas. A figura 15 representa a classificação dos tipos de bombas (GERNER, 2009).

Figura 15 - Classificação dos tipos de bombas.

Fonte: GERNER, 2009.

Este tipo de bomba apresentada na Figura 16 transfere a energia mecânica para o fluido a ser bombeado em forma de energia cinética. O movimento rotacional de um rotor inserido em uma carcaça, conhecida como voluta é a parte que realiza o deslocamento do fluido no sentido axial para o radial (SILVA, 2003).

Figura 16 - Bomba centrífuga

Fonte: KSB, 2013.

- **Classificação das Bombas Centrífugas**

Os tipos e formas dos rotores da Figura 17 são os mais comuns das bombas centrífugas e podem ser divididas na seguinte classificação:

a) Radiais ou Puras

Quando a direção do fluido bombeado é perpendicular ao eixo de rotação.

b) Fluxo misto ou Semi-axial

Quando a direção do fluido bombeado é inclinada em relação ao eixo de rotação.

c) Fluxo Axial

Quando a direção do fluido bombeado é paralela em relação ao eixo de rotação.

Figura 17 - Tipos e formas dos rotores.

Fonte: SILVA, 2003.

As Bombas centrífugas também são classificadas por sua configuração mecânica geral e apresentam as seguintes características mais importantes:

- **Bomba centrífuga com rotor em balanço**

O rotor ou rotores são montados na extremidade posterior do eixo de acionamento que, por sua vez, é fixado em balanço sobre um suporte de mancais. É subdividido em bombas monobloco, onde o eixo de acionamento da bomba é o próprio eixo do acionador representado na Figura 18 e bombas não monoblocos, onde o eixo de acionamento da bomba é distinto do eixo do acionador representado na Figura 19 (SILVA, 2003).

Figura 18 - Bomba centrífuga com rotor em balanço, simples estágio, monobloco.

Fonte: SILVA, 2003.

Figura 19 - Bomba centrífuga com rotor em balanço, simples estágio, bomba e motor separado.

Fonte: SILVA, 2003.

- **Bomba centrífuga com rotor entre mancais**

Neste grupo de bombas, o rotor ou rotores são montados num eixo apoiado por mancais em ambas as extremidades e os mesmos situam-se entre eles. Este grupo pode ser subdividido em bombas de simples estágio representado na Figura 20 e múltiplos estágios representado na Figura 21.

Figura 20 - Bomba centrífuga com rotor em balanço, simples estágio, bomba e motor separado.

Fonte: SILVA, 2003.

Figura 21 - Bomba centrífuga com rotor entre mancais, multiestágio, bomba e motor separados.

Fonte: SILVA, 2003.

- **Lubrificação**

Existem cuidados adicionais que devem ser considerados. Os intervalos de lubrificação para motores operando na posição vertical são a metade dos valores para um mesmo motor operando na posição horizontal. Portanto, se um motor tem forma construtiva na horizontal, porém está na vertical, o intervalo deve ser considerado como a metade do intervalo da placa (WEG,2017).

Outra situação que reduz o intervalo de relubrificação é a temperatura do rolamento. Os intervalos expressos na placa admitem os rolamentos operando a uma temperatura máxima de 70°C (para rolamentos até 6312 e NU 312) e 85° (para rolamentos 6314 e NU 314 e maiores). Deve-se reduzir o intervalo da placa pela metade para cada 15°C a mais na temperatura do rolamento.

Por exemplo, supondo que o motor da figura anterior tivesse sido projetado para operar na posição horizontal, mas estivesse na vertical:

Intervalo de placa: 9789 h.

Novo intervalo: 4895 h.

Supondo ainda que o mesmo motor operasse a 95°C. Não se atingiu completamente o acréscimo de 15°C, mesmo assim, a WEG recomenda, por segurança que se adote a redução do intervalo pela metade:

Intervalo atual: 4895 h.

Novo intervalo: 2448 h.

Note que os dois efeitos devem ser considerados (posição vertical e temperatura excessiva), caso ocorram ao mesmo tempo.

4.3 Tipos de Manutenção

Para realizar a intervenção de máquinas e equipamentos, necessita-se ter em mãos uma ordem de serviço com o tipo de manutenção que será realizada. Este tipo de manutenção é determinado através de uma matriz de decisão na qual o pessoal de PCM (Planejamento e Controle da Manutenção) realiza em consenso com a equipe de manutenção. Através dessas informações dever-se-á selecionar as ferramentas necessárias e as técnicas apropriadas aos tipos de manutenção que em alguns casos são padronizadas nos procedimentos de trabalho (OLIVEIRA, 2018).

- **Manutenção Corretiva**

É uma manutenção que, geralmente, quando ocorre uma falha pode quebrar o componente e comprometer outros pontos da máquina, equipamento e produção, porém dependendo do contexto operacional vale a pena realizar, porque compensa aguardar a falha onde o custo de troca dos componentes é menor do que realizar uma preventiva ou preditiva com custos mais elevados.

É o tipo de manutenção realizada após a quebra da máquina ou equipamento e nem sempre consegue resolver o problema imediatamente por falta de peças, mão de obra disponível e outros (OLIVEIRA, 2018).

De acordo com a ABNT (1994, p.7) manutenção corretiva é a “Manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida”.

Para KARDEC (2013) a manutenção corretiva é a manutenção que acontece após a ocorrência de uma falha ou redução de desempenho considerado como defeito além disso é uma manutenção de emergência com custo elevado.

Manutenção corretiva é a intervenção para correção da falha ou do desempenho não satisfatório da máquina ou equipamento considerado como defeito (NASCIF, 2013).

- **Manutenção Preventiva**

É considerada uma manutenção de custos elevados porque requer uma periodicidade de inspeções e trocas de componentes, aumentando o homem-hora para atendimento das ordens de serviços, porém necessário para garantir a confiabilidade do ativo e atendimento a produção.

É o tipo de manutenção realizada conforme recomendações dos fabricantes de máquinas e equipamentos. Apresenta uma periodicidade de atividades para garantir a disponibilidade do ativo, porém deve acontecer independentemente se o componente ou produto que será trocado na máquina estiver ainda em condições de uso (OLIVEIRA, 2018).

De acordo com a ABNT (1994, p.7) é a “Manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item”.

Manutenção preventiva é a intervenção realizada para reduzir ou impedir as falhas e defeitos de acordo com o plano de manutenção baseado em recomendações do próprio fabricante ou histórico da máquina e equipamento (NASCIF, 2013).

- **Manutenção Preditiva**

Considerada uma das manutenções mais precisas por conseguir os resultados de diversas variáveis que uma máquina pode apresentar, dando um retorno preciso do que realmente necessita trocar economizando gastos com manutenção preventiva.

É o tipo de manutenção utilizada nas máquinas e equipamentos que são vitais para o processo, ou seja, caso essas máquinas e equipamentos venham a parar o impacto será muito grande podendo prejudicar principalmente a produção, meio-ambiente e outros. É uma manutenção que exige o monitoramento constante, porém consegue identificar o momento certo de troca dos componentes conhecido como ponto preditivo (OLIVEIRA, 2018).

De acordo com a ABNT (1994, p.7) manutenção preditiva é a “Manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva”.

Para VERRI (2007) é uma intervenção realizada em equipamento ou sistema, no momento que uma ou mais variáveis de temperatura, vibração, corrente elétrica, pressão e outras, apresentam variações diferentes dos parâmetros preestabelecidos durante o monitoramento.

Manutenção preditiva são atividades de acompanhamento constante das máquinas e equipamentos para coleta de dados e análise identificando o momento certo de troca do componente, aproveitando o seu desempenho máximo (VIANA, 2002).

De acordo com GOGARTY (2020), a manutenção preditiva é construída sobre uma base sólida de monitoramento de condições. O monitoramento de condições utiliza sensores e dispositivos para coletar informações sobre as máquinas e fornecer indicadores que identificam quando o equipamento realmente precisa de manutenção. Opera em tempo real, gerando informações atualizadas sobre o status e as operações do equipamento, informadas por avaliação regular ou contínua e detecção de anomalias.

Para GASPAR (2020, p. 28 apud Norma europeia, EN13306:2017), a manutenção preditiva baseia-se na condição dos equipamentos e é realizada de acordo com a previsão obtida pela análise repetitiva dos parâmetros de funcionamento dos equipamentos.

4.4 Alinhamento de corpos rotativos

O alinhamento do eixo é o processo pelo qual duas ou mais máquinas (normalmente um motor e uma bomba) são posicionadas de tal forma que no ponto de transferência de energia de um eixo para outro, os eixos de rotação de ambos os eixos devem ser colineares (Figura 22) quando a máquina estiver funcionando em condições normais (LUDECA, 2002).

Figura 22 - Eixos colineares

Fonte: LUDECA, 2002.

A Figura 23 ilustra o que acontecerá com o maquinário em funcionamento quando este estiver sujeito a condições de desalinhamento moderadas a severas, ou seja os eixos não colineares. Quando dois eixos são submetidos a uma pequena condição de desalinhamento (0,05 a 0,127 mm), o acoplamento que conecta esses dois eixos juntos flui internamente para aceitar a condição de desalinhamento. À medida que os eixos giram, as partes internas do acoplamento têm que se mover continuamente, ou dobrar em uma direção, em seguida, a outra ou esticar e depois comprimir. Se o movimento cíclico, flexão ou distorção não for grave, o acoplamento pode sobreviver por algum tempo (PIOTROWSKI, 2006).

Figura 23 - Problemas causados pelo desalinhamento do eixo: Distorção do eixo.

Fonte: PIOTROWSKI, 2006.

Com a distorção do eixo o rotor fica desigual dentro da voluta, ocorre fadiga cíclica nos componentes do rotor, forças axiais e radiais excessivas são transmitidas para os rolamentos e a parte rotativa da vedação mecânica não consegue realizar um movimento concêntrico com a sede de vedação estacionária.

Sob condições normais de operação a condição de alinhamento pode mudar quando a máquina está funcionando. Isto pode ser por uma série de razões, incluindo a dilatação térmica apresentado na Figura 24, tensão da tubulação, torque da máquina, movimento da fundação e folga do rolamento. Como o alinhamento do eixo é realizado com as máquinas frias, a condição de alinhamento medida não é necessariamente a condição de alinhamento zero das máquinas, por isso alguns alinhadores de eixos por laser possuem coeficientes de dilatação térmica para compensação durante o funcionamento (LUDECA, 2002).

Figura 24 - Efeito da dilatação térmica.

Fonte: LUDECA, 2002.

De acordo com OLIVEIRA (2018), um alinhamento realizado corretamente pode reduzir as vibrações das máquinas em até 85%, a temperatura dos mancais 45%, a temperatura no acoplamento 30% e a corrente elétrica uma redução de aproximadamente 20%.

- **Parâmetros de alinhamento**

Como o alinhamento do eixo precisa ser medido e posteriormente corrigido, um método de quantificação e descrição da condição de alinhamento é necessário (Figura 25).

Figura 25 - Desalinhamento desconhecido

Fonte: LUDECA, 2002.

Uma abordagem mais moderna e de fácil compreensão é descrever a condição de alinhamento da máquina em termos de angularidade e deslocamento na horizontal (vista superior) e vertical (vista lateral). Usando esse método, quatro valores podem ser usados para expressar a condição de alinhamento, conforme mostrado na imagem da Figura 26.

Figura 26 - Condições do desalinhamento.

Vista Lateral – Vertical

Vista Superior - Horizontal

Fonte: LUDECA, 2002.

- **Medição e correção do pé manco.**

Um item essencial realizado em qualquer procedimento de alinhamento bem-sucedido é a determinação e correção do pé manco. Uma montagem de máquina instável causa irregularidades no alinhamento. A máquina fica diferente sempre que um alinhamento é realizado e cada conjunto de medições de verificação indica que a máquina ainda está desalinhada. Além disso, quando a máquina é aparafusada, a tensão é colocada na carcaça da máquina e nas caixas de mancais. Essencialmente, existem dois tipos de pé manco, representado na Figura 27.

Figura 27 - Tipos de pé manco.

Fonte: PRUFTECHNIK, 2012.

Pé manco paralelo indica que a placa de base e o pé da máquina estão paralelos entre si, permitindo a correção simplesmente adicionando calços da espessura correta. Pé manco angular é causado pelos pés da máquina formando um ângulo entre si. Essa situação é mais complexa para diagnosticar e corrigir, uma solução é usar calços finos para preencher o espaço angular entre a placa de base e o pé, uma solução mais drástica, mas de longo prazo, é remover a máquina e retificar os pés da máquina (PRUFTECHNIK, 2012).

Para KOVACEVIC (2017) os problemas de suportes mal usinados, sujeira ou tinta sob os pés ou suportes, chumbadores torcidos, corrosão na base ou pé do

equipamento, tensão na tubulação e quantidade excessiva de calços (mais de 3) que podem criar um efeito de mola podendo causar muitos problemas, não apenas dificultando o alinhamento. O pé manco é frequentemente uma das principais causas do desalinhamento e pode causar alterações no dimensional do alojamento dos rolamentos, tensão no acoplamento, distorção no selo mecânico, empenamento do eixo e aumento de carga radial nos rolamentos.

LAWRENCE (2011) comenta que no alinhamento de máquinas, os efeitos do pé manco são prejudiciais. O pé manco irá distorcer e estressar a estrutura da máquina, levando a problemas. As linhas de centro de rotação nos eixos não serão colineares, levando a problemas com o desgaste do acoplamento, rotor desbalanceado, problemas de ajuste e folga do rolamento e vedações. Desde que os lasers foram introduzidos, eles tornaram a medição do desalinhamento mais rápida e fácil.

De acordo com a American Petroleum Institute (2009) a verificação do pé manco deve ser realizada com a tubulação desconectada do corpo do equipamento. Uma verificação do pé manco deve ser feita durante o alinhamento final em cada pé do equipamento. O deslocamento permitido é de no máximo 0,05 milímetros em cada pé, pois acima deste valor é considerado que o equipamento está com pé manco.

Um problema comum negligenciado durante o alinhamento é a presença de um pé manco, onde a máquina não está apoiada de maneira uniforme na base. Isso pode torcer a estrutura da máquina, colocando uma carga inesperada nos rolamentos e, finalmente, causando a fratura da carcaça. O pé manco pode ser identificado montando um suporte com um relógio comparador em um eixo e colocando a ponta do relógio apoiada no segundo eixo, com todos os parafusos de fixação levemente apertados. Em seguida, aperta-se totalmente os parafusos da máquina móvel afrouxando-os um de cada vez, identificando ou não a variação. Qualquer movimento excessivo no indicador significa a presença de um pé manco, que exigirá que o usuário final encaixe calços nos pés da máquina antes de iniciar o alinhamento. Os alinhadores de eixos por laser contêm um programa que pode verificar se a máquina móvel está com pé manco sem passar por este procedimento manual de montagem com relógio (CARLISLE, 2012).

- **Periodicidade do alinhamento.**

Aqui estão algumas diretrizes recomendadas. Para máquinas recém-instaladas, o alinhamento deve ser verificado entre 500 e 2000 h de operação intermitente ou 1 a 3 meses de operação contínua. Se não houver mudança aparente na posição de alinhamento, a próxima verificação deve ser feita entre 4500 e 9000 h de operação intermitente ou 6 meses a 1 ano de operação contínua. Se nenhuma mudança aparente ocorreu durante esse período de tempo, as verificações devem ser feitas a cada 2 ou 3 anos.

Se uma mudança moderada no alinhamento ocorreu a qualquer momento, o equipamento deve estar alinhado dentro de tolerâncias aceitáveis. Se ocorrer uma mudança radical, uma investigação adicional deve ser conduzida para determinar o que está causando a mudança. As causas mais comuns de mudanças de alinhamento podem ser rastreadas até fundações instáveis ou placas de base, tensão de tubulação (estresses estático e operacional) e movimento de maquinário inconsistente. Esses problemas não são fáceis de encontrar e são difíceis de corrigir. Todo o esforço gasto na obtenção de máquinas rotativas dentro de tolerâncias de alinhamento aceitáveis é inútil se a máquina não puder manter sua posição por longos períodos de tempo (PIOTROWSKI, 2006).

4.5 Técnicas de alinhamento de corpos rotativos.

O alinhamento de corpos rotativos depende significativamente da preparação e planejamento do alinhamento. O alinhamento adequado realizado nas máquinas e equipamentos reduz as falhas dos componentes, diminuindo tempos de inatividade desnecessários, custos e tempo excessivo de reparo para manutenção. A preparação completa e a escolha de uma técnica de alinhamento apropriada podem ajudar a garantir um processo sem retrabalhos (CARLISLE, 2012).

As razões não são sempre óbvias, mas na era moderna a necessidade de alinhamento é do conhecimento geral. O alinhamento é uma parte vital da manutenção diária de máquinas e equipamentos otimizada nos dias de hoje. As máquinas têm que estar continuamente alinhadas com o mínimo de interrupções (FIXTURLASER, 2019).

Uma avaria numa máquina causa perdas de produção devastadoras. Quase 50% de todas as avarias de máquinas se devem a desalinhamento.

O alinhamento de eixos pode ser feito com diferentes ferramentas. A forma mais fácil é utilizar uma régua ou um calço reto por cima das duas metades do acoplamento e alinhar visualmente. O resultado não é muito exato e muito dependente do operador. Pode ser obtido um resultado melhor com relógios comparadores. Um operador competente e experiente pode obter medições boas e confiáveis, mas requer tempo e paciência.

Uma maneira bem mais fácil e muito exata é utilizar sistemas de alinhamento por laser que necessitam de um treinamento básico e fornecem resultados exatos e confiáveis.

Método 1 – Método Radial e Axial

O método de radial e axial é o mais antigo e mais utilizado método de relógio comparador. A Figura 28 ilustra a configuração correta para esse método, o que é bom para acoplamento de diâmetro grande com uma curta distância entre as extremidades do eixo.

Figura 28 – Método radial e axial.

Fonte: CARLISLE, 2012.

Vantagens:

- Só precisa girar um eixo para realizar as leituras.
- A visualização das posições do eixo é mais fácil em comparação com outros métodos.

Desvantagens:

- É difícil obter as leituras dos relógios se houver qualquer flutuação axial.
- É mais complicado fazer os cálculos gráficos em comparação com outros métodos.
- Qualquer irregularidade no acoplamento ou eixo afetará as leituras.

Método 2 - Método Reverso

O método reverso está se tornando cada vez mais popular e é o método ideal para a maioria dos alinhamentos. A Figura 29 ilustra a configuração correta para este método.

Figura 29 - Método reverso.

Fonte: CARLISLE, 2012.

Vantagens:

- Geralmente é mais preciso que o método radial e axial.
- A folga axial não afeta as leituras.
- É mais fácil traçar graficamente em comparação com outros métodos.
- É possível fazer medições com o acoplamento no lugar.

Desvantagens:

- Necessita girar os dois eixos.
- Não é preciso para eixos acoplados.

Método 3 – Método por laser

O método de alinhamento mais moderno é o por laser que está representado na Figura 30. Este sistema consiste em duas unidades de laser onde ocorre a detecção e emissão do laser. Em cada eixo é fixado uma unidade por meio de uma abraçadeira e a comunicação é realizada através dos cabos que são conectados entre a unidade e um teclado com mostrador digital. A comunicação pode ser realizada por um cabo ou sistema sem fio Bluetooth. O sistema opera detectando o movimento dos feixes de laser como uma medida do desalinhamento.

Figura 30 – Método de alinhamento por laser.

Fonte: CARLISLE, 2012.

Vantagens:

- O sistema se adapta a uma variedade de eixos.
- Não necessita remover o acoplamento .
- Medições por longos períodos sem problemas de fadiga.
- Não é afetado pelo deslocamento axial.
- O sistema detecta facilmente a condição do pé manco.

Desvantagens:

- O sistema não é adequado para acoplamentos com folga.
- Calor ou vapor podem afetar sua precisão.
- O sistema tem um custo elevado.

De acordo com BECKER (2010), quando são utilizados métodos modernos de medição a laser, é possível obter um alinhamento quase perfeito do eixo com o sistema parado. No entanto, não é desejável alinhar com valores de deslocamentos iguais a zero, pois ambos os equipamentos devem estar desalinhados enquanto estão parados, para que o alinhamento ideal do eixo seja obtido durante a operação. Este tipo de alinhamento ocorre quando o coeficiente de dilatação térmica dos equipamentos que serão alinhados for diferente. Alguns modelos de alinhadores por laser não possuem a função de compensação térmica, portanto o cálculo deverá ser realizado manualmente para fazer o ajuste necessário.

4.6 Monitoramento de máquinas e equipamentos

De acordo com KARDEC (2014) o monitoramento permite estimar com mais certeza o momento certo de realizar uma intervenção com o tempo de reparo menor comparado com uma máquina sem monitoramento. Em relação ao custo uma manutenção corretiva pode custar no mínimo duas vezes ou mais que uma manutenção preditiva.

- **Vibrações mecânicas**

As vibrações mecânicas medidas externamente nas máquinas operacionais contêm muitas informações sobre suas condições, pois as máquinas em condições normais possuem uma característica conhecida como "assinatura de vibração", enquanto a maioria das falhas altera essa assinatura de uma maneira bem definida. Assim, a análise de vibração é uma maneira de obter informações do interior das máquinas operacionais sem a necessidade de realizar uma parada. Além disso consegue-se realizar uma intervenção para manutenção no momento certo (RANDALL 2002).

Os elementos que compõem as máquinas, em geral, interagem entre si e, devido à presença de atrito, ação de forças cíclicas dissipa energia na forma de calor, ruído e vibrações. Um bom projeto deve apresentar bom rendimento, ou seja, baixo nível de dissipação de calor, baixo nível de ruído e baixo nível de vibração. Com o desgaste, acomodação de fundações, má utilização, falta de manutenção etc., os rendimentos das máquinas caem. Com isso as máquinas têm suas propriedades dinâmicas alteradas, e assim os eixos tornam-se desalinhados, partes começam a se desgastar, os rotores tornam-se desbalanceados, as folgas aumentam entre outros problemas. Todos esses fatores são refletidos na diminuição de rendimento e consequentemente, no aumento do nível de vibração. Essas vibrações são dissipadas pela estrutura da máquina e no seu caminho, excitam ressonâncias e provocam esforços adicionais nos mancais (TEKNIKAO, 2020).

Os sinais de vibração são captados através de sensores denominados transdutores e a posição onde o sensor está fixado, e o nível de vibração neste ponto

podem informar o modo de vibrar de uma máquina, e os esforços que estão atuando (Figura 31).

Figura 31 - Posição do sensor.

<p>Horizontal</p> <p>O nível de vibração no sentido horizontal em geral é o mais alto, pois é o sentido em que as máquinas têm maior liberdade de movimento.</p>	<p>Acelerômetro posição horizontal</p>
<p>Vertical</p> <p>Se o nível de vibração no sentido vertical for maior que no sentido horizontal, geralmente é um problema de fixação.</p>	<p>Acelerômetro posição vertical</p>
<p>Axial</p> <p>Se houver nível de vibração alto no sentido axial, pode estar ocorrendo desalinhamento.</p>	<p>Acelerômetro posição axial</p>

Fonte: TEKNIKAO, 2020.

- **Vibração de nível global**

O medidor de vibração de nível global é um instrumento capaz de medir o valor global de vibração (pico ou RMS), em uma extensa faixa de frequência, que depende das normas e padrões aplicáveis. Pelo seu funcionamento, este instrumento mede a vibração total resultante da ação de todas as frequências presentes no sinal de vibração, dentro da faixa considerada. As medições são comparadas com padrões gerais (Normas) ou valores de referências estabelecidos para cada máquina. A condição da máquina é assim avaliada no campo, com os dados básicos para uma tomada de decisão (TEKNIKAO, 2020).

O medidor de vibração de nível global é um instrumento com grande capacidade de detecção de mau funcionamento de máquinas, porém possui capacidade limitada para a identificação e diagnóstico, tarefas estas que devem ser realizadas por analisadores por Transformada de Fourier. (TEKNIKAO, 2020)

- **Vibração on-line**

Nas máquinas ou equipamentos considerados críticos, o monitoramento on-line de vibração constitui um papel importante na eficiência do controle de gestão do ativo. O monitoramento on-line é empregado principalmente para dar avisos imediatos de uma alteração repentina na condição de máquinas de custos elevados e não duplicadas, cuja continuidade de operação é vital para o processo de produção. As falhas são detectadas imediatamente, ou dentro de minutos da ocorrência e dispara um alerta ou um sinal de alarme na sala de controle da planta, tal que medidas apropriadas possam ser tomadas antes que falhas ocorram (TEKNIKAO, 2020).

Esses sistemas são largamente empregados em indústrias de geração de energia, petroquímica e usinas nucleares, em turbinas, bombas de alimentação de caldeiras, compressores de gás, bombas de refrigeração do núcleo de reatores, etc.

Um requisito principal de todos os sistemas de monitoramento on-line é a confiança operacional extremamente alta, a estabilidade e imunidade a condições ambientais adversas e irregulares que podem causar falsos alarmes (TEKNIKAO, 2020).

- **Temperatura**

De acordo com KARDEC (2013) a temperatura é um dos parâmetros de mais fácil compreensão e o acompanhamento da sua variação permite observar alterações no comportamento dos equipamentos, componentes, estruturas e do próprio processo. O monitoramento da temperatura de mancais das máquinas rotativas, superfície de equipamentos estacionários, barramentos elétricos e equipamentos

elétricos de modo geral são primordiais, e além de ser um método preditivo, permite localizar e acompanhar defeitos no seu estágio inicial.

Para SPHERIC (2020) monitorar e regular a temperatura são processos de extrema importância em várias aplicações industriais, que visam garantir a segurança, qualidade dos produtos e a manutenção preditiva. A medição pode ser realizada a distância ou por contato que garante maior confiabilidade dos resultados.

• Corrente Elétrica

O controle dos gastos na indústria é essencial para identificar quais são os ambientes que necessitam economizar, ou que necessitam de investimentos para melhores condições de trabalho. A energia elétrica por ser um dos recursos mais impactantes em termos financeiros, requer um monitoramento onde algumas medições destacam-se:

- Informações sobre o consumo de energia do local, por área e tempo, identificando picos de consumo elétrico;
- Controle e previsão desse consumo e dados sobre os níveis de eficiência energética, ou seja, uso consciente;
- Dispersão da energia, causadora de desperdícios, entre outros fatores.

A medição de energia elétrica pode ser realizada através de equipamentos (analógico ou digital) capaz de mensurar o consumo da energia, corrente elétrica e tensão elétrica, fornecendo um relatório que facilitará a tomada de decisão durante as intervenções (SMI, 2020).

4.7 Indicadores de Manutenção

Na área da manutenção existem vários tipos de indicadores que servem para medir o trabalho e a evolução do setor de manutenção. Sem eles as tomadas de decisões sobre qual máquina investir esforços seriam muito comprometidos. No geral, todos os indicadores existentes, já são a muito tempo utilizados no mundo. Grande parte desses indicadores surgiram na Inglaterra, EUA e França. Por esse motivo a sigla apresenta a versão em inglês e a versão traduzida, que são igualmente aceitas e compreendidas na área de manutenção. Os indicadores MTBF e MTTR que aqui serão apresentados são considerados básicos na área de manutenção. São largamente utilizados pelas empresas que querem acender no controle total de seus ativos e aprimorar cada vez mais as técnicas de gerenciamento. Da mesma forma a Disponibilidade seria um indicador, pois é obtido pela relação entre os dois indicadores acima citados (LI, 2016).

Os Key Performance Indicators ou, no português, Indicadores Chave de Desempenho, são indicadores que podem evidenciar diferentes desempenhos, desde tempos de máquinas paradas, disponibilidade dos equipamentos, custos de manutenção e muitos outros. De uma maneira sucinta, eles servem para apontar o que está dando certo e o que deve ser melhorado na atividade mensurada. De forma geral, é um indicador a ser usado em equipamentos críticos ou num conjunto de ativos (Dynamox 2018).

MTBF (Mean Time Between Failures) é uma sigla que nos países de língua inglesa significa Tempo Médio Entre Falhas. Aqui no Brasil podemos encontrar a sigla em inglês e a sigla em português (TMEF), as duas formas são muito comuns embora a primeira seja mais utilizada. MTBF é a média aritmética dos tempos existentes entre o momento de uma falha (quebra) e início de outra (a próxima falha) em equipamentos reparáveis (LI, 2016).

Veja a fórmula (4.1):

$$MTBF = \frac{TO - TR}{NR} \quad (4.1)$$

- MTBF (TMEF)= Tempo Médio entre Falhas
- TO= Tempo de Operação
- TR= Tempo de Reparo (Somente Corretiva)
- NR= Número de Reparos

O MTTR (Mean Time To Repair) é a média aritmética dos tempos de reparo de um sistema, de um equipamento ou de um item. Nos países de língua portuguesa a sigla é conhecida como Tmpr, Tempo Médio Para o Reparo (LI, 2016).

Veja a fórmula (4.2):

$$MTTR = \frac{TR}{NR} \quad (4.2)$$

- MTTR (Tmpr) = Tempo Médio para Reparo
- TR= Tempo de Reparo (Somente Corretiva)
- NR= Número de Reparos

A facilidade de um equipamento ser mantido está relacionada com a manutenabilidade. Isso pode e deve ser verificado principalmente no projeto da planta ou de acréscimos e ampliações. Contudo, a melhoria da manutenabilidade deve ser uma preocupação permanente pois impacta o tempo médio para reparo, reduzindo-o. O MTTR é um índice que atinge diretamente a Disponibilidade da máquina, por isso ele é muito importante e é a ele que temos que dar uma pouco mais de atenção (LI, 2016).

Veja a fórmula (4.3):

$$DISP. = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100 \quad (4.3)$$

- DISP. = Disponibilidade em %.
- MTBF= Tempo Médio entre Falhas.
- MTTR= Tempo Médio para Reparo.

Para STAHNKE (2015), a disponibilidade das máquinas e equipamentos deixou de ser uma escolha para se tornar um fator de sobrevivência, por isso o controle de desempenho da manutenção é de fundamental importância.

De acordo com BRANCO FILHO (2016) os indicadores de desempenho indicam ou medem como está nosso desempenho na execução de nossas tarefas, no cumprimento de compromissos que é assumido. Indicam como está sendo executada a tarefa proposta. De nada adianta desenvolver padrões para execução de tarefas, os Procedimentos de Manutenção, Procedimentos de Operação ou Instruções de Manutenção, se não compararmos o desempenho da equipe quanto ao uso e aderência aquele padrão.

- **Confiabilidade**

Além dos indicadores MTBF, MTTR e Disponibilidade citados anteriormente, temos ainda o indicador de Confiabilidade que também é considerado um indicador de classe mundial conhecido como WCM (World Class Maintenance). De acordo com a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR-5462, confiabilidade é a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo. Nota: O termo “confiabilidade” é usado como uma medida de desempenho de confiabilidade (TELES, 2020).

A confiabilidade é um cálculo probabilístico. Com base no histórico de falhas de um determinado equipamento, projeta-se um cenário futuro. Para medir a confiabilidade, consideram-se as seguintes informações:

- MTBF – Tempo Médio entre Falhas dos Equipamentos
- Taxa de Falhas dos equipamentos
- Saber previamente qual é o período que queremos projetar o cenário para o cálculo de confiabilidade.

Veja a fórmula (4.4):

$$\lambda(t) = \frac{1}{MTBF}$$

$$R(t) = e^{-\lambda(t)} \quad (4.4)$$

Onde:

R = Reliability (Confiabilidade)

λ = Taxa de Falhas

T = Tempo para projeção

e = logaritmo neperiano

- **Produtividade**

De acordo com TELES (2020) a Produtividade na Manutenção Industrial é importante para as estratégias que serão desenvolvidas e as questões operacionais onde envolve o planejamento, administração, gerência, e economia, os quais são cruciais para o sucesso de bons resultados e dimensionamento correto de recursos técnicos, humanos e materiais. Atualmente se a produtividade for de 12% a 25% é considerado um ambiente improdutivo, acima de 30% ambientes produtivos e acima de 72% considera-se um indicador de classe mundial World Class Maintenance.

Para NASCIF, 2020 o resultado medição da produtividade pode ser enganado para não sair prejudicado, mas deve estar em primeiro lugar porque está ligado as melhorias dos procedimentos de trabalho. Para calcular a produtividade, utiliza-se a seguinte fórmula (4.5):

$$\text{Produtividade} = \frac{\text{horas efetivamente trabalhadas}}{\text{jornada de trabalho}} \times 100(\%) \quad (4.5)$$

5 METODOLOGIA

Neste capítulo, as coletas de dados referem-se a um regime de operação das bombas de 2012 a 2019 com aproximadamente 64 horas semanais, porém a partir de abril de 2015 ocorreu a mudança de regime de operação para 24 horas semanais.

5.1 Primeira Etapa: Coleta de dados de vibração

O conjunto motobomba do reator é monitorado através de seis sensores de vibração fixados nos pontos vitais do equipamento com as seguintes identificações: (Figura 32)

Figura 32 - Identificação dos sensores.

Fonte: LEITE, 2017 e Própria do Autor

- Ponto1: A1 (carcaça do motor-radial) – MMEP.VR.B – Monitoramento do mancal de rolamento do motor no lado acoplado na posição radial.
- Ponto2: A2 (carcaça do motor-axial) – MMEP.VX.B – Monitoramento do mancal de rolamento do motor no lado acoplado na posição axial.

- Ponto3: A3 (mancal do volante-motor) – MGMP.VR.B – Monitoramento do mancal de rolamento do volante de inércia no lado do motor na posição radial.
- Ponto4: A4 (mancal do volante-bomba) – MGBP.VR.B – Monitoramento do mancal de rolamento do volante de inércia no lado da bomba na posição radial.
- Ponto5: A5 (mancal da bomba-radial) – MBP.VR.B – Monitoramento do mancal de rolamento da bomba no lado acoplado na posição radial.
- Ponto6: A6 (mancal da bomba-axial) – MBP.VX.B – Monitoramento do mancal de rolamento da bomba no lado oposto ao acoplado na posição axial.

A Figura 33 demonstra a fixação dos sensores em uma base plana representando a posição horizontal e axial no mancal LA (Lado Acoplado) do motor elétrico e vertical e horizontal no mancal LA (Lado Acoplado) do volante de inércia e a Figura 34 posição vertical do LA (Lado Acoplado) da bomba e volante de inércia e axial da bomba LOA (Lado Oposto ao Acoplado).

Figura 33 - Posição dos sensores do motor e volante de inércia.

Fonte: Própria do Autor

Figura 34 - Posição dos sensores da bomba.

Fonte: Própria do Autor

Os sensores de vibração são interligados até a sala de controle. Através de um painel ficam disponíveis conectores, onde um coletor de dados de vibração externo pode ser conectado para capturar os sinais de vibração. A tela do próprio coletor de dados realiza-se uma análise conhecida com off-line (Figura 35).

Figura 35 - Painel com conectores para medição de vibração.

Fonte: Própria do autor

Para realizar uma análise mais criteriosa é utilizado o monitoramento on-line em software específico que são instalados em diversos computadores que ficam ligados

gravando os eventos durante o regime de operação do reator. Atualmente o controle de vibração é realizado através dos dados gerados pelo sistema COMPASS Monitoring System da Bruel&Kjaer Vibro, que pode ser acessado na sala de controle ou nas salas dos técnicos responsáveis pela manutenção (Figura 36).

Figura 36 – Sistema COMPASS

Fonte: Própria do autor

A coleta dos dados de vibrações do sistema é registrada no relatório de inspeção mensal (formulário FM-CRO-1003-21 V2), onde apresentam os valores de nível global. O relatório de inspeção preenchido tem as seguintes características:

- SISTEMA: de Vibração
- Tipo de Avaliação: Verificação
- Periodicidade: Mensal
- IT/PO: PO-CRO-1003
- Especificação técnica: 17.5.3.1
- Objetivo: Assegurar que as bombas do circuito primário estejam operando com os eixos alinhados e rolamentos em bom estado.

- Condições Necessárias /Cuidados Especiais: Reator deve estar ligado
- CrITÉrios de Avaliação:
 - Se RMSv medido for maior que duas vezes seu nível de referência: efetuar análise mais detalhada e manter o mancal sob observação; pode ser necessária manutenção corretiva.
 - Se RMSv medido for maior que três vezes e meia seu nível de referência: condição NS; recomenda-se parada para ação corretiva.
- Análise:
- Conclusão:
- Avaliador (es):
- Disposição:

Para avaliação dos resultados utiliza-se os níveis de referências de acordo com a Tabela 2, onde os valores de referências das bombas A e B são diferentes.

Tabela 2 - Valores de referência de vibração

Níveis de referência para o RMSv (mm /s)		
Ponto	Bomba – B101A	Bomba – B101B
A1	1,00	1,35
A2	0,90	0,90
A3	0,25	0,50
A4	0,50	0,40
A5	1,60	1,40
A6	1,50	1,20

Fonte: Própria do autor

OBS: Se algum requisito de especificação técnica não é atendido, o Chefe de Instalação ou Supervisor de Operação deve ser comunicado para tomar as

providências previstas nas especificações técnicas. Os registros pertinentes devem ser gerados.

Os dados de vibrações de cada sensor das bombas A e B foram extraídos dos relatórios de inspeção mensal de 2012 a 2019, tabulados e calculado a média aritmética anual para serem utilizadas na plotagem dos gráficos (APÊNDICE A).

5.2 Segunda Etapa: Coleta de dados das O.S's (Manutenção Corretiva)

As Ordens de Serviços das manutenções corretivas e preventivas são realizadas em um sistema, representado na Figura 37. Para o estudo foi consultado no setor de manutenção do reator apenas os dados dos relatórios de manutenções corretivas RMC que estão registradas no **APÊNDICE B**.

Figura 37 – Sistema de manutenção.

Fonte: MARTINS, 2015

Foram extraídos os valores anuais das horas de trabalhos das bombas, horas de manutenções corretivas realizadas e quantidades de intervenções corretivas. Através dos dados foram calculados o **MTBF** representando o intervalo de ocorrência entre as manutenções corretivas, o **MTTR** com o tempo médio de manutenção das intervenções corretivas realizadas nas motobomba A e B, a **DISPONIBILIDADE** indicando o tempo em que as motobombas estavam disponíveis para uso, **CONFIABILIDADE** representando a probabilidade de funcionamento para os próximos meses levando em consideração o histórico das manutenções que já foram

realizadas e **PRODUTIVIDADE** que demonstra se existe um equilíbrio no uso dos equipamentos (**APÊNDICE C**).

5.3 Terceira Etapa: Coleta de dados de corrente elétrica

A tensão utilizada para energizar o motor elétrico da bomba de refrigeração do circuito primário é de 440V trifásico e semestralmente são coletadas as tensões e correntes elétrica de cada fase. Os dados são registrados em formulário e armazenados em pastas arquivo. Foram coletados os dados de corrente e tensão elétrica do período de 2012 a 2019 e estão apresentados no **APÊNDICE D**.

Os dados do consumo em kWh foram retirados do Sistema de Informação de Energia Analo, onde um software supervisor dedicado à gestão em tempo real do uso de energia elétrica em unidades consumidoras de médio e grande porte apresentados no **APÊNDICE E**.

O valor mensal registrado pelo sistema corresponde ao consumo total do reator. Aproximadamente 60% corresponde aos dias de operação do reator para irradiação e pesquisas, ou seja, o tempo em que uma das motobombas está ligada. O restante é consumido em testes e sistemas de segurança que ficam ligados permanentemente.

Com os valores do consumo em kWh foi calculado o custo estimado para o funcionamento da refrigeração do circuito primário, considerando a situação real do conjunto motobomba e a economia estimada caso fosse realizado o alinhamento do conjunto conforme desalinhamento encontrado **APÊNDICE F**.

5.4 Quarta Etapa: Alinhamento por laser no conjunto motobomba

Para identificar a condição do alinhamento de eixos foi realizado uma verificação com o alinhador de corpos rotativos por laser, apenas no conjunto motobomba B101A, pois o B101B estava desativado por ter apresentado uma falha. O alinhador utilizado foi o FIXTURLASER NXA Pro que está equipado com um giroscópio e possui um monitor para digitação dos dados de entrada e acompanhamento da condição da máquina (Figura 38).

Figura 38 - Monitor do alinhador a laser

Fonte: Própria do autor

O conjunto possui um volante de inércia onde está interligado com dois acoplamentos conectados ao motor elétrico/volante de inércia (Figura 39) e bomba centrífuga/volante de inércia (Figura 40), portanto foi realizada uma leitura no modo trem de máquinas para identificar no mesmo relatório os dois pontos de alinhamento. Como o local é de difícil acesso, foi realizado também uma leitura individual nos dois pontos de acoplamento para verificar a condição do equipamento.

Figura 39 - Motor elétrico e volante de inércia

Fonte: Própria do autor

Figura 40 - Bomba centrífuga e volante de inércia

Fonte: Própria do autor

Para fazer a coleta de dados do alinhamento foi necessário realizar algumas medições como distância entre sensores da máquina fixa e móvel, distância entre os pés do motor elétrico entre outras (Figura 41).

Figura 41 - Medição para coleta de dados

Fonte: Própria do autor

Os valores das medições foram inseridos em um monitor transrefletivo com ícones e símbolos que orientam as etapas do alinhamento (Figuras 42 e 43). A interface de utilizador adaptativo orienta-o através dos processos de medição e alinhamento.

O Fixturlaser está equipado com um giroscópio e pode por isso adaptar a visualização do menu do mesmo lado em que o utilizador está posicionado. Possui a função Omniview, ou seja, o sistema sabe onde está em relação à máquina.

Figura 42 - Digitação dos dados

Fonte: Própria do autor

Figura 43 - Seleção dos símbolos

Fonte: Própria do autor

Para verificar a condição da máquina foram movimentados os eixos e efetuadas leituras nas posições verticais e horizontais (Figuras 44 e 45).

Figura 44 - Posição Vertical

Fonte: Própria do autor

Figura 45 - Posição Horizontal

Fonte: Própria do autor

6 RESULTADOS

Este capítulo apresenta as análises dos resultados obtidos nos relatórios de inspeções mensais, softwares de monitoramento e cálculos de indicadores. Para isso foi dividido nas seguintes etapas:

Primeira etapa: através dos relatórios de inspeções mensais de 2012 a 2019, foram coletados os dados de vibração dos seis pontos de medição, plotando em um gráfico, analisando através de uma curva de tendência e identificando os pontos mais críticos.

Segunda etapa: no software de manutenção corretiva foram coletados os dados das ordens de serviços de manutenção corretiva e com isso foi possível calcular os indicadores de manutenção de classe mundial MTBF, MTTR, DISPONIBILIDADE, CONFIABILIDADE e PRODUTIVIDADE.

Terceira etapa: os dados de corrente elétrica coletados através do software de monitoramento foram utilizados para calcular os valores de consumo anual do conjunto motobomba e estimar o custo do desperdício de energia elétrica com o desalinhamento encontrado.

Quarta etapa: com a realização do alinhamento de eixos por laser e a análise dos dados coletados durante o alinhamento foram identificados os pontos mais críticos do conjunto motobomba e uma falha de projeto.

6.1 Primeira Etapa: Análise de dados de vibração das bombas do circuito primário

Os dados de vibração dos seis sensores identificados de A1 a A6 foram tabulados (**APÊNDICE A**) e plotados em gráficos representando a tendência do funcionamento de cada ponto monitorado. Com estes indicadores foi possível identificar os pontos mais críticos do sistema e as tendências de falhas para futuras tomadas de decisões das bombas A e B (Figura 46).

Figura 46 - Pontos de coleta

Fonte: LEITE, 2017.

De acordo com as Figuras 47 e 48 em 2012 foi identificado um comportamento irregular da bomba B nos sensores A1 e A2 com um aumento severo de mais de 50% dos níveis de vibração em relação ao ano de 2012 da Bomba A.

Figura 47 - Gráfico do sensor A1

Fonte: Própria do autor.

Figura 48 - Gráfico do sensor A2

Fonte: Própria do autor.

No sensor A3 da bomba B existe um problema característico de uma falha mecânica que ao longo dos anos foi diminuindo por causa da acomodação (Figura 49).

Figura 49 - Gráfico do sensor A3

Fonte: Própria do autor.

Nos sensores A4 e A5 da bomba A foi identificado um aumento de vibração que ao longo do tempo está indicando uma possível falha (Figuras 50 e 51)

Figura 50 - Gráfico do sensor A4

Fonte: Própria do autor.

Figura 51 - Gráfico do sensor A5

Fonte: Própria do autor

No sensor A6 da bomba B existe um pico de vibração anual com valor médio de 2,63 mm/s caracterizado pela influência do pico de vibração mensal de 7,75 mm/s encontrado no mês de agosto de 2019 (**APÊNDICE A**) que foi o motivo para realizar a parada do funcionamento da bomba. (Figura 52).

Figura 52 - Gráfico do sensor A6

Fonte: Própria do autor.

Através dos resultados coletados com a análise de vibração de nível global foi possível identificar problemas no equipamento que podem ser gerados por rolamentos deteriorados, desalinhamento entre os eixos acoplados, folgas mecânicas, cavitação, estrutura com ressonância, rotor desbalanceado etc., causando falhas prematuras. Para isso merece uma análise mais criteriosa de análise de vibração realizando medições de deslocamento, velocidade e/ou aceleração e fazer uma análise de causa raiz para identificar as soluções mais adequadas.

6.2 Segunda Etapa: Análise de dados dos Indicadores de manutenção

- **MTBF**

De acordo com o gráfico da Figura 53, em 2015, a Bomba A apresentou o melhor rendimento com falhas que aconteciam a cada 1069 horas, que é aproximadamente uma falha por ano, e em 2016 o pior rendimento com falhas a cada 122 horas, que é aproximadamente 1 falha por mês.

A Bomba B teve seu melhor rendimento em 2019 com falhas a cada 619 horas, que é aproximadamente duas falhas por ano, e o pior rendimento em 2015, com falhas a cada 67 horas, que é aproximadamente 1 falha a cada 3 semanas.

Figura 53 - Gráfico do tempo médio entre falhas (MTBF) das bombas A e B.

Fonte: Própria do autor.

- **MTTR**

De acordo com o gráfico da Figura 54, em 2012 a Bomba A não teve manutenção corretiva, em 2014 o tempo médio de reparo foi 45 minutos, que representa o melhor rendimento da equipe de manutenção, e em 2018 foi a fase mais crítica com tempo médio de reparo de 16 horas.

A Bomba B não teve manutenção corretiva em 2018, em 2013, 2015 e 2017 o tempo médio de reparo foi de 2 horas, que representa o melhor rendimento da equipe de manutenção, e 2012 foi o ano mais crítico da Bomba B, com tempo médio de reparo de 21 horas.

Figura 54 - Gráfico do tempo médio para reparos (MTTR) das bombas A e B.

Fonte: Própria do autor.

- **DISPONIBILIDADE**

O gráfico da Figura 55 representa que as bombas estavam em todos os anos acima de 90% do tempo disponíveis para uso, onde apenas em 2012 a bomba B obteve disponibilidade abaixo de 90%. A bomba A em 2012 e a bomba B em 2018, não apresentaram falhas, portanto obtiveram 100% de disponibilidade.

Todas os anos as bombas conseguiram alcançar o indicador de classe mundial WCM (Word Class Maintenance) que hoje é considerado acima de 90%, com exceção da bomba B em 2012.

Figura 55 - Gráfico da disponibilidade das bombas A e B.

Fonte: Própria do autor.

• CONFIABILIDADE

Mesmo com as bombas disponíveis para uso não significa que está confiável para o funcionamento do processo. O gráfico da Figura 56 apresenta a confiabilidade que é considerada como a probabilidade de operação da bomba para o próximo mês, que equivale a 96 horas de funcionamento e levando em consideração o seu histórico de manutenção corretiva.

As melhores probabilidades de operações das bombas para o próximo mês foram em 2012 para a bomba A, com aproximadamente 95% e 2014 e 2019 para a bomba B, com aproximadamente 86%.

As piores probabilidades de operações foram em 2015 para a bomba B, com aproximadamente 24%, e 2016 para a bomba A, com aproximadamente 46%.

Apenas em 2012 que a bomba A conseguiu ficar próximo do indicador de classe mundial WCM (Word Class Maintenance), que hoje é considerado acima de 95%.

Figura 56 - Gráfico da confiabilidade das bombas A e B (1 mês).

Fonte: Própria do autor.

O gráfico da Figura 57 apresenta a confiabilidade para os próximos 2 meses que equivale a 192 horas de funcionamento.

Com aumento do tempo a probabilidade de operação das bombas diminuem. As melhores probabilidades de operações das bombas para os próximos dois meses continuam em 2012 para a bomba A com aproximadamente 90%, portanto obteve uma redução de 5% de confiabilidade e 2014 e 2019 para a bomba B com aproximadamente 73%, com redução de 13% de confiabilidade.

As piores probabilidades de operações continuam também em 2015 para a bomba B, com aproximadamente 6%, reduzindo 18% de confiabilidade, e 2016 para a bomba A, com aproximadamente 21%, reduzindo 25% de confiabilidade.

Figura 57 - Gráfico da confiabilidade das bombas A e B (2meses).

Fonte: Própria do autor.

• PRODUTIVIDADE

O gráfico da Figura 58 apresenta a produtividade individual de cada bomba, onde as piores condições de trabalho ocorreram em 2012 e 2015 da bomba A, respectivamente, com 117% e 131%, e em 2016 e 2019 da bomba B, respectivamente, com 172% e 108%.

As piores produtividades foram em 2013, 2014, 2016 e 2019 da bomba A, respectivamente, com 56%, 33%, 44% e 60% e em 2012, 2013, 2014, 2015 com a bomba B, respectivamente, com 23%, 32%, 40% e 8 %.

As melhores produtividades foram em 2012, 2015, 2017 e 2018 da bomba A, respectivamente, com 117%, 131%, 86% e 99% e em 2016, 2017, 2018 e 2019 com a bomba B, respectivamente, com 172%, 97%, 92% e 108%

Nos anos de 2012, 2015, 2017 e 2018 a produtividade da bomba A e nos anos de 2016, 2017, 2018 e 2019 a produtividade da Bomba B conseguiram atingir o indicador de classe mundial WCM (Word Class Maintenance) que hoje é considerado acima de 72%.

Figura 58 - Produtividade das bombas A e B.

Fonte: Própria do autor.

Não conseguiram atingir o indicador de classe mundial WCM (Word Class Maintenance) a bomba A em 2013, 2014, 2016 e 2019 e a bomba B em 2012, 2013, 2014 e 2015.

Apenas nos anos de 2014, 2017 e 2018 que ocorreram um balanceamento de produtividade das bombas com ΔT de no máximo 11%. Os anos de 2012, 2013, 2015, 2016 e 2019 obtiveram ΔT , respectivamente, nos valores de 94%, 24%, 123%, 128% e 48%, sobrecarregando uma bomba mais que a outra.

6.3 Terceira Etapa: Análise de dados de corrente elétrica

Com os dados coletados foram calculados os consumos em kWh por ano para o funcionamento da refrigeração do circuito primário (Figura 59). No ano de 2019 foi registrado o consumo até o mês de agosto.

Figura 59 - Gráfico do consumo em quilowatt-hora por ano.

Fonte: Própria do autor.

Na figura 60 apresenta o custo estimado do que já foi gasto até o momento para manter o conjunto motobomba do circuito primário do reator IEA-R1 em funcionamento.

Figura 60 - Custo estimado de energia do circuito primário.

Fonte: Própria do autor.

A figura 61 apresenta uma economia estimada em torno de 10% do que já foi gasto até o momento por ano que o circuito primário poderia economizar, lembrando que a economia pode chegar acima de 20%.

Os valores calculados foram considerados as condições atuais do conjunto motobomba que apresentou um desalinhamento severo, ou seja, se o conjunto vem trabalhando na condição atual, significa que o circuito primário de refrigeração está consumindo no mínimo 10% a mais de energia.

Figura 61 - Economia estimada

Fonte: Própria do autor.

6.4 Quarta Etapa: Análise do Alinhamento por laser

Na utilização do alinhador a laser foi realizado uma verificação utilizando a função de trem de máquinas proporcionando realizar o alinhamento de três máquinas conectadas (motor, volante e bomba) (Figura 62).

Foi constatado um desalinhamento, mas devido à deficiência do sistema de movimentação resolvemos realizar a verificação individual considerando bomba com volante de inércia e volante de inércia com motor elétrico.

Figura 62 - Medição trem de máquina.

Fonte: própria do autor.

Na Figura 63 consta a medição individual considerando bomba e volante de inércia. Foi identificado um desalinhamento severo na parte horizontal com 2,66mm em um dos mancais de apoio do volante de inércia.

Figura 63 - Medição individual – Bomba e Volante.

Fonte: Própria do autor.

Na Figura 64 consta a medição individual considerando volante de inércia e motor elétrico. Foi identificado também um desalinhamento severo na parte horizontal com 1,33mm nos pés traseiros do motor elétrico.

Figura 64 - Medição individual – Volante e Motor Elétrico.

Fonte: Própria do autor.

Devido a uma falha de projeto onde uma parede de chumbo que foi instalada na lateral do motor prejudicando o acesso, houve o impedimento do uso de ferramentas para realizar o alinhamento porque não tinha o espaço necessário para soltar os parafusos de uma das laterais do motor (Figura 65).

Figura 65 – Parede de chumbo.

Fonte: Própria do autor.

Para redução do nível de vibração, temperatura e desgaste prematuro dos componentes, faz-se necessário realizar o alinhamento de eixos de forma preventiva conforme recomendações do fabricante ou conforme resultados encontrados na análise de vibração.

7 CONCLUSÕES

Através da análise de vibração identificou-se falhas pontuais nos equipamentos analisados, onde, em um dos anos analisados os níveis de vibração obtiveram um aumento de mais de cinquenta por cento comparado com outro ano, e uma tendência de falha, ao longo de 8 anos de funcionamento, indicando que aqueles pontos específicos de medições não estavam em condições normais de funcionamento. Na coleta de vibração em agosto de 2019 a bomba B apresentou 7,75 mm/s de vibração no mancal 6 e foi retirada de operação.

O desalinhamento encontrado no conjunto motobomba indicou que esse equipamento está realizando um funcionamento inadequado dos pontos A3 a A5 e, inclusive, foi um dos causadores das manutenções corretivas realizadas. Estes pontos desalinhados são os causadores de vibrações mecânicas, aumento de temperatura e vazamentos de lubrificantes dos mancais.

Durante o alinhamento de eixos foi constatado uma falha do projeto, pois instalaram uma parede de chumbo, ao lado do motor elétrico, impedindo a realização do alinhamento por falta de espaço para encaixe das ferramentas de trabalho.

Um ponto importante analisado, e que também contribui para as falhas geradas nestes equipamentos, foi a falta do balanceamento de produtividade das bombas, que de alguma forma acaba sobrecarregando um equipamento mais que o outro. Por ser uma área com acesso controlado, o não balanceamento compromete a intervenção antecipada para fazer a manutenção.

Por ser um equipamento com acesso restrito, necessita de uma gestão de ativos de acordo com a Norma ABNT NBR ISO 55000 para que consiga alcançar os indicadores de classe mundial WCM (Word Class Maintenance), garantindo a confiabilidade do sistema. Os resultados esperados na gestão de ativos somente serão alcançados se houver medição sistemática, monitoramento, análise e avaliação dos ativos utilizando os indicadores de manutenção.

Outro ponto que se destacou foi o consumo de energia que pode gerar uma economia estimada em mais de 10% realizando o alinhamento de eixos. Conforme valores encontrados no alinhamento, o conjunto motobomba está operando sobrecarregado e, conseqüentemente, isso gera um aumento de corrente elétrica.

8 TRABALHOS FUTUROS

- Inteligência artificial: Análise do comportamento do equipamento para tomada de decisão estimando o momento de parada conforme o uso do equipamento e não apenas realizar a manutenção preventiva independente do uso;
- Monitoramento remoto das bombas e motores com diagnóstico através de relatórios abrangentes disponíveis por smartfone, tablet ou notebook utilizando sensor triaxial que oferece o monitoramento contínuo de vibração e temperatura.
- Método para predição de confiabilidade (LCC - Life Cycle Cost), ou seja, por ser um equipamento utilizado em áreas de riscos com contatos limitados pode-se calcular a vida útil programando somente uma troca. São projetos de equipamentos que funcionam em um período livre de manutenção;
- Medição de espessura da voluta bomba com Ultrassom para acompanhamento do desgaste. Como a bomba transporta um produto contaminado, não existe nenhum controle da condição do equipamento referente a corrosão no seu interior.
- Análise de temperatura para verificar os pontos críticos do equipamento. A análise de temperatura da máquina fixa e máquina móvel é muito importante, pois caso tenha diferenças de temperatura necessita fazer uma compensação térmica no alinhamento do conjunto.
- Troca do sistema de vedação de gaxeta por selo mecânico. No sistema atual a vedação é gaxeta e existe um gotejamento de produto que fica exposto ao ambiente e, por ser um produto contaminado, a recomendação seria selo mecânico.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Petroleum Institute. API 686: **Recommended Practice for Machinery Installation and Installation Design**. Washington, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Confiabilidade e Manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994. (NBR 5462).

BECKER, Dr. Edwin; HOLSTEIN, Ole. FOCUS ON ALIGNMENT: Reducing vibration with laser alignment. **MRO - MAINTENANCE, REPAIR AND OPERATIONS: Modern Times?**, Canada, v. 26, n. 6, p. 17-17, dez./2010.

BENEVENUTI, Érion de Lima. **Metodologia para monitoração e diagnóstico de vibração das bombas moto-operadas do circuito primário de refrigeração do Reator IEA-R1**. 221fls. Dissertação - Área de Tecnologia Nuclear – Reatores, IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2004.

BERNET, John. **From Screwdrivers to Testers: Vibration Analysis Comes of Age**. UPTIME for maintenance reliability and asset management professionals: Maintenance Is Really NOT the Problem, Flórida, v. 1, n. 1, p. 18-21, ago./2016.

BRANCO FILHO, Gil. **Indicadores e Índices da Manutenção**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2016.

CARLISLE, Peter. **Thorough preparation and the right alignment method are critical**. John Crane, 2012. Disponível em: <https://www.pumpsandsystems.com/topics/pumps/easy-shaft-alignment-0712>. Acesso em: 15 agosto de 2019.

COMMTEST. **Beginner's Guide to Machine Vibration**. Revision 28/06/06. New Zealand: Commtest Instruments Ltd, 2006.

DRUMMOND, Getúlio V.. **Manutenção e Reparos de Bombas**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2006.

DYNAMOX. **Quais são os kpis da manutenção industrial?**. Disponível em: <https://dynamox.net/kpis-da-manutencao-industrial/>. Acesso em: 03 jul. 2019.

FAINER, Gerson; FALOPPA, Altair A.; OLIVEIRA, Carlos A.; NETO, Miguel Mattar. **IEA-R1 PRIMARY AND SECONDARY COOLANT PIPING SYSTEMSCOUPLLED STRESS ANALYSIS**. In: International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2013, Recife, PE. Disponível em: http://repositorioconsulta.ipen.br/Consulta_AutorIPEN.php?codigo=1468. Acesso em: 09 set. 2019.

FAINER, Gerson; FALOPPA, Altair A.; OLIVEIRA, Carlos A.; NETO, Miguel Mattar. **IEA-R1 RENEWED PRIMARY COOLANT PIPING SYSTEM STRESS ANALYSIS**. In: International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2015, São Paulo, SP. Disponível em: http://repositorioconsulta.ipen.br/Consulta_AutorIPEN.php?codigo=1468. Acesso em: 04 maio. 2020.

FALOPPA, Altair A.; FAINER, Gerson; OLIVEIRA, Carlos A.; NETO, Miguel Mattar. **AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE UM SUPORTE DA TUBULAÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DO REATOR NUCLEAR DE PESQUISA IPEN IEA-R1**. CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica 2016, Fortaleza, Ceará. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/bitstream/handle/123456789/27015/22849.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 31 maio 2020.

FIXTURLASER. **Benefícios do alinhamento de eixos**. Disponível em: <http://www.fixturlaser.pt/Alinhamento-de-eixos/Beneficios-do-alinhamento-de-veios/>. Acesso em: 22 setembro de 2019.

GASPAR, Daniel; REGUENGA, Diana; SILVA, José. **DOSSIER SOBRE MANUTENÇÃO PREDITIVA E INDÚSTRIA 4.0: A importância da manutenção preditiva**. REVISTA MANUTENÇÃO, Portugal, v. 1, n. 144, p. 28-29, mar./2020.

GERNER, Valter Rubens. **Bombas Guia Básico**. 1. ed. Brasília_ IEL_INC, 2009.

GOGARTY, Paul. **Use Predictive To Get to Prescriptive: Preventive asset-management is a stepping stone to prescriptive practices**. EFFICIENT PLANT: Prescriptive Maintenance, Inglaterra, v. 33, n. 3, p. 10-12, mar./2020.

JESSE, Stephen; HINES, J. Wesley; EDMONDSON, Andrew. **Motor Shaft Misalignment Bearing Load Analysis**. The University of Tennessee College of Engineering Maintenance and Reliability Center, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/2238048_Motor_Shaft_Misalignment_Bearing_Load_Analysis. Acesso em: 14 fev. 2019.

JESSE, Stephen; HINES, J. Wesley. **The University of Tennessee Maintenance and Reliability Center Motor Shaft Misalignment Research Project**. Society of Automotive Engineers, 1997. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/2645939_The_University_of_Tennessee_Maintenance_and_Reliability_Center_Motor_Shaft_Misalignment_Research_Project. Acesso em: 15 fev. 2019.

KARDEC, A. et al. **Gestão de Ativos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2014. p. 170-173.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio; **Manutenção Preditiva: Fator de sucesso na gestão empresarial**. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2013.

KOVACEVIC, James. **Ensure Your Precision Alignment Program Is On The Right Foot**. Hpreliability, 2017. Disponível em: <https://hpreliability.com/understanding-soft-foot-and-how-to-correct-it/>. Acesso em: 04 de jul. de 2019.

KSB. **Manual técnico Meganorm**. Frankenthal, 2013.

LAWRENCE, Patrick. **Was Soft Foot the Problem?**. VibrAlign, 2011. Disponível em: <https://vibralign.com/shaft-alignment/soft-foot-problem/>. Acesso em: 04 de jul. de 2019.

LEITE, Algeny; L. BENEVENUTTI, Erion; F. MACIEL, Gílson; O. MARTINS, Mauro; YOVANOVICH, Marcos; R. CARVALHO, Marcos; NASCIMENTO B. SANTOS, Emanuel. **Manutenção corretiva nas bombas do circuito primário do reator iea-r1**. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE; NATIONAL MEETING OF REACTOR PHYSICS AND THERMAL HYDRAULICS, 13th, 2002, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br:8080/xmlui/handle/123456789/16978?show=full>. Acesso em: 04 set. 2017.

LEUGNER, L. (tex). In Alignment: Troubleshooting rotating equipment alignment problems. **MRO - MAINTENANCE, REPAIR AND OPERATIONS: Maintenance Technology**, Canada, v. 34, n. 3, p. 20-21, jun./2018.

LI, Carolina Nascimento de. **MTTR e MTBF — Você conhece estes dois indicadores essenciais para o PCM?** REDE INDUSTRIAL, 2016. Disponível em: <https://blog.redeindustrial.com.br/mttr-e-mtbf-voc%C3%AA-conhece-estes-dois-indicadores-essenciais-para-o-pcm-f51f98a16bb9>. Acesso em: 02 julho de 2019.

LIFETIME RELIABILITY SOLUTIONS. **Precision Maintenance Techniques for Machinery**. Disponível em: http://www.lifetime-reliability.com/tutorials/maintenance-management/18_ShaftAlignment.pdf. Acesso em: 29 abr. 2017.

LOBANOFF, Val S.; ROSS, Robert R.. Basic Pump Maintenance: Motor/Pump Alignment. **Improving Pumping System Performance: A Sourcebook for Industry**, Burlington, v. 1, n. 2, p. 33-34, mai./2006.

LUDECA. **A Practical Guide to Shaft Alignment**. 4.ed. PRUFTECHNIK LTD, 2002.

MANESCHY, José Eduardo; MIRANDA, Carlos Alexandre J.. **Mecânica da Fratura na Indústria Nuclear**. Rio de Janeiro: Lithos Edições de Arte, 2014.

MARTINS, Mauro Onofre. **Desenvolvimento de sistema computacional para planejamento e controle da manutenção do reator iea-r1**. 221fls. Dissertação - Área de Tecnologia Nuclear – Aplicações, IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2015.

NASCIF, Júlio; DORIGO, Luiz Carlos. **Manutenção Orientada para Resultados**. 1.ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2013.

NASCIF, Júlio. **Indicadores de Manutenção**. Disponível em: <http://www.dee.ufrn.br/~joao/manut/15%20-%20Cap%EDtulo%2013.pdf>. Acesso em: 26 de fevereiro de 2020.

OLIVEIRA, Alexandre Rubio de; CONTI, Thadeu das Neves. **Estudo da influência do alinhamento de eixos por laser em conjuntos motobomba**. Belo Horizonte: Congresso Brasileiro de Manutenção, 2018.

OLIVEIRA, Alexandre Rubio De; PETROLI, Elton; HAYASHI, Richard Gomes; **Tecnologia aplicada à manutenção mecânica industrial: Fundamentos e Técnicas**. 1. ed. São Paulo: SENAI-SP Editora, 2018. p. 129-131.

PIOTROWSKI, John. **Shaft alignment handbook**. 3.ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.

PRUFTECHNIK. Alignment in Your Maintenance Strategy: Calculate ROI!. **UPTIME for reliability leaders and asset managers: SELECTING THE CORRECT MAINTENANCE STRATEGY**, Flórida, v. 1, n. 1, p. 8-8, fev./2017.

PRUFTECHNIK. **An Engineers Guide to Shaft Alignment, Vibration Analysis, Dynamic Balancing e Wear Debris Analysis**. 8.011.ed. PRUFTECHNIK LTD, 2012.

PRUFTECHNIK. **Por que alinhar**. Disponível em:
<https://www.pruftechnik.com/br/downloads.html>. Acesso em: 29 abr. 2017.

RANDALL, Robert B.. **State of the Art in Monitoring Rotating Machinery – Part 1**. In: ISMA 2002, the International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium, September, 2002.

SCHEFFER, Cornelius; GIRDHAR, Paresh. **Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance**. 4.ed. Jordan Hill, Burlington: Newnes uma marca da Elsevier, 2004.

SILVA, Marcos Antônio da. **Seleção e Aplicação de Bombas Centrífugas**. 5.ed. KSB Bombas Hidráulicas S/A, 2003.

SKF. **Ferramentas para alinhamento de eixo SKF**. Disponível em:
http://www.skf.com/binary/82-263547/11443PTBR_ShaftAlignmentTools.pdf. Acesso em: 21 maio 2017.

SMI - SUPORTE MANUTENÇÃO INDUSTRIAL. **IMPORTÂNCIA DA MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA INDÚSTRIA**. Disponível em:
<https://www.suporteindustrial.com.br/medicao-energia-eletrica>. Acesso em: 20 mai. 2020.

SPHERIC. **MONITORAMENTO DE TEMPERATURA**. Disponível em:
https://www.spheric.com.br/solucoes?id_solucao=10. Acesso em: 21 mai. 2020.

STAHNKE, Maurício Álison; 2, F. D. L. N; VIERO, Carlos Frederico. **Analysis of the use of preventive maintenance in educational environments: A case of study**. REVISTA: Espacios, Venezuela, v. 36, n. 18, p. 14-14, ago./2015.

TEKNIKAO. **ANÁLISE DE VIBRAÇÕES**. Disponível em:
<https://pt.scribd.com/document/138231766/ApostilaVibracoes>. Acesso em: 14 fevereiro de 2020.

TELES, Jhonata. **Indicadores de Manutenção: Conheça os principais KPI's para Gestão da Manutenção!** ENGETELES, 2020. Disponível em: <https://engeteles.com.br/indicadores-de-manutencao/>. Acesso em: 02 fevereiro de 2020.

TELES, Jhonata. **Fator de Produtividade na Manutenção Industrial.**

ENGETELES, 2020.

Disponível

em: https://engeteles.com.br/fatordeprodutividadenamanutencaoindustrial/?fb_comment_id=1878011165603970_3137288596342881. Acesso em: 26 fevereiro de 2020.

VERRI, Luiz Alberto. **Gerenciamento pela Qualidade Total na Manutenção Industrial: aplicação prática.** 1.ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2007.

VIANA, Herbert Ricardo Garcia. **PCM: Planejamento e Controle da Manutenção.**

1.ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2002.

WEG. **Manutenção: Lubrificação.** Manual geral de instalação, operação e manutenção de motores elétricos, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 45-51, mar./2017.

YAMAMOTO, Shuji. **Leverage Wireless Communication for Vibration Monitoring: While vibration can't be eliminated entirely, it can be measured and analyzed to guide corrective actions.** EFFICIENTPLANT: Mobile Technology, USA, v. 30, n. 11, p. 31-34, nov./2017.

APÊNDICE A – Coleta de dados de vibrações mecânicas de 2012 a 2019

	Bomba A
	Bomba B

				Meses														
	Local do sensor	Posição	Ano da Coleta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
Vibração de nível global - mm/s	A1	Carcaça do motor	Radial	2012	0,91	0,81	2,60	0,76	0,67	0,73	0,68	0,86	0,81	0,88	0,87	0,78		
				2013	0,93	0,89	0,94	1,02	0,82	0,90	0,89	Fora de Operação						
				2014	Fora de Operação						0,93	1,03	0,97	0,99	0,98	1,00		
				2015	1,41	1,02	1,25	1,08	1,00	1,22	0,89	0,89	0,93	0,95	0,87	Não Operou		
				2016	0,93	0,89	0,87	0,81	0,93	0,78	0,85	0,84	0,98	0,93	0,75	0,84		
				2017	0,80	0,82	0,83	0,88	0,86	0,75	0,76	0,77	0,83	0,83	0,69	0,79		
				2018	0,82	0,79	0,74	0,75	0,70	0,63	0,82	0,79	0,69	1,10	0,68	0,80		
				2019	0,74	0,84	0,81	0,76	0,79	0,81	0,77	0,78	1,33	1,73	1,53			
	A2	Axial	2012	0,77	0,74	3,48	0,69	0,76	0,75	0,81	0,78	0,74	0,78	0,74	0,75			
			2013	0,73	0,81	0,80	0,73	0,83	0,72	0,77	Fora de Operação							
			2014	Fora de Operação						0,76	0,80	0,72	0,85	0,79	0,73			
			2015	0,88	0,86	0,86	0,82	0,82	0,83	0,79	0,78	0,71	0,79	0,69	Não Operou			
			2016	0,73	0,73	0,71	0,69	0,79	0,73	0,72	0,72	0,80	0,78	0,69	0,71			
			2017	0,72	0,72	0,75	0,86	0,72	0,67	0,67	0,69	1,12	1,09	0,89	0,89			
			2018	0,94	0,70	0,70	0,67	1,07	1,02	0,75	0,74	1,01	1,06	0,97	0,73			
			2019	0,70	0,76	0,71	0,69	0,75	1,04	0,71	0,94	1,81	1,67	1,81				
	A3	Mancal do Volante	Lado Motor	2012	0,28	0,27	0,60	0,27	0,27	0,27	0,26	0,24	0,26	0,25	0,27	0,27		
				2013	0,26	0,29	0,26	0,48	0,26	0,46	0,45	Fora de Operação						
				2014	Fora de Operação						0,47	0,46	0,46	0,23	0,23	0,46		
				2015	0,41	0,39	0,40	0,38	0,40	0,39	0,22	0,26	0,48	0,25	0,47	Não Operou		
				2016	0,45	0,46	0,47	0,46	0,24	0,45	0,44	0,44	0,26	0,26	0,46	0,46		
				2017	0,45	0,39	0,46	0,35	0,45	0,43	0,43	0,42	0,31	0,31	0,35	0,33		
				2018	0,34	0,43	0,45	0,44	0,34	0,35	0,43	0,43	0,36	0,41	0,44	0,44		
				2019	0,45	0,43	0,45	0,44	0,45	0,41	0,32	0,42	0,45	0,43	0,45			
	A4	Lado Bomba	2012	0,31	0,40	0,26	0,39	0,38	0,38	0,37	0,37	0,38	0,33	0,35	0,34			
			2013	0,38	0,38	0,38	0,31	0,37	0,33	0,34	Fora de Operação							
			2014	Fora de Operação						0,33	0,34	0,34	0,39	0,40	0,36			
			2015	0,24	0,24	0,23	0,25	0,25	0,23	0,40	0,42	0,48	0,41	0,36	Não Operou			
			2016	0,36	0,36	0,36	0,37	0,37	0,35	0,36	0,36	0,25	0,37	0,37	0,37			
			2017	0,33	0,37	0,39	0,51	0,38	0,37	0,36	0,37	0,58	0,59	0,60	0,63			
			2018	0,65	0,35	0,37	0,35	0,76	0,82	0,30	0,37	0,94	1,13	1,24	0,37			
			2019	0,38	0,34	0,37	0,38	0,38	1,18	0,35	0,73	1,36	0,87	0,91				
	A5	Mancal da Bomba	Radial	2012	1,20	1,17	1,08	1,18	1,13	1,15	1,19	1,21	1,17	1,16	1,20	1,13		
				2013	1,20	1,12	1,16	1,01	1,10	0,93	1,21	Fora de Operação						
				2014	Fora de Operação						1,08	1,07	1,08	1,25	1,18	1,13		
				2015	1,33	1,20	1,16	1,18	1,24	1,34	1,34	1,22	1,03	1,19	1,07	Não Operou		
				2016	1,07	1,09	1,14	1,07	1,19	1,08	1,05	1,07	1,21	1,30	1,25	1,30		
				2017	1,61	1,29	1,13	1,71	1,08	1,03	1,08	1,10	1,49	1,47	1,69	1,81		
				2018	1,70	1,03	1,09	1,09	1,67	1,65	1,10	1,12	1,98	2,09	2,15	1,14		
				2019	1,02	1,20	1,23	1,19	1,21	2,03	1,25	2,82	2,40	2,46	2,56			
	A6	Axial	2012	1,37	1,28	1,33	1,32	1,24	1,27	1,30	1,27	1,31	1,27	1,30	1,24			
			2013	1,24	1,26	1,31	1,33	1,34	1,27	1,38	Fora de Operação							
			2014	Fora de Operação						1,20	1,21	1,23	1,22	1,25	1,31			
			2015	1,41	1,25	1,17	1,23	1,26	1,40	1,34	1,24	1,47	1,29	1,26	Não Operou			
			2016	1,26	1,33	1,32	1,27	1,31	1,24	1,26	1,30	1,30	1,54	1,31	1,26			
			2017	1,25	1,31	1,28	1,40	1,23	1,22	1,53	1,32	1,28	1,25	1,37	1,37			
			2018	1,31	1,23	1,29	1,30	1,15	1,20	1,30	1,29	1,35	1,45	1,48	1,34			
			2019	1,25	1,33	1,36	1,41	1,51	1,47	1,33	7,75	1,37	1,42	1,54				

Média das vibrações por sensor – Valores em mm/s

	Sensor A1		Sensor A2		Sensor A3		Sensor A4		Sensor A5		Sensor A6	
	Bomba A	Bomba B	Bomba A	Bomba B	Bomba A	Bomba B	Bomba A	Bomba B	Bomba A	Bomba B	Bomba A	Bomba B
2012	0,8	2,6	0,76	3,48	0,26	0,6	0,36	0,26	1,17	1,08	1,29	1,33
2013	0,9	0,94	0,79	0,74	0,27	0,46	0,38	0,33	1,15	1,05	1,29	1,33
2014	0,99	0,98	0,82	0,75	0,23	0,46	0,4	0,34	1,22	1,09	1,24	1,24
2015	1,08	0,9	0,83	0,7	0,34	0,48	0,3	0,42	1,24	1,05	1,29	1,37
2016	0,95	0,84	0,79	0,71	0,25	0,45	0,33	0,36	1,23	1,12	1,38	1,28
2017	0,8	0,8	0,97	0,71	0,33	0,43	0,58	0,37	1,63	1,19	1,33	1,31
2018	0,82	0,75	1	0,8	0,39	0,41	0,99	0,46	1,81	1,24	1,4	1,26
2019	1,16	0,78	0,54	0,77	0,44	0,41	0,85	0,44	1,98	1,5	1,43	2,63

APÊNDICE B – Coleta de dados das ordens de serviços

		Ano							
		2012 ¹	2013 ²	2014 ³	2015 ⁴	2016 ⁵	2017 ⁵	2018 ⁵	2019 ⁵
Bomba A CP-BOM-01	Quantidade de horas em funcionamento da bomba / ano *	1790	863	506	1071	252	493	569	346
	Quantidade de horas de reparos da bomba / ano - (Apenas corretivas)	0	1	1,5	2	8	2	16	2
	Quantidade de Ordem de Serviço de reparos da bomba / ano (Apenas corretivas)	0	1	2	1	2	1	1	2
Bomba B CP-BOM-02	Quantidade de horas em funcionamento da bomba / ano *	351	492	608	69	991	560	532	620
	Quantidade de horas de reparos da bomba / ano - (Apenas corretivas)	42	2	4	2	8,5	2	0	1
	Quantidade de Ordem de Serviço de reparos da bomba / ano (Apenas corretivas)	2	1	1	1	2	1	0	1

NOTAS:

* - Foram consideradas apenas as horas de operação em alta potência com vazão nominal de 3400 gpm/min. Para realização de testes operacionais e de segurança considerar 1% do valor total de horas no ano.

1 - Regime de turno de 64 horas semanais aproximadamente;

2 - Parada para troca da tubulação do circuito primário em agosto de 2013;

3 - Início da operação depois da troca da tubulação do circuito primário em julho de 2014;

4 - Mudança do regime de operação para 8 horas diárias durante 3 dias na semana em abril de 2015;

5 - Regime de operação de 8 horas diárias durante 3 dias na semana.

APÊNDICE C – Produtividade das Bombas

		Ano							
		2012 ¹	2013 ²	2014 ³	2015 ⁴	2016 ⁵	2017 ⁵	2018 ⁵	2019 ⁵
Bomba A CP-BOM-01	Quantidade de horas trabalhadas / ano *	1790	863	506	1071	252	493	569	346
	Jornada de trabalho em horas	1536	1536	1536	816	576	576	576	576
	Produtividade	116,54%	56,18%	32,94%	131,25%	43,75%	85,59%	98,78%	60,07%
Bomba B CP-BOM-02	Quantidade de horas trabalhadas / ano *	351	492	608	69	991	560	532	620
	Jornada de trabalho em horas	1536	1536	1536	816	576	576	576	576
	Produtividade	22,85%	32,03%	39,58%	8,46%	172,05%	97,22%	92,36%	107,64%
Produtividade Total das Bombas A e B		139%	88%	73%	140%	216%	183%	191%	168%

APÊNDICE D – Valores de tensão e corrente elétrica

		Data da Coleta	
		03/mar	09/set
Bomba A	2019	TENSÃO: RS= 454 V, ST= 456 V, TR= 457 V CORRENTE: R= 93 A, S= 95.8 A, T= 96.2 A	
	2018	TENSÃO: RS= 452 V, ST= 455 V, TR= 456 V CORRENTE: R= 92 A, S= 95 A, T= 96 A	TENSÃO: RS= 464 V, ST= 460 V, TR= 458 V CORRENTE: R= 92.4 A, S= 95.2 A, T= 96 A
	2017	TENSÃO: RS= 448 V, ST= 449 V, TR= 447 V CORRENTE: R= 94 A, S= 95 A, T= 97 A	TENSÃO: RS= 450 V, ST= 450 V, TR= 455 V CORRENTE: R= 92.3 A, S= 94 A, T= 96 A
	2016	TENSÃO: RS= 452 V, ST= 455 V, TR= 451 V CORRENTE: R= 92.1 A, S= 93.4 A, T= 95.2 A	TENSÃO: RS= 458 V, ST= 461 V, TR= 457 V CORRENTE: R= 92 A, S= 94.5 A, T= 96 A
	2015	TENSÃO: RS= 452 V, ST= 454 V, TR= 458 V CORRENTE: R= 91.5 A, S= 94.5 A, T= 96 A	TENSÃO: RS= 456 V, ST= 454 V, TR= 455 V CORRENTE: R= 92.3 A, S= 94.5 A, T= 97 A
	2014	NÃO REALIZADA DEVIDO A TROCA DA TUBULAÇÃO DO CIRCUITO PRIMÁRIO	TENSÃO: RS= 462 V, ST= 459 V, TR= 464 V CORRENTE: R= 93 A, S= 92 A, T= 94 A
	2013	TENSÃO: RS= 452 V, ST= 454 V, TR= 451 V CORRENTE: R= 91.9 A, S= 93.3 A, T= 95 A	NÃO REALIZADA DEVIDO A TROCA DA TUBULAÇÃO DO CIRCUITO PRIMÁRIO
	2012	TENSÃO: RS= 470 V, ST= 470 V, TR= 473 V CORRENTE: R= 90 A, S= 92 A, T= 94 A	TENSÃO: RS= 455 V, ST= 454 V, TR= 457 V CORRENTE: R= 92.4 A, S= 95.2 A, T= 96.3 A
Bomba B	2019	TENSÃO: RS= 457 V, ST= 458 V, TR= 458 V CORRENTE: R= 95.3 A, S= 94.1 A, T= 94.8 A	
	2018	TENSÃO: RS= 452 V, ST= 455 V, TR= 454 V CORRENTE: R= 96 A, S= 97 A, T= 99 A	TENSÃO: RS= 464 V, ST= 460 V, TR= 458 V CORRENTE: R= 94 A, S= 96.2 A, T= 97.5 A
	2017	TENSÃO: RS= 448 V, ST= 446 V, TR= 449 V CORRENTE: R= 95 A, S= 96 A, T= 98 A	TENSÃO: RS= 450 V, ST= 450 V, TR= 455 V CORRENTE: R= 97 A, S= 96 A, T= 99 A
	2016	TENSÃO: RS= 454 V, ST= 456 V, TR= 451 V CORRENTE: R= 96.1 A, S= 97.3 A, T= 98 A	TENSÃO: RS= 456 V, ST= 457 V, TR= 459 V CORRENTE: R= 96.5 A, S= 96 A, T= 98.2 A
	2015	TENSÃO: RS= 454 V, ST= 452 V, TR= 459 V CORRENTE: R= 95.5 A, S= 96.8 A, T= 97.9 A	TENSÃO: RS= 458 V, ST= 456 V, TR= 457 V CORRENTE: R= 95 A, S= 97.5 A, T= 98 A
	2014	NÃO REALIZADA DEVIDO A TROCA DA TUBULAÇÃO DO CIRCUITO PRIMÁRIO	TENSÃO: RS= 465 V, ST= 467 V, TR= 469 V CORRENTE: R= 90 A, S= 91 A, T= 93 A
	2013	TENSÃO: RS= 448 V, ST= 449 V, TR= 447 V CORRENTE: R= 93.9 A, S= 95.2 A, T= 99.1 A	NÃO REALIZADA DEVIDO A TROCA DA TUBULAÇÃO DO CIRCUITO PRIMÁRIO
	2012	TENSÃO: RS= 453 V, ST= 456 V, TR= 451 V CORRENTE: R= 90 A, S= 93 A, T= 97 A	TENSÃO: RS= 455 V, ST= 454 V, TR= 457 V CORRENTE: R= 96 A, S= 97 A, T= 98.1 A

APÊNDICE E – Consumo do reator em kWh.

Mês	Consumo(kWh)
Janeiro/2012	47280
Fevereiro	44644
Março	44877
Abril	47233
Maio	42674
Junho	35391
Julho	36366
Agosto	34588
Setembro	40315
Outubro	45952
Novembro	42831
Dezembro	31317
Janeiro/2013	39570
Fevereiro	36989
Março	45493
Abril	46315
Maio	42675
Junho	38773
Julho	36251
Agosto	27689
Setembro	25943
Outubro	25656
Novembro	25863
Dezembro	29083
Janeiro/2014	30092
Fevereiro	25102
Março	29183
Abril	28733
Maio	26635
Junho	26686
Julho	33267
Agosto	35310
Setembro	38939
Outubro	38363
Novembro	43285
Dezembro	32879
Janeiro/2015	34582
Fevereiro	35842
Março	31561
Abril	36834
Maio	33338
Junho	48008
Julho	50220
Agosto	40504
Setembro	43699
Outubro	48744
Novembro	48417
Dezembro	48360

Mês	Consumo(kWh)
Janeiro/2016	48381
Fevereiro	42021
Março	50273
Abril	48402
Maio	47575
Junho	50189
Julho	50758
Agosto	58682
Setembro	54508
Outubro	50798
Novembro	53010
Dezembro	49958
Janeiro/2017	51065
Fevereiro	53049
Março	51421
Abril	46971
Maio	57203
Junho	56931
Julho	50957
Agosto	55768
Setembro	45192
Outubro	48037
Novembro	54874
Dezembro	52978
Janeiro/2018	53467
Fevereiro	53264
Março	57037
Abril	54252
Maio	53832
Junho	51751
Julho	51358
Agosto	55554
Setembro	52707
Outubro	55379
Novembro	47841
Dezembro	48274
Janeiro/2019	48718
Fevereiro	45594
Março	47896
Abril	48380
Maio	49582
Junho	49516
Julho	51782
Agosto	31441
Setembro	
Outubro	
Novembro	
Dezembro	

OBS: Durante o período de agosto de 2013 a junho de 2014 o reator esteve parado para a troca de parte da tubulação do circuito primário, ou seja, não houve operação do reator, o consumo foi referente a sistemas auxiliares como o tratamento e retratamento de água, ventilação, de segurança entre outros.

APÊNDICE F – Custo da energia e economia estimada

	Consumo(kWh)/Ano	Custo da Energia/Ano	Economia Estimada
2012	296.081	R\$162.844,55	R\$16.284,46
2013	252.180	R\$138.699,00	R\$13.869,90
2014	233.084	R\$128.196,20	R\$12.819,62
2015	300.065	R\$165.035,75	R\$16.503,58
2016	362.733	R\$199.503,15	R\$19.950,32
2017	374.668	R\$206.067,40	R\$20.606,74
2018	380.830	R\$209.456,50	R\$20.945,65
2019	223.745	R\$123.059,75	R\$12.305,98

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.