



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA POTENCIALIDADE DO USO
DA TERMOGRAFIA PARA AVALIAÇÃO DO
DESALINHAMENTO DE MÁQUINAS ROTATIVAS NA
INDÚSTRIA**

PAULO ROBERTO SANTOS BOMFIM

Orientador: Jorge Recarte Henriquez Guerrero

Coorientador: José Carlos Charamba Dutra

Dissertação submetida à Universidade Federal de Pernambuco para obtenção do grau de

Mestre em Engenharia Mecânica.

RECIFE

FEVEREIRO DE 2013

PAULO ROBERTO SANTOS BOMFIM

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA POTENCIALIDADE DO USO DA TERMOGRAFIA
PARA AVALIAÇÃO DO DESALINHAMENTO DE MÁQUINAS ROTATIVAS NA
INDÚSTRIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de concentração de Processos e Sistemas Térmicos.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Recarte Henriquez Guerrero

Co-orientador: Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra

Recife

2013

Catálogo na fonte
Bibliotecário Marcos Aurélio Soares da Silva, CRB-4 / 1175

B695e Bomfim, Paulo Roberto Santos.
Estudo experimental da potencialidade do uso da termografia para avaliação do desalinhamento de máquinas rotativas na indústria / Paulo Roberto Santos Bomfim - Recife: O Autor, 2013.
xiv, 87 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Profº Dr.º Jorge Recarte Henrique Guerrero.
Co-orientador: Profº Dr.º José Carlos Charamba Dutra.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2013.
Inclui Referências e Anexos.

1. Engenharia Mecânica. 2 Desalinhamento de Eixo. 3.Vibração - Análise. 4. Termografia. 5.Máquinas Rotativas - Indústria I. Guerrero, Jorge Recarte Henriquez (Orientador). II. Título.

621 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2013-151

“ESTUDO EXPERIMENTAL DA POTENCIALIDADE DO
USO DA TERMOGRAFIA PARA AVALIAÇÃO DO
DESALINHAMENTO DE MÁQUINAS ROTATIVAS NA
INDÚSTRIA”

PAULO ROBERTO SANTOS BOMFIM

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSOS E SISTEMAS TÉRMICOS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA/CTG/EOP/UFPE

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRIQUEZ GUERRERO
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Prof. Dr. JOSÉ CARLOS CHARAMBA DUTRA
CO-ORIENTADOR

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ
VICE-COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRIQUEZ GUERRERO (UFPE/PPGEM)

Prof. Dr. JOSÉ CARLOS CHARAMBA DUTRA (UFPE/PPGEM)

Prof. Dr. JOÃO PEREIRA DE BRITO FILHO (UFPE/PPGEM)

Prof. Dr. MÁRIO AUGUSTO BEZERRA DA SILVA (UFPE/DEN)

AGRADECIMENTOS

Como o sol nasce todo dia renovando a natureza, às vezes é preciso renovar os caminhos e nesse meu novo caminho contei com o auxílio de algumas pessoas.

Sou grato, primeiramente, a Deus, que tem iluminado a minha consciência para que eu possa visualizar novos horizontes.

À minha esposa Nadja e minhas filhas Camila e Larissa, que vêm tendo paciência nessa minha nova caminhada.

Ao Prof. Dr. Jorge Recarte Henriquez Guerrero, pela orientação, amizade, incentivo, compreensão.

Ao Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra pela coorientação, sempre com uma palavra amiga e de incentivo.

Ao engenheiro Severino Jr., o qual me auxiliou e tornou possível a realização do experimento na indústria.

Ao técnico mecânico Lourivaldo José, que me acompanhou e auxiliou durante a realização dos experimentos em campo.

Ao Prof. Dr. Fábio Magnani, pelos ensinamentos e incentivos em suas aulas.

À CAPES, pelo apoio financeiro concedido para realização deste trabalho.

À Sra. Eliane Alves da Silva e à Sra. Luana Melo, secretárias da Pós-Graduação, pela simpatia e presteza com que me auxiliaram a cumprir as exigências administrativas.

Aos amigos e amigas Alvaro, Urbano, Andrezza, Jacek, Ângelo, Marco, Heber, Renato, Ronaldo e a tantos outros que sempre tiveram paciência e me incentivaram para conclusão deste trabalho.

RESUMO

O desalinhamento de eixo em equipamentos rotativos é um dos principais fatores que causam desgaste prematuro em componentes de máquinas e/ou equipamentos. Como consequência, têm-se defeitos e/ou falhas prematuras, causando prejuízo financeiro e paradas inesperadas na produção. Existem técnicas convencionais utilizadas na indústria tanto para detecção como para correção do desalinhamento de máquinas rotativas, baseadas na análise de vibração e no alinhamento a laser. Na presente dissertação foi estudada a aplicabilidade de técnicas de termografia por infravermelho como análise auxiliar na avaliação do desalinhamento de eixos de máquinas rotativas. Os estudos foram conduzidos de forma experimental em conjuntos rotativos formados por motores, acoplamentos e bombas numa usina de açúcar e etanol da região. Em cada conjunto analisado foi feita uma verificação do alinhamento com as técnicas convencionais e, em seguida, uma análise de termografia para correlacionar esses dados considerando diversas condições de desalinhamento. Como complemento, a partir dos dados experimentais obtidos foi feita também uma análise das perdas de energia por desalinhamento. Os resultados mostram que existe uma correlação entre o aumento de temperatura e perdas de energia com o desalinhamento e que esta correlação pode ser utilizada como critério para manutenção preditiva em máquinas rotativas. Cabe destacar, entretanto, que os resultados obtidos neste trabalho, não são completamente conclusivos para o uso desta técnica nos estágios atuais de desenvolvimento como ferramenta única de análise, portanto, é necessário estudos mais aprofundados para estabelecer critérios e protocolos de análise mais confiáveis.

Palavras Chave: Desalinhamento de eixos, análise de vibração, termografia, alinhamento a laser. Perdas de energia por desalinhamento.

ABSTRACT

The shaft misalignment in rotating equipment is one of the main factors that cause premature wear on machine components and / or equipment. As a consequence there has defects and/ or premature failure, causing financial loss and unexpected stops in production. There are standard techniques used in the industry for both detection and correction of misalignment on rotating machinery based on vibration analysis and laser alignment. In this dissertation it was studied the applicability of techniques such as infrared thermography analysis assisted in evaluating the misalignment of shafts rotating machines. The studies were conducted in experimental form in rotary set formed by motors, couplings and pumps in sugar and ethanol plant of the region. In each group examined, a check was made of alignment with conventional techniques, and then a thermographic analysis to correlate these data considering assorted conditions of misalignment. As a complement, from the experimental data was also made a loss energy analysis through misalignment. The results showed that there is a correlation between the increase in temperature and losses power with the misalignment, and that this correlation may be used as a criterion for predictive maintenance in rotary machine. It is worth note, however, that the results obtained in this studied are not entirely conclusive for the use of this technique in the current stage of development as a unique tool for analysis, thus, it is need further studies to establish criteria and protocols of analysis more reliable.

Keywords: shaft misalignment, vibration analysis, thermography, laser alignment. Energy losses by misalignment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1-Análise de vibração em um conjunto motor e bomba.	1
Figura 1.2-Alinhador a laser instalado em conjunto de motor e bomba.....	2
Figura 1.3-Imagem térmica de um conjunto de motor e bomba.	2
Figura 3.1 - Espectro eletromagnético [Vision].	10
Figura 3.2 - Distribuição de Planck [Extraído de Incropera e Dewitt, (2008)].	11
Figura 3.3 - Lei de Wein [Extraído de Extraído de Incropera e Dewitt, (2008)].	12
Figura 3.4 - Dependência da emissividade em relação ao material. Adaptado de Vollmer e Mollmann (2010).....	14
Figura 3.5-Variação da emissividade com a Temperatura. Adaptado de Vollmer e Mollmann (2010).	14
Figura 3.6 - Processo de medição pela câmera de infravermelho (1) Meio adjacente (2) Objeto (3) Atmosfera [adaptado de TermoCam T-200, Manual do operador (2009)].....	15
Figura 3.7 - Imagens térmicas de circuitos e componentes elétricos . Fluke -Technical Publishers, (2009).....	16
Figura 3.8 - Imagens de rede de transmissão. Fluke -Technical Publishers, (2009).....	17
Figura 3.9 - Mancais com deficiência de lubrificação. Fluke -Technical Publishers, (2009). ...	17
Figura 3.10 – Mancais com desalinhamento de eixos. Fluke -Technical Publishers, (2009). ...	17
Figura 3.11 - Fachadas de prédios com problemas de infiltração. Fluke -Technical Publishers, (2009).	18
Figura 3.12 - Fachada de prédio com fuga de calor. Fluke -Technical Publishers, (2009).....	18
Figura 3.13 - Diferentes patologias Extraído de Araujo (2009).....	19
Figura 3.14 - Diversas aplicações na área da medicina veterinária. Extraído de Vollmer e Mollmann (2010).....	19
Figura 3.15- Medidor portátil de vibração (SKF-Brasil).....	20
Figura 3.16 - Analisador de vibração Fluke 810 (www.fluke.com).....	21
Figura 3.17 - Coletor de dados SKF CX-CMXA 70 (SKF-Brasil).	21
Figura 3.18 . a) Desalinhamento paralelo vertical. b) Desalinhamento paralelo horizontal	23
Figura 3.19 a) Desalinhamento angular vertical. b) Desalinhamento angular horizontal.	24
Figura 3.20 a)Desalinhamento combinado off-set vertical b) a)Desalinhamento combinado off-set horizontal.....	24

Figura 3.21 - Dispositivos de alinhamento com relógios comparadores (A-Line Manufacturing's).....	25
Figura 3.22 - Dispositivo de alinhamento com relógios comparadores com computador (Accushim, Inc.)	25
Figura 3.23 - Método indicador reverso (Piotrowski, 1995).	25
Figura 3.24 - Método face e aro (Piotrowski, 1995).	26
Figura 3.25 - Verificação da flecha do relógio comparador (Piotrowski, 1995).....	27
Figura 3.26 - Método radial duplo(Piotrowski, 1995).....	27
Figura 3.27 - Método eixo com espaçadores(Piotrowski, 1995).....	28
Figura 3.28 - Método face-face(Piotrowski, 1995).	29
Figura 3.29 - Alinhamento a laser, turbogerador de 22MW.	30
Figura 3.30 - Acoplamento rígido com flanges parafusadas (SENAI-FIEMG-2004).	30
Figura 3.31 - Acoplamento com luva de compressão ou de aperto (SENAI-FIEMG-2004).	31
Figura 3.32 - Acoplamento de disco ou prato (SENAI-FIEMG-2004).....	31
Figura 3.33 - Acoplamento elástico de pinos (Soto-Filhos).....	31
Figura 3.34 - Acoplamento perflex (Catálogo do fabricante Antares).....	32
Figura 3.35 - Acoplamento elástico de garras (Soto-Filhos).....	32
Figura 3.36 - Acoplamento elástico de fita de aço (Manual do fabricante Falk).	32
Figura 3.37 - Acoplamento de engrenagem (Manual do fabricante Falk).....	33
Figura 3.38 - Posicionamentos dos desalinhamentos e folga (gape) (Manual do fabricante Falk).....	33
Figura 3.39 - Acoplamento Falk Mod.13 e Mod.14.....	33
Figura 3.40 - Índices de desalinhamento máximo e folga acoplamento 13F e 14F(Adaptado manual do fabricante Falk).	33
Figura 3.41 - Acoplamento Falk Mod. 1090 T.....	34
Figura 3.42 - Índices de desalinhamento máximo e folga acoplamento 1090T(Adaptado manual do fabricante Falk).	34
Figura 3.43 - Acoplamento Antares Mod. AT 90.....	34
Figura 3.44 - Índices de desalinhamento máximo e folga acoplamento Antares 90D(Adaptado do catálogo do fabricante).	34
Figura 3.45 - Acoplamento pinos Mod. D-15	35
Figura 3.46 - Índices de desalinhamento máximo, acoplamento D-15(Adaptado do manual Ameridrive).	35

Figura 3.47 - Níveis de desalinhamento combinado e angular (Optalin Smart-Operatin Handbook 2008).	35
Figura 3.48 - Níveis de desalinhamento combinado/ diâmetro de luva 100mm (Optalin Smart-Operatin Handbook 2008)	36
Figura 3.49 - Acoplamento de grade danificado por desalinhamento	36
Figura 4.1 - Esquema de localização dos conjuntos motores e bombas	37
Figura 4.2 – Local de instalação dos conjuntos motores e bombas.....	37
Figura 4.3 - Bomba ETA KSB (Fonte: Manual técnico do fabricante KSB).....	38
Figura 4.4 - Motor elétrico de indução trifásico (Extraído do Manual do fabricante WEG).	38
Figura 4.5 – Coletor de dados B&K, modelo 2526.....	39
Figura 4.6 - Curva de calibração acelerômetro B&K 4391(Bruel & Kjaer 2006).	40
Figura 4.7 - Posição dos pontos de medição da análise de vibração.	41
Figura 4.8 - Representação dos sentidos em cada ponto de medição	41
Figura 4.9 - Termômetro de contato GTH 1160.....	41
Figura 4.10 - Temperatura próxima à bomba.	42
Figura 4.11 - Temperatura próxima ao acoplamento.	42
Figura 4.12 - Temperatura próxima ao motor elétrico	42
Figura 4.13 - Temperatura entre conjuntos.	42
Figura 4.14 - Campo de Temperatura ao redor dos conjuntos analisados.....	43
Figura 4.15 - Daqpro 5300.	44
Figura 4.16 - Pontos de medição de temperatura	44
Figura 4.17 - Câmera termográfica Flir mod. T-200(extraída do manual do fabricante Flir)...	45
Figura 4.18 - Imagem termográfica do conjunto 7 desalinhado.....	45
Figura 4.19 - Alinhador laser Alingneo.....	46
Figura 4.20 - Índices de desalinhamento (Extraído software Alignment Reporter).....	46
Figura 4.21 - Calibrador portátil (Extraído do manual do fabricante).....	47
Figura 4.22 - Emissor de corpo negro	47
Figura 4.23 - Curva de ajuste termômetro de contato GTH 1160.	48
Figura 4.24 - Temperatura dos termopares 01 a 05.....	49
Figura 4.25 - Curva de ajuste do termopar 1.	49
Figura 4.26 - Aparato para aferição da câmera termográfica	50
Figura 4.27 - Termograma aferição da câmera termográfica	50
Figura 4.28 - Curva de ajuste câmera termográfica	51
Figura 5.1 - Níveis de desalinhamento conjunto 7 (Extraído do Alignment Reporter).....	52

Figura 5.2 - Níveis de desalinhamento após primeiro alinhamento conjunto 7 (Extraído Alignment Reporter).....	53
Figura 5.3 - Ponto A-1 do motor elétrico desalinhado.	54
Figura 5.4 - Ponto A-1 do motor elétrico depois do primeiro alinhamento.	54
Figura 5.5 - Ponto A-1 da bomba desalinhada.	55
Figura 5.6 - Ponto A-1 da bomba depois do primeiro alinhamento.	55
Figura 5.7 - Imagem térmica do conjunto 7 desalinhado.	55
Figura 5.8 - Imagem térmica do conjunto 7 após primeiro alinhamento.	56
Figura 5.9 - Comparativo das temperaturas do conjunto 7 antes e depois do primeiro alinhamento.	56
Figura 5.10 - Índices de desalinhamento antes do segundo alinhamento (Extraído de Alignment Reporter).....	57
Figura 5.11 - Calços usinados.....	57
Figura 5.12 - Calços finos em aço inox encruado	57
Figura 5.13 - Medidas depois do segundo alinhamentos (Extraído de Alignment Reporter). ...	58
Figura 5.14 - Espectro ponto A-1 depois do segundo alinhamento.....	58
Figura 5.15 - Espectro ponto A-1 depois do segundo alinhamento.....	58
Figura 5.16 - Imagem térmica do conjunto. 7 após o segundo alinhamento.....	59
Figura 5.17 - Comparativo do conjunto 7 desalinhado, após o 1º e o 2º alinhamentos	59
Figura 5.18 - Índice de desalinhamento do conjunto 5 (Extraído de Alignment Reporter).	60
Figura 5.19-Espectro de vibração motor elétrico do conjunto 5	60
Figura 5.20 - Espectro de vibração da bomba do conjunto 5.	61
Figura 5.21 - Imagem térmica do conjunto 5 desalinhado.	61
Figura 5.22 - Distribuição de temperatura do conjunto 5 desalinhado	61
Figura 5.23 - Comparativo do conjunto 5 desalinhado e 7 desalinhado	62
Figura 5.24 - Comparativo entre o conjunto 5 desalinhado e o conjunto 7 alinhado.....	62
Figura 5.25 - Índices de desalinhamento conjunto 1(Extraído de Alignment Reporter).....	63
Figura 5.26 - Índices de desalinhamento conjunto 2(Extraído de Alignment Reporter).....	63
Figura 5.27-Espectro ponto A-1 do motor elétrico do conjunto 1.....	64
Figura 5.28 - Espectro ponto A-1 da bomba do conjunto 1.	64
Figura 5.29 - Espectro ponto A-1 do motor elétrico do conjunto 2	64
Figura 5.30 - Espectro ponto A-1 da bomba do conjunto 2.	65
Figura 5.31 - Imagem térmica do conjunto 1 desalinhado	65
Figura 5.32 - Imagem térmica do conjunto 2 desalinhado	65

Figura 5.33 - Comparativo entre os conjuntos 1 e 2	66
Figura 5.34 - Acoplamento danificado por desalinhamento	66
Figura 5.35 - Motor elétrico, queimado por desalinhamento.	66
Figura 5.36 - Índices de desalinhamento do conjunto 3 (Extraído de Alignment Reporter).....	67
Figura 5.37 - Índices de desalinhamento do conjunto 4 (Extraído de Alignment Reporter).....	67
Figura 5.38 - Espectro ponto A-1 do motor elétrico no conjunto 3.....	68
Figura 5.39 - Espectro ponto A-1 da bomba no conjunto 3	68
Figura 5.40 - Espectro ponto A-1 do motor elétrico no conjunto 4	69
Figura 5.41 - Espectro ponto A-1 da bomba no conjunto 4	69
Figura 5.42 - Imagem térmica do conjunto 3 desalinhado	69
Figura 5.43 - Imagem térmica do conjunto 4 desalinhado	70
Figura 5.44 - Comparativo entre os conjunto 3 e 4	70
Figura 5.45 - Índices de desalinhamento do conjunto 6 (Extraído do Alignment Reporter).	71
Figura 5.46 - Espectro ponto A-1 do motor elétrico no conjunto 6	71
Figura 5.47 - Espectro ponto A-1 da bomba no conjunto 6	72
Figura 5.48 - Imagem térmica do conjunto 6 desalinhado	72
Figura 5.49 - Distribuição de temperatura do conjunto 6 desalinhado.....	72
Figura 5.50 - Conjunto 8 (Extraído do Alignment Reporter).	73
Figura 5.51 - Espectro ponto A-1 do motor elétrico no conjunto 8	74
Figura 5.52- Espectro ponto A-1 da bomba no conjunto 8	74
Figura 5.53 - Imagem térmica do conjunto 8	74
Figura 5.54 - Distribuição de temperatura no conjunto 8	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1- Relação dos conjuntos da análise experimental.	38
Tabela 4.2 Emissividade calculada.....	45
Tabela 4.3- Resultados das temperaturas da calibração.	48
Tabela 4.4- Temperaturas dos termopares.....	49
Tabela 4.5 - Temperaturas da câmara termográfica.	50
Tabela 5.1- Índices de vibração do motor do conjunto 7.	53
Tabela 5.2- Índices de vibração da bomba do conjunto 7.	53
Tabela 5.3- Resultados da redução de temperatura do conjunto 7.	60
Tabela 5.4- Valores da diferença de temperatura entre os conjuntos 5 e 7.	62
Tabela 5.5- Índices de vibração em velocidade no conjunto 1.....	63
Tabela 5.6- Índices de vibração em velocidade no conjunto 2.....	64
Tabela 5.7- Diferença das temperaturas dos conjuntos 1 e 2.	67
Tabela 5.8- Índices de vibração em velocidade no conjunto 3.....	68
Tabela 5.9- Índices de vibração em velocidade no conjunto 4.....	68
Tabela 5.10- Diferença das temperaturas dos conjuntos 3 e 4.	70
Tabela 5.11- Índices globais de velocidade do conjunto 6.....	71
Tabela 5.12- Índices de vibração global em velocidade no conjunto 8.....	73
Tabela 5.13- Potência dos conjuntos analisados.	75
Tabela 5.14-Energia perdida por desalinhamento.	76
Tabela 5.15-Comparativo de energia perdida por desalinhamento conjunto 7.	76

Sumário

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
FIGURAS	viii
TABELAS	xii
SUMÁRIO	xiii
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Organização da presente dissertação.....	3
2. Revisão da literatura	5
3. Conceitos Fundamentais.....	10
3.1. Radiação Térmica.....	10
3.2. Termografia: Aplicações	15
3.2.1. Manutenção	15
3.2.2. Medicina.....	18
3.3. Vibrações Mecânicas Aplicações.....	20
3.3.1. Manutenção preditiva com análise de vibrações	20
3.4. Alinhamento de Eixos	23
3.4.1. Tipos de desalinhamentos.	23
3.4.2. Principais Métodos de Alinhamento	24
3.5. Acoplamentos.....	30
4. Metodologia experimental.....	37
4.1. Local dos ensaios e equipamentos analisados.....	37
4.2. Instrumentação utilizada	39
4.3. Calibração	47
4.3.1. Calibração Termômetro de Contato e Termopares	47

4.3.2.	Calibração da Câmera Termográfica.....	50
5.	Resultados e discussões.....	52
5.1.	Análise das energias perdidas por desalinhamento	75
5.1.1.	Cálculo da energia perdida por desalinhamento nos conjuntos.....	75
6.	Conclusões e trabalhos futuros	77
6.1.	Conclusões	77
6.2.	Trabalhos futuros.....	77
7.	Bibliografia.....	79
Anexos.....		82
	Anexo 1- Características dos termopares tipo T.....	83
	Anexo 2-Análise de Erros	83
	Anexo 3-Equipamentos	86

1. Introdução

1.1.Motivação

Os equipamentos rotativos têm uma grande importância nas indústrias. Em alguns segmentos fazem parte diretamente do processo produtivo (petroquímica, papel e celulose, química, açúcar e etanol). Em outros ramos industriais são utilizados na área de utilidades (geração de energia, bombeamento de água e geração de ar comprimido).

Os equipamentos rotativos normalmente são composto por duas máquinas, um denominado motor e outra movida, e estas são unidas por um elemento chamado acoplamento. As motoras normalmente são motores elétricos, turbinas a vapor ou a gás, podendo ser também motores a combustão interna. As máquinas movidas são bombas centrífugas ou alternativas, compressores, geradores e máquinas específicas de processo tais como laminadores e máquinas de papel. Em alguns casos, entre a máquina motora e a movida tem-se um redutor ou um multiplicador de velocidade.

Um dos mais graves problemas que afetam as máquinas rotativas é o desalinhamento entre eixos, que dependendo dos índices pode provocar desgastes prematuros em rolamentos, sistemas de vedação, acoplamentos e eixos, podendo até ocasionar falhas inesperadas dos equipamentos e conseqüentemente a parada de sistemas produtivos. Com a elevada competitividade do mercado, há uma crescente preocupação em se manter os equipamentos durante a maior parte do tempo possível em bom estado de funcionamento. Assim sendo, a engenharia tem desenvolvido algumas técnicas de manutenção, tais como a manutenção preditiva que utiliza a coleta de dados nos equipamentos por meio de instrumentos e com base nos resultados coletados é feito um diagnóstico das condições dos equipamentos. Um exemplo disso são as técnicas como a análise de vibração (Figura 1.1) e alinhamento a laser (Figura 1.2), as quais são utilizadas com sucesso para detecção e correção de desalinhamento em máquinas rotativas.



Figura 1.1-Análise de vibração em um conjunto motor e bomba.



Figura 1.2-Alinhador a laser instalado em conjunto de motor e bomba.

A análise termográfica, cuja aplicabilidade na engenharia industrial e em outros campos do saber aumenta vertiginosamente à medida que essa técnica se populariza e os preços das câmaras termográficas tornam-se mais acessíveis, também tem despertado interesse no seu uso para medição de níveis de desalinhamento em máquinas rotativas, como uma técnica complementar aos procedimentos convencionalmente utilizados. Imagina-se que através de um histórico de imagens termográficas do acoplamento de uma máquina rotativa, conforme mostrado na Figura 1.3, possa-se relacionar os eventuais níveis de desalinhamento com o aumento de temperaturas no acoplamento. Assim, a motivação principal deste trabalho é verificar a potencialidade ou não do uso dessa técnica quando aplicada numa planta, considerando o seu regime normal de produção. Como forma de verificar essa potencialidade foram realizados testes comparativos com as técnicas de análise de vibração e de alinhamento a laser.

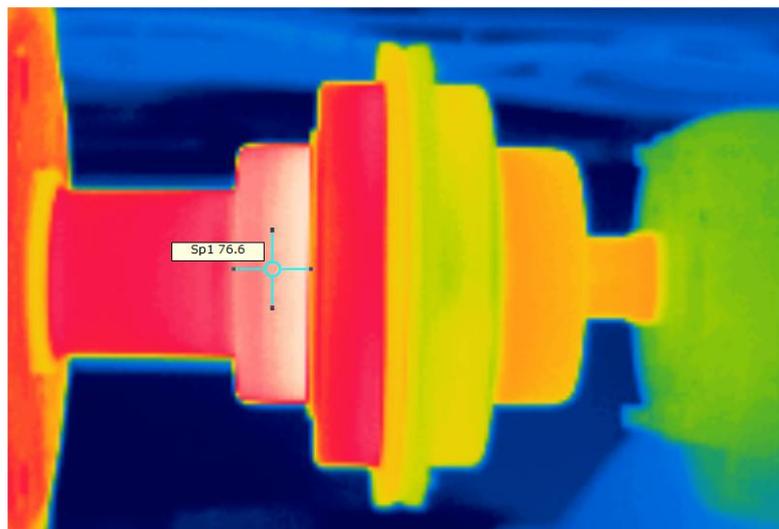


Figura 1.3-Imagem térmica de um conjunto de motor e bomba.

1.2. Objetivos

O objetivo principal desta dissertação foi avaliar e contribuir com informações técnicas a respeito da aplicabilidade da inspeção termográfica como ferramenta complementar de diagnóstico, em relação às técnicas de análise de vibração e de alinhamento a laser, em sistema de acoplamento de máquinas rotativas. Isso foi feito tendo como estudo de caso os conjuntos de motores elétricos e bombas centrífugas em uma indústria de açúcar e etanol do Estado de Pernambuco.

Para alcançar o objetivo principal aqui proposto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar análise termográfica nos conjuntos de motores e bombas centrífugas;
- Utilizar as técnicas de análise de vibração e alinhamento a laser para detecção e correção do desalinhamento dos mesmos conjuntos de motores e bombas centrífugas;
- Determinar os campos de temperatura dos acoplamentos presentes nos conjuntos de motores e de bombas centrífugas;
- Comparar os níveis de temperatura com o grau de desalinhamento dos conjuntos de motores e de bombas centrífugas;
- Verificar como o desalinhamento influencia o consumo de energia elétrica dos conjuntos de motores e de bombas centrífugas;
- Analisar o potencial da termografia como uma ferramenta para detecção de desalinhamento em conjuntos de motores e de bombas centrífugas.

1.3. Organização da presente dissertação

No Capítulo 1 foram definidos os objetivos específicos, motivação e estruturação da dissertação.

No Capítulo 2 apresenta-se uma revisão da literatura sobre os trabalhos de pesquisa na área de utilização da termografia no diagnóstico de desalinhamento em máquinas, perda de energia elétrica por desalinhamento, uso da análise de vibração como ferramenta para detectar desalinhamento em conjuntos de máquinas rotativas.

No Capítulo 3 são apresentados os princípios básicos da termografia, a análise de vibração e, o alinhamento de eixos e acoplamentos.

No Capítulo 4 descreve-se a metodologia experimental, os instrumentos usados durante a análise experimental bem como as técnicas de calibração utilizadas.

No Capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados da análise experimental realizada em uma indústria de açúcar e etanol.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho e as propostas para trabalhos futuros.

2. Revisão da literatura

Neste capítulo apresenta-se uma discussão acerca de trabalhos de pesquisa envolvendo os temas principais desta dissertação: utilização da termografia no diagnóstico de desalinhamento em máquinas, perda de energia elétrica por desalinhamento, e uso da análise de vibração como ferramenta para detectar desalinhamento em conjuntos de máquinas rotativas. A pesquisa foi realizada através de uma busca criteriosa de trabalhos publicados, contidos na base de periódicos do Portal CAPES.

Desalinhamentos de eixos causam perda de energia e sobrecargas nos rolamentos e em outras partes de máquinas rotativas acopladas. Xu et al. (1993) definem desalinhamento de máquinas como sendo a condição em que a linha de centro do eixo da máquina movida não coincide com a linha de centro da máquina motora. Desalinhamentos paralelos e angulares são os dois tipos básicos de desalinhamento de eixos e em problemas reais, o desalinhamento de eixo é uma combinação dos dois tipos nas direções vertical e horizontal. Utilizando a análise de torque, os autores desenvolveram um modelo teórico baseado no desalinhamento angular para calcular e quantificar a perda de potência em uma máquina rotativa acoplada. Nesse trabalho, a máquina motora foi um motor elétrico de indução e foi mostrada uma tabela onde são relacionados os custos anuais ao grau de desalinhamento angular de um equipamento em operação contínua. Ainda foram descritos os principais métodos de alinhamento com suas vantagens e desvantagens.

Xu e Marangoni (1994b) fizeram uma série de ensaios em uma bancada de testes para validar seus estudos teóricos. Nesse experimento foram efetuadas medições para casos de desalinhamento e desbalanceamento com dois tipos de acoplamentos diferentes e os resultados apresentam boa concordância com os resultados obtidos com o modelo teórico de Xu e Marangoni (1994a).

Piotrowski (1995) fez um estudo completo sobre desalinhamento e alinhamento de eixos. Nesse estudo, são discutidos os tipos de desalinhamentos, bem como os principais fatores que podem influenciá-los, tais como: fundações e bases, tubulações e dilatação térmica. Técnicas de detecção e de correção do desalinhamento e dispositivo para auxiliar durante o trabalho de alinhamento também são mostradas. A termografia foi usada para diagnóstico de desalinhamento, mostrando em gráficos e imagens termográficas que existe uma relação direta entre o aumento da temperatura e o aumento dos níveis de desalinhamento. Importa dizer que os ensaios foram feitos em vários tipos de acoplamentos.

Bortnem et al. (1995) realizaram uma série de ensaios utilizando uma câmera infravermelha para detectar o desalinhamento de um conjunto de motor/gerador. Durante os ensaios, ficou claro que existe uma relação linear entre o desalinhamento de eixos e o aumento de temperatura. Essa relação fez com que cada acoplamento e cada nível de desalinhamento tivessem uma imagem térmica distinta. Além do uso da termografia foram utilizadas técnicas de análise de vibração, ultrassom e alinhamento a laser. Foram testados sete tipos de acoplamentos em condições de alinhado 0,0005” e desalinhados em três níveis 0,005”, 0,010” e 0,020”. A carga no gerador foi colocada em 0%, 25%, 50% e 100%. Após os testes, foi possível compor um arquivo de imagens termográficas que se constituem em “assinaturas” e gráficos de barras relacionando índices de temperaturas com níveis de desalinhamentos para todas as condições acima descritas. Esse arquivo está disponível comercialmente no Infraspation Institute (<http://www.infraspation.com/>). Também ficaram comprovadas a praticidade e o baixo custo do uso da termografia na detecção do desalinhamento de máquinas rotativas.

A perda de energia por desalinhamento é dita da ordem de 15% por fabricantes de equipamentos para correções de desalinhamento e análise de vibração. Gaberson e Cappillino (1996) fizeram um estudo onde questionam esse percentual baseado no experimento que foi desenvolvido em uma bancada com base rígida, na qual foi montado um motor elétrico de 30HP acoplado a um gerador de 20KW conectado a um banco de cargas resistivas. Foram testados quatro tipos de acoplamentos comercialmente utilizados em instalações industriais: acoplamentos de borracha, de grade, engrenagem e lâmina. Os testes foram executados com o gerador sempre carregado com uma carga de 80%, enquanto os índices de desalinhamentos foram mantidos dentro das faixas aceitáveis e especificadas pelos fabricantes. Não houve perdas de energia mensuráveis, porém, com desalinhamentos acima dessas faixas, as perdas de energia chegaram ao máximo de 2,3%. No desbalanceamento, essas perdas são inferiores a 1%. Quando os índices de desalinhamento ficaram muito acima do permitido pelos fabricantes de acoplamentos, ocorreu um considerável aumento da temperatura ao longo dos eixos das máquinas movidas e motoras, assim com também no acoplamento. Esses aumentos de temperatura ficaram bem definidos nas imagens termográficas, comprovando, assim que o uso da termografia pode ser usado como ferramenta auxiliar na detecção de desalinhamento.

Hines et al. (1997) apresentaram um trabalho em que foi estudada a influência do alinhamento na eficiência dos motores elétricos. Vários autores afirmam que o aumento da eficiência energética com um alinhamento de precisão pode atingir um patamar de 15%.

Foram realizados testes em bancada em dois locais diferentes: um com um motor de 50HP acoplado a um dinamômetro de precisão na Universidade do Tennessee e outro de 60 HP também acoplado a um dinamômetro de precisão em um instituto americano de pesquisa (Oak Ridge facility). Em ambos foram testados desalinhamentos angular e paralelo, utilizando quatro tipos de acoplamentos flexíveis: grade, elastômero, lâminas e engrenagem. Durante os trabalhos, não foram evidenciadas alterações na eficiência do motor. O consumo de energia e a potência permaneceram constantes em relação ao desalinhamento quando esse ficou dentro da tolerância especificada pelo fabricante. Esse estudo de modo algum descarta a importância do alinhamento de precisão, porém, alerta-se que há outras variáveis, tais como: vibração mecânica, temperatura nos mancais e acoplamentos, ressaltando que as mesmas apresentaram aumento considerável com o desalinhamento. Durante o experimento, foi possível verificar que um desvio de apenas $\pm 0,01\%$ da potência de saída do motor era suficiente para aumentar os índices de temperatura e de vibração no motor elétrico. Esse aumento se deve às cargas geradas pelo desvio provocado pelo desalinhamento, cargas essas medidas através de um dispositivo montado no lugar dos rolamentos originais do motor elétrico.

Stephen et al. (1997) realizaram estudo experimental para avaliação da carga gerada por desalinhamentos e sobre a influência dessas cargas na vida útil dos rolamentos. Foram analisados quatro tipos de acoplamentos: de grade, elastômeros, lâminas e engrenagens em condições diferentes de desalinhamento angular e paralelo, todos no plano horizontal. Os rolamentos originais foram substituídos por um dispositivo composto por um anel, um rolamento de agulha e um sensor de carga. Esse estudo mostrou uma influência muito menor do desalinhamento angular na vida útil dos rolamentos e do acoplamento. Contudo, na realidade, o desalinhamento angular pode ter uma influência maior do que esse estudo sugeriu, pois não foram consideradas durante os experimentos as seguintes condições:

- 1- A medição das forças axiais;
- 2- A influência do desalinhamento angular na redução da vida útil do acoplamento.

Mcleod (2001) faz referência ao uso de termografia como ferramenta da manutenção preditiva para detecção de desalinhamento. Nesse artigo, é citado um exemplo de detecção de desalinhamento em uma bomba de condensado de um *chiller*. Ao medir os índices de desalinhamento com um alinhador a laser modelo *Rotaling da Pruftechnik*, detectou-se um desalinhamento angular vertical e paralelo. Foi programada, então, uma parada no equipamento para que o alinhamento fosse realizado. Após uma semana de alinhada e funcionando, a bomba quebrou, danificando a carcaça e os rolamentos. Durante a inspeção do

equipamento danificado observou-se que o alojamento dos rolamentos da bomba estava danificado por conta do tempo em que o equipamento esteve funcionando desalinhado. Fica claro que, mesmo detectando um desalinhamento com termografia e refazendo o alinhamento, é necessária uma inspeção no equipamento, pois as consequências da mudança de posição nos mancais de rolamentos, por conta do desalinhamento, podem a vir ser catastróficas para o equipamento.

Hili et al.(2005) desenvolveram um trabalho teórico onde apresentam um modelo matemático para o desalinhamento angular e paralelo e, usando esse modelo e comparando com um outro onde é utilizada a técnica de elementos finitos, comprovaram o aparecimento de harmônica no espectro de vibração quando o sistema está desalinhado. No desalinhamento angular há um pico na frequência de rotação do eixo e outro no dobro dessa frequência de rotação, enquanto que no desalinhamento paralelo ficaram evidentes picos nas harmônicas da rotação do eixo, ou seja, 2, 4, 6, 8, 10 vezes a frequência de rotação do eixo, com uma amplitude diretamente dependente da velocidade do eixo.

Análise de vibração é uma das técnicas primárias para monitoramento de máquinas rotativas, que tem no desbalanceamento e desalinhamento suas principais fontes de vibração. Jalan e Mohanty (2009) destacam a importância das máquinas rotativas na conjuntura atual das indústrias e apresentam, nesse trabalho, um método para diagnóstico precoce de falhas em máquinas, denominado de modelo baseado na técnica de geração de resíduo. Assim, foi desenvolvido um modelo matemático para a condição de desalinhamento paralelo e angular que foi validado com resultados experimentais gerados pelos mesmos autores. Ao final do trabalho, foi possível, com uma simples medição radial e utilizando o modelo proposto, identificar defeitos em rolamentos.

Nakhaeinejad, e Ganeriwala, (2009) desenvolveram estudos em bancada, onde constataram que o espectro de vibração e a forma de onda no tempo são ferramentas úteis para detecção do desalinhamento de máquinas rotativas. Observou-se, durante o experimento, que as harmônicas provocadas pelos desalinhamentos paralelo e angular aparecem entre 2 a 10 vezes a frequência de rotação de eixo. Essas medições dependem tanto do local onde são coletadas, como também da posição, rigidez e desenho estrutural do mancal, e essas variantes podem afetar sensivelmente essas harmônicas. Levando em consideração as forças axiais, há um destaque para as harmônicas de 3 e 5 vezes a frequência de rotação de eixo no desalinhamento angular, e de 3 e 6 vezes a frequência de rotação de eixo no desalinhamento paralelo.

A busca de novos métodos de diagnóstico precoce de falhas em máquinas que venham a auxiliar na manutenção preditiva de máquinas e equipamentos tem sido foco de estudos de vários pesquisadores na atualidade. Younus e Yang. (2010), apresentaram um estudo no qual propõem um novo método de diagnosticar desalinhamento, desbalanceamento e defeitos em rolamentos de máquinas rotativas utilizando imagens térmicas. O trabalho foi feito numa bancada experimental onde foram simulados defeitos de desalinhamento, desbalanceamentos e falhas em rolamentos. Nestas condições e nas condições normais de funcionamento, foram realizadas medições de vibração mecânica e, ao mesmo tempo, captura de imagens termográficas para posterior comparação. Os estudos mostraram ser promissora a utilização de imagens térmicas para detecção de problemas em máquinas rotativas.

3. Conceitos Fundamentais

Este capítulo tem como objetivo específico fazer uma revisão dos conceitos básicos de radiação térmica, termografia, vibração mecânica, alinhamento de eixos e acoplamentos, que são as quatro fontes básicas de conhecimentos utilizadas no desenvolvimento da dissertação.

3.1. Radiação Térmica

A radiação térmica é a energia emitida, na forma de radiação eletromagnética, por qualquer corpo com temperatura acima do 0 Kelvin ou zero absoluto (-273°C). Essa emissão é resultado das transições energéticas das moléculas, átomos e elétrons da substância que conformam o corpo, sendo a temperatura uma medida da intensidade dessa atividade no nível microscópico, aumentando com o incremento da temperatura do corpo.

No espectro eletromagnético, a radiação térmica ocupa a faixa de $0,4\ \mu\text{m}$ a $100\ \mu\text{m}$ conforme pode ser observado na Figura 3.1, e envolve uma parte da faixa da radiação ultravioleta, a radiação visível ($0,4\ \mu\text{m}$ a $0,75\ \mu\text{m}$) e a radiação infravermelha ($0,75\ \mu\text{m}$ a $100\ \mu\text{m}$). Embora não seja possível ao ser humano observar a radiação infravermelha a olho nu, como no caso da radiação visível, esta pode ser facilmente visualizada com a ajuda de uma câmera termográfica.

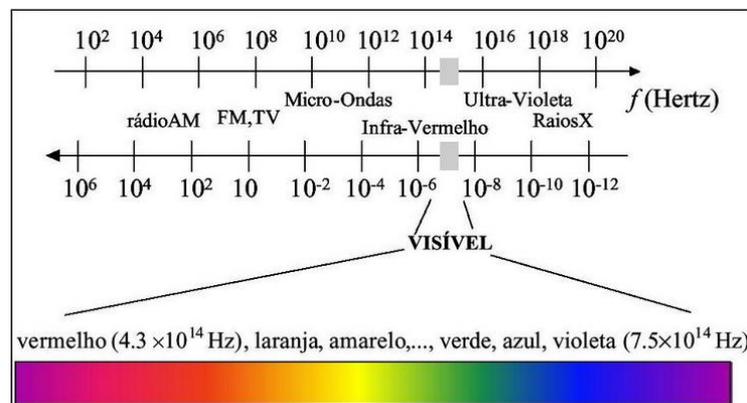


Figura 3.1 - Espectro eletromagnético [Vision].

Além da temperatura, a quantidade de energia radiante de um corpo depende da natureza do seu material e das características da sua superfície. Corpos de materiais diferentes em condições de temperaturas iguais emitem diferentes quantidades de energia radiante. Isto leva à seguinte questão: haverá um corpo de natureza especial que emita a maior quantidade de energia radiante possível a uma dada temperatura? A resposta a essa pergunta é que, teoricamente esse corpo existe e recebe o nome de “corpo negro”. Formalmente, um corpo

negro é definido como um emissor e absorvedor perfeito, e nenhum outro corpo consegue emitir ou absorver mais energia radiante do que um corpo negro a uma dada temperatura ou comprimento de onda. Pelas suas características especiais, ele emite radiação difusamente, o que significa que a emissão independe da direção ou que o corpo emite uniformemente em todas as direções.

Uma importante relação, conhecida como lei de Planck (Equação 3.1), foi desenvolvida e publicada por Max Planck em 1901 no *Annalen der Physik* (Modest, 2003). Essa relação representa o poder emissivo espectral de um corpo negro, o que corresponde ao fluxo de energia radiante emitido pelo mesmo a uma dada temperatura por unidade de tempo, por unidade de área superficial e por unidade de comprimento de onda.

$$E_{cn,(\lambda,T)} = \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T) - 1]}, \quad (3.1)$$

Em que:

$$C_1 = 2\pi h C_0^2 = 3,742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2;$$

$$C_2 = h C_0/k = 1,439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}.$$

$$C_0 = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}.$$

Onde, $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}$ é a constante universal de Planck, $k = 1,381 \times 10^{-24} \text{ J/K}$ é a constante de Boltzmann e C_0 é a velocidade da luz no vácuo.

A Figura 3.2 mostra a representação do poder emissivo espectral, também conhecido por distribuição de Planck.

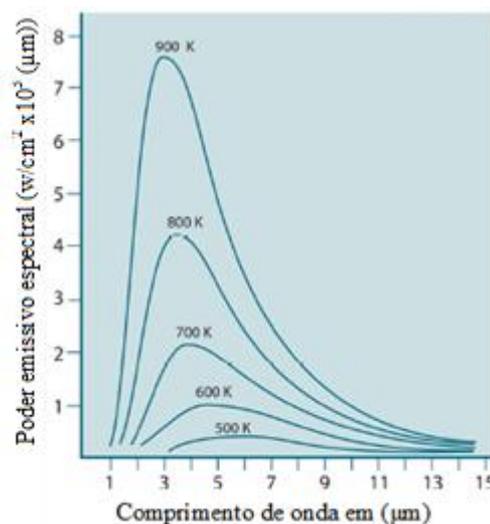


Figura 3.2 - Distribuição de Planck [Extraído de Incropera e Dewitt, (2008)].

Na distribuição espectral de Planck do corpo negro, há um máximo para cada comprimento de onda, e esse máximo depende da temperatura. Derivando-se a expressão da

lei de Planck em relação ao comprimento de onda (λ) com a temperatura mantida constante e igualando a zero o seu resultado, obtém-se a Equação 3.2, conhecida como lei de deslocamento de Wien.

$$\lambda_{max}T = C_3, \quad (3.2)$$

em que: $C_3=2898 \mu m.K$.

A lei de Wien estabelece uma proporcionalidade inversa entre o comprimento máximo de onda e a temperatura, ou seja, o poder espectral máximo é deslocado para o comprimento de ondas menores quando a temperatura aumenta. Esse comportamento é indicado pela linha tracejada na representação gráfica da distribuição de Planck, mostrada na Figura 3.3.

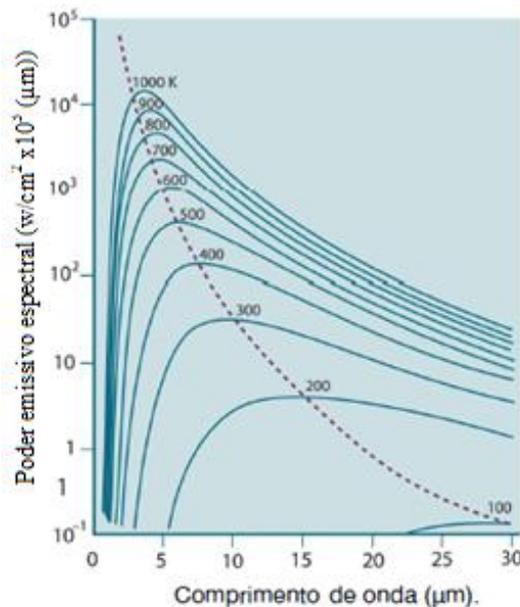


Figura 3.3 - Lei de Wien [Extraído de Extraído de Incropera e Dewitt, (2008)].

O poder emissivo total de um corpo negro pode ser encontrado integrando-se a equação da lei de Planck em todo o espectro eletromagnético (Equação 3.3).

$$E_{cn} = \int_0^{\infty} \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} d\lambda. \quad (3.3)$$

O resultado dessa integração é mostrado na Equação 3.4, que representa a lei de Stefan-Boltzmann. Esta mesma equação foi deduzida teoricamente por Ludwig Boltzmann em 1889, utilizando considerações termodinâmicas e, de forma independente, anteriormente, por Joseph Stefan em 1879, através de um estudo experimental.

$$E_{cn} = \sigma T^4 \quad W/m^2 \quad (3.4)$$

Onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann que assume o valor de $5,670 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$.

Essa lei, que relaciona o poder emissivo de um corpo negro com a temperatura elevada à quarta potência, permite calcular a quantidade total de radiação emitida pela superfície do corpo negro por unidade de área (em todas as direções e ao longo de todos os comprimentos de ondas) conhecendo-se apenas a sua temperatura.

A interação da radiação térmica com a matéria depende fortemente da natureza da radiação (comprimento de onda) e das características físicas do material. Por exemplo, a maioria dos materiais metálicos tem comportamento opaco à radiação térmica e, nesses casos, considera-se que a interação com a radiação é um fenômeno superficial onde a emissão e absorções de radiação ocorrem a uma distância de alguns angstroms (Å) da superfície. Em outras situações, por exemplo, com o vidro e a água, a absorção de radiação térmica de comprimentos de onda curta (radiação visível) é um processo volumétrico, pois a radiação penetra para camadas mais profundas ou mesmo atravessa o material. Por outro lado, o comportamento destes mesmos materiais à radiação infravermelha é a de um material opaco. Assim, materiais podem exibir comportamentos diferentes dependendo do comprimento de onda da radiação incidente. Logo, propriedades ópticas como emissividade, absorvidade, refletividade e transmissividade são dependentes do comprimento de onda e, portanto, tem comportamento espectral.

A emissividade de uma superfície representa a razão entre o poder emissivo da superfície a uma dada temperatura e o poder emissivo de um corpo negro à mesma temperatura. Dito de outro modo, a emissividade é uma propriedade que mede quanto um corpo real se afasta do comportamento de um corpo negro, e pode assumir valores entre zero e um. Essa propriedade não é constante, apresentando variação com a temperatura da superfície, o comprimento de onda e a direção da radiação emitida. Desse ponto de vista, pode-se definir a emissividade espectral direcional pela Equação 3.5, a qual resulta da razão entre a intensidade da radiação emitida por uma superfície real (numa dada temperatura, comprimento de onda e direção específica) e a intensidade de radiação de um corpo negro à mesma temperatura.

$$\varepsilon_{(\lambda,\theta,\phi,T)} = \frac{I_{(\lambda,\theta,\phi,T)}}{I_{\text{cn}}(\lambda,T)} \quad (3.5)$$

A relação da emissividade com o comprimento de onda tem uma forte dependência com o tipo de material em que a radiação é emitida, enquanto nos líquidos e gases existe uma

variação mais acentuada, nos sólidos as variações são mais suaves. Levando-se em conta a composição, nos metais a emissividade diminui com o comprimento de onda, enquanto que nos não metais acontece o inverso como mostra a Figura 3.4.

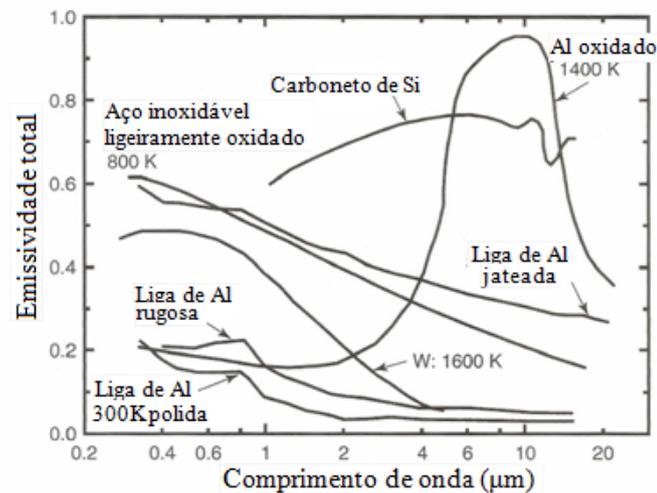


Figura 3.4 - Dependência da emissividade em relação ao material. Adaptado de Vollmer e Mollmann (2010).

No caso da temperatura, há uma diferente interligação com o tipo do material. Nos ametais a emissividade cresce com a temperatura de forma suave, nos outros tipos de materiais tem-se um decréscimo com o mesmo aumento de temperatura. A Figura 3.5 mostra essa distribuição para alguns materiais.

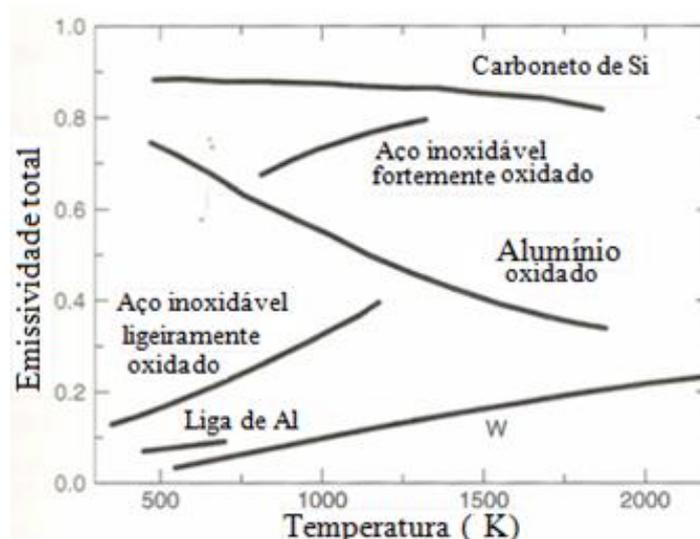


Figura 3.5-Varição da emissividade com a Temperatura. Adaptado de Vollmer e Mollmann (2010).

3.2. Termografia: Aplicações

Termografia é uma técnica de inspeção não destrutiva, que tem como base a detecção da radiação infravermelha, a qual é emitida por todos os corpos com temperatura acima do zero absoluto. A câmera termográfica capta a radiação infravermelha de três fontes, do objeto, do meio adjacente refletida no objeto e da atmosfera, o esquema de medição é mostrado na Figura 3.6.

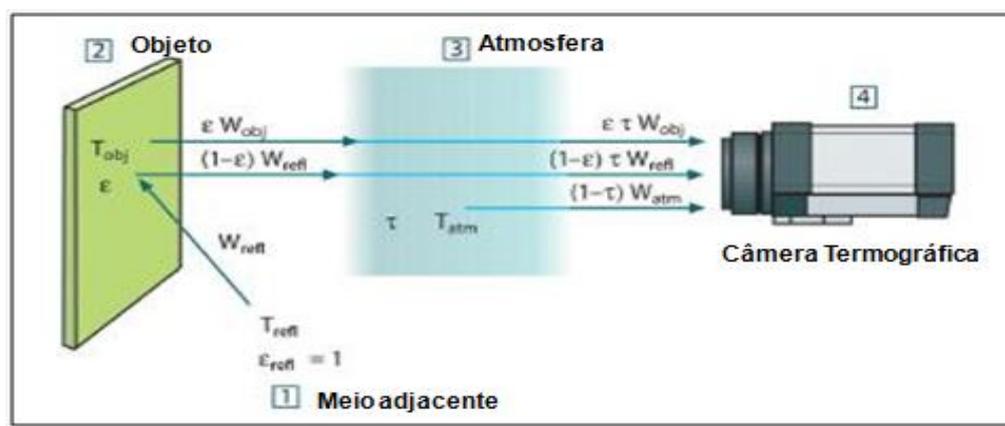


Figura 3.6 - Processo de medição pela câmera de infravermelho (1) Meio adjacente (2) Objeto (3) Atmosfera [adaptado de ThermoCam T-200, Manual do operador (2009)]

Hoje, com a facilidade de aquisição e o preço acessível das câmeras termográficas, os diversos segmentos da ciência, indústria, medicina e outras atividades têm desenvolvido trabalhos com imagens termográficas. A seguir, faz-se uma breve abordagem de algumas dessas aplicações.

3.2.1. Manutenção

Com a globalização e a melhoria da logística mundial, tornou-se de suma importância, e até vital, para que uma empresa seja competitiva nesse mercado, tanto a melhoria contínua dos processos de fabricação, como também a condição de funcionamento das máquinas e equipamentos (Hayrton, 2010). Isso visa a aumentar a produtividade, a diminuir os tempos de parada e a reduzir os custos de produção. Uma parte importante nesse processo de melhoria tem forte ligação com a qualidade da gestão da manutenção.

A manutenção, ao longo dos tempos, vem desenvolvendo ferramentas e técnicas para que cada vez mais se tenha confiabilidade no sistema produtivo. A manutenção preditiva, embasada na coleta e análise de dados, vem se destacando como um excelente sistema, pois se

utiliza de várias técnicas tais como análise de vibração (equipamentos rotativos), análise de óleo, ultrassom e ultimamente, vem-se utilizando imagens térmicas captadas com uma câmera termográfica (MRA Instrumentação, 2011), como mais uma ferramenta eficiente de análise e de diagnóstico, primeiramente utilizada no setor elétrico e, atualmente, em outros ramos da indústria.

- Aplicações em instalações elétricas

Nessa área, a termografia é uma ferramenta de grande utilidade, visto que a maioria das falhas em sistemas elétricos tem sua base no aumento de temperatura (Resende, 2010 e Niancang, 1998), causadas pela resistência à passagem de corrente elétrica. Esse efeito foi estudado primeiramente por um cientista inglês de nome James Prescott Joule, e é conhecido como o efeito Joule em sua homenagem. Esta dissipação de calor pode ser calculada pela Equação 3.21:

$$E = R \cdot I^2 \cdot \Delta T, \quad (3.21)$$

Onde:

E = Energia térmica (J).

R = Resistência do condutor (Ω).

I = Intensidade de corrente elétrica (A).

ΔT = Tempo da passagem da corrente (s).

O efeito Joule não é a única fonte de falhas em circuitos elétricos e/ou máquinas elétricas. Há também a folga mecânica (ligações folgadas ou mal apertadas), corrosão e oxidação dos terminais do circuito, subdimensionamento de cabos e outros.

A termografia é um excelente método para detecção de falhas em máquinas elétricas, pois diminui a exposição do técnico ao risco, assim como reduz a necessidade de paradas e desmontagem de equipamentos para uma inspeção dos mesmos. Contatos com aumento de temperatura em fases diferentes são mostrados na Figura 3.7.

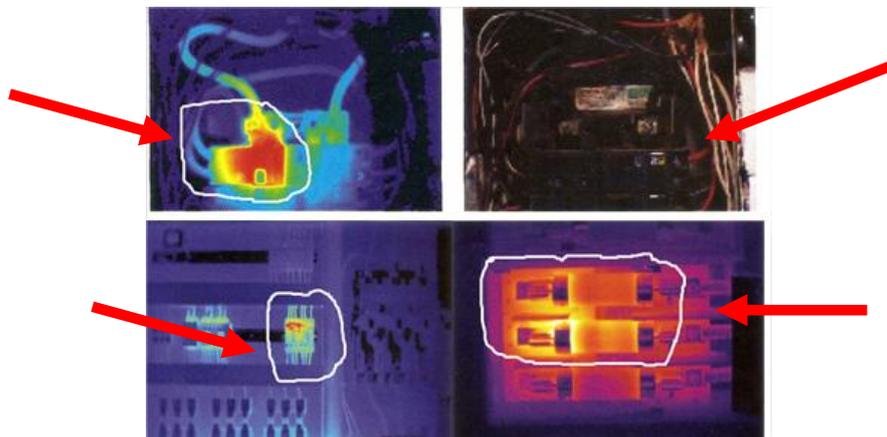


Figura 3.7 - Imagens térmicas de circuitos e componentes elétricos . Fluke -Technical Publishers, (2009).

Na atualidade, as empresas vêm utilizando a termografia como ferramenta de inspeção em redes de transmissão (Figura 3.8) sendo ela considerada a mais eficaz na previsão e detecção de falhas em equipamentos elétricos (Haddadnia e Rahmani, 1997).

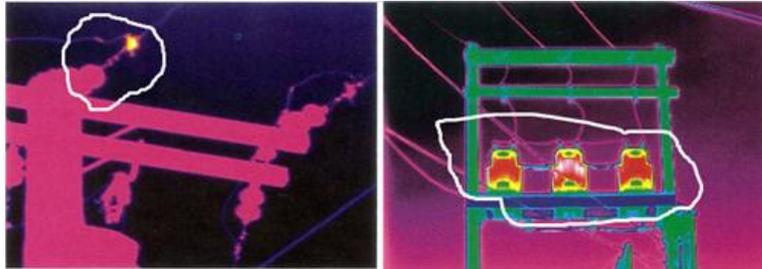


Figura 3.8 - Imagens de rede de transmissão. Fluke -Technical Publishers, (2009).

Monitoramento da condição da planta e manutenção preditiva

Durante o funcionamento, os componentes dos equipamentos mecânicos apresentam desgastes naturais, que, às vezes, são agravados por alguns fatores tais como má lubrificação (Figura 3.9), desalinhamento de eixos (Figura 3.10), montagens inadequadas, etc. Quando acontece o desgaste, normalmente é acompanhado de um aquecimento anormal que tende a aumentar antes da falha do equipamento conforme informado por Gaberson e Cappillino (1996) e Bortnem et.al. (1995). A termografia vem se mostrando uma ferramenta auxiliar na detecção desses desgastes, principalmente quando utilizada em conjunto com outras ferramentas, tais como análise de vibração e análise de óleo.

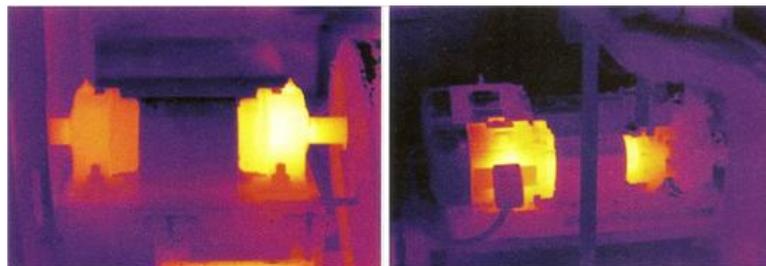


Figura 3.9 - Mancais com deficiência de lubrificação. Fluke -Technical Publishers, (2009).

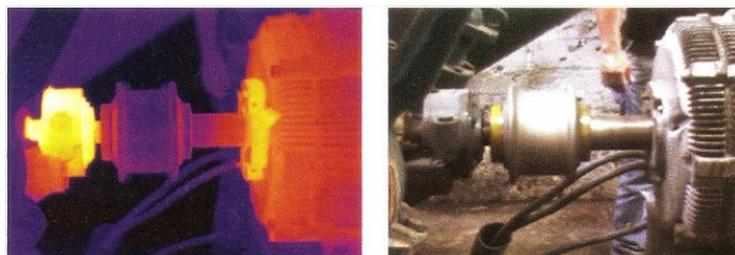


Figura 3.10 – Mancais com desalinhamento de eixos. Fluke -Technical Publishers, (2009).

Construção civil

Na construção civil, a termografia desempenha um papel de enorme relevância, principalmente na construção de edifícios, pois é uma ferramenta muito útil na resolução de problemas de isolamento térmico, na localização de fugas térmicas e de umidade internas (Figura 3.11), constituindo-se, assim, em uma ferramenta importante no estudo de perdas de eficiência energética (Fraga et al., 2009). Atualmente, na área da construção de edifícios, a eficiência energética desempenha um papel central, pois a energia consumida por habitações e edifícios de serviços representa uma parcela substancial do consumo energético em todo o mundo. A Figura 3.12 mostra a fachada de prédios com fuga de calor.

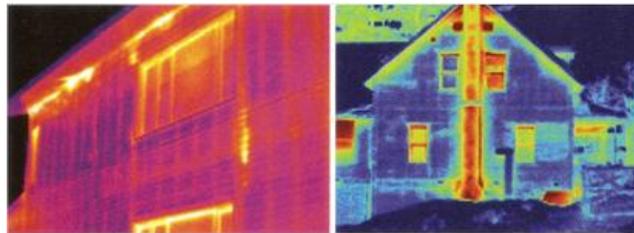


Figura 3.11 - Fachadas de prédios com problemas de infiltração. Fluke -Technical Publishers, (2009).



Figura 3.12 - Fachada de prédio com fuga de calor. Fluke -Technical Publishers, (2009).

3.2.2. Medicina

A termografia também pode ser usada para medir a distribuição de temperatura na pele de um paciente. A vantagem de sua utilização na área médica é de ser uma análise não invasiva e de não usar radiações ionizantes para a identificação de algumas doenças, possibilidade esta de detecção de diferentes patologias. O organismo humano controla a transferência de calor para o ambiente através da termorregulação, contraindo ou dilatando vasos que alteram a irrigação da pele. Esse órgão tem a sua circulação dependente do sistema nervoso autônomo e, saliente-se aqui, alterações na temperatura corporal têm forte relação com doenças.

Enquanto exames como raios-X ou ultrassom fazem uma análise da anatomia de determinada região do organismo, a termografia permite uma análise fisiológica. Doenças vasculares, distúrbios da tireoide, tendinites e nódulos mamários são patologias que alteram a perfusão sanguínea de uma região da pele e podem ser detectadas através de termogramas. A

Figura 3.13 mostra termogramas de diferentes patologias (Araujo et al, 2009), estendendo-se também para medicina veterinária. A Figura 3.14 mostra algumas aplicações nessa área.

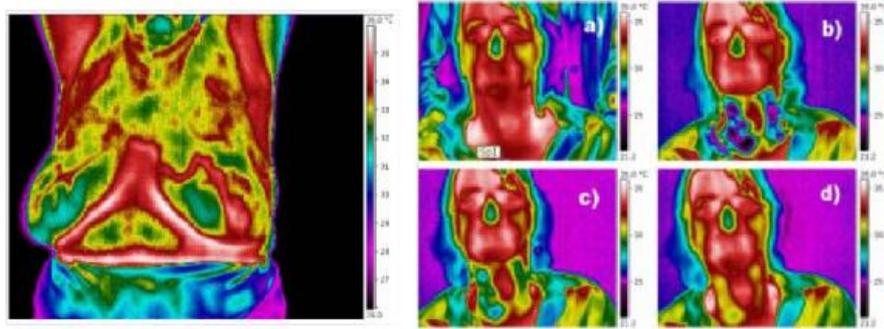


Figura 3.13 - Diferentes patologias Extraído de Araujo (2009).

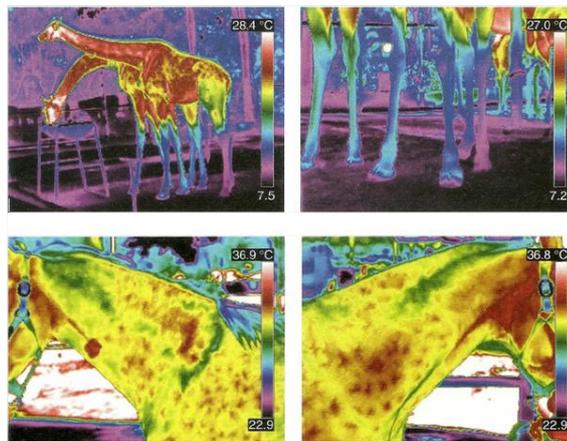


Figura 3.14 - Diversas aplicações na área da medicina veterinária. Extraído de Vollmer e Mollmann (2010).

3.3. Vibrações Mecânicas Aplicações

3.3.1. Manutenção preditiva com análise de vibrações

Sinais de vibração.

No cotidiano, encontram-se os sinais de vibrações compostos de várias frequências que ocorrem simultaneamente, e que podem ser analisados de duas maneiras:

- Amostragem amplitude versus tempo, onde é analisada a forma de onda no tempo;
- Espectro de frequência (transformada rápida de Fourier - FFT) onde são revelados os componentes existentes no sinal amplitude x tempo.

Dentre as principais causas de vibrações acentuadas podem-se destacar desbalanceamento de massa, desalinhamento, folgas mecânicas, baixa rigidez da estrutura, rolamento com defeitos (pista interna, externa, elemento girante e grade), além de folga excessiva em mancais de deslizamento. Para cada defeito citado, temos uma assinatura característica.

Através de uma medição periódica de determinados pontos nas máquinas e ou equipamentos, o analista de vibração tem a capacidade de prever, com um alto grau de confiabilidade, as condições em que se encontram, podendo com isso programar as intervenções, quando necessárias, e evitar falhas repentinas.

Esses sinais são captados por diversos tipos de equipamentos, desde simples medidores de índices de vibração global, os analisadores de vibração, aos mais sofisticados coletores de dados interligados com *software*.

Atualmente, há uma variedade de instrumentos para a coleta de dados de vibrações mecânicas. Os mais simples medem os índices globais de velocidade, temperatura, aceleração e envelope de aceleração (Figura 3.15) os intermediários são os analisadores que, além de fazer as medições dos índices de vibração, coletam e até armazenam espectros de velocidade e de aceleração (Figura 3.16). No topo dos instrumentos, temos os coletores de dados que, utilizando interface com softwares, podem coletar vários parâmetros de vibrações e até outros tipos de medições como temperatura e espectros de corrente elétrica (Figura 3.17).



Figura 3.15- Medidor portátil de vibração (SKF-Brasil).



Figura 3.16 - Analisador de vibração Fluke 810 (www.fluke.com).



Figura 3.17 - Coletor de dados SKF CX-CMXA 70 (SKF-Brasil).

Na manutenção preditiva, a análise de vibração vem ganhando seu espaço como uma ferramenta com um ótimo custo benefício, principalmente em indústrias que têm como base do seu processo equipamentos rotativos, tais como: indústria de papel e celulose, indústria de cimento, química e petroquímica, e, nos últimos anos, a agroindústria de açúcar e etanol. Dentro das técnicas usadas para análise de vibração à medição de níveis globais, análise de espectro, demodulação e envelope de aceleração têm seus destaques. No geral, a análise de vibração parte do pressuposto de que toda máquina tem seu índice de vibração, o qual é alterado caso ocorra alguma anomalia nos seus componentes.

Nesse caso, o controle do estado do equipamento é realizado tomando-se como base os valores globais de vibração medidos em um intervalo de frequência pré-determinado. Esses valores são comparados com valores estabelecidos por normas. Máquinas na faixa de 600 a 12000 vezes a frequência de rotação do eixo, utilizam como referência a norma ISO 2372, VDI 2056, e no Brasil a NBR 10082. Essas normas adotam os valores eficazes da velocidade de vibração, conhecido como, velocidade RMS do sinal, que é usado como a unidade de medida para identificação da severidade de vibração.

Em máquinas que giram a uma faixa de 60 a 1800 rpm e em máquinas especiais, tais como: grupos geradores a vapor ,turbinas a gás , máquinas hidroelétricas ou bombas hidráulicas, as normas técnicas, como a ISO 7919, escolhem a amplitude de deslocamento relativo eixo-mancal, como critério de severidade.

Os índices medidos em pontos pré-determinados, são comparados aos índices das normas verificando em que patamar a máquina se encontra. Estando essa na faixa de boas condições de funcionamento, o analista estabelece uma medição periódica para acompanhamento do equipamento, e, caso haja algum incremento repentino, será um sinal de mau funcionamento. Essa técnica de medição dos índices globais não oferece condições para um diagnóstico do que está ocasionando o incremento. Quando essa faixa alcançar um valor inaceitável, o equipamento deve ser parado e a manutenção deve ser feita.

Para o analista de vibração diagnosticar o que está causando aumento de vibração no equipamento, é necessária uma técnica com coleta de espectro de vibração, a qual requer um equipamento mais completo do que o utilizado na medição dos índices globais de vibração.

Com o espectro de vibração em velocidade, pode-se detectar algumas causas de aumento no incremento da vibração, Segundo Almeida e Almeida (2010), são caracterizados por:

1. Desbalanceamento, 1 vez a frequência de rotação do eixo.
2. Desalinhamento, 1, 2 e até 3 vezes a frequência de rotação do eixo.
3. Baixa rigidez estrutural e /ou folga mecânica 1 veze a frequência de rotação do eixo e seus harmônicos, também em sub-harmônicas e inter-harmônicas ($1/4x$, $1/2x$, $1\ 1/2x..$)
4. Rolamento com desgaste acentuado, 1 vez a frequência de rotação do eixo cresce muito e com ela, as muitas harmônicas do eixo (folgas).
5. Engrenamento com desgaste acentuado, frequência de engrenamento e seus harmônicos.

Com o espectro de vibração em aceleração, pode-se visualizar melhor as seguintes causas de incremento nos índices de vibração:

1. Defeitos em rolamento;
2. Defeitos em engrenamentos.

Com a utilização das ferramentas de demodulação, ou envelope de aceleração, pode-se não só identificar os defeitos em rolamentos como também localizar em qual dos elementos do rolamento ele está presente:

1. Pista interna;
2. Pista externa;
3. Elemento girante;
4. Grade.

3.4. Alinhamento de Eixos

O desalinhamento do eixo ocorre quando as linhas de centro de rotação de dois (ou mais) eixos de máquinas não estão em conformidade com o outro (Piotrowski, 1995). Segundo Xu et al. (1993) desalinhamentos paralelos e angulares são os dois tipos básicos de desalinhamento de eixos e em problemas reais, o desalinhamento de eixo é uma combinação dos dois tipos nas direções vertical e horizontal. De acordo com Jalan e Mohanty (2009) o desalinhamento de eixo e desbalanceamento de rotores são duas das principais causas de vibração em máquinas rotativas e ao atingirem níveis acima do permitido pelas normas eles podem causar sérios danos a estes equipamentos.

O alinhamento perfeito é quando se tem uma concentricidade entre as duas linhas de centro dos dois eixos em questão, e uma ortogonalidade entre seus planos de face. Na prática, esse tipo de alinhamento é difícil de ser alcançado, e, mesmo quando é alcançado está sujeito a alterações devido a alguns fatores tais como: incremento por dilatação térmica e acomodação estrutural (Xu et al., 1993). As tolerâncias de alinhamento dependem da rotação dos eixos, tipos de acoplamentos e dilatação térmica. O alinhamento de máquinas deve ser realizado dentro das tolerâncias especificadas pelo fabricante do equipamento e/ou acoplamentos.

3.4.1. Tipos de desalinhamentos.

Desalinhamento radial ou paralelo nos sentidos vertical e horizontal.

Ocorre quando as linhas imaginárias que passam pelos centros dos eixos estão separadas por certo gradiente de altura (sentido vertical) e de distância (sentido horizontal) entre as máquinas movida e motora, mas são paralelas entre si. Os esquemas dos alinhamentos acima citados são mostrados na Figura 3.18 (a, b).

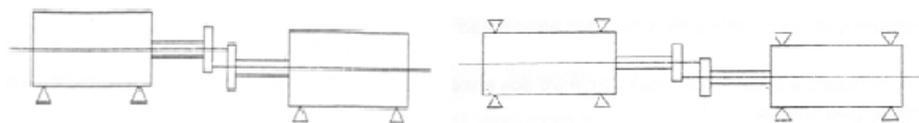


Figura 3.18 . a) Desalinhamento paralelo vertical. b) Desalinhamento paralelo horizontal

Desalinhamento angular ou axial nos sentidos vertical e horizontal.

Ocorre quando as linhas imaginárias que passam pelos centros dos eixos além de estarem separadas por certo gradiente de altura (sentido vertical) e de distância (sentido horizontal) entre as máquinas movida e motora, não são paralelas entre si (as linhas

imaginárias se cruzam no centro do acoplamento oposto). A Figura 3.19 (a, b) mostra os tipos de desalinhamentos acima citados.

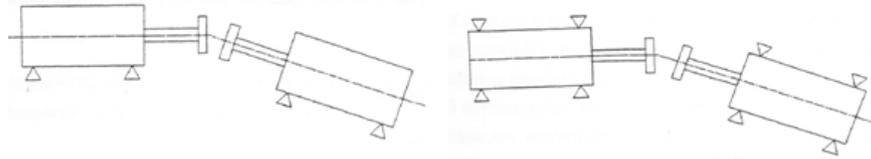


Figura 3.19 a) Desalinhamento angular vertical. b) Desalinhamento angular horizontal.

Desalinhamento combinado ou Offset no sentido vertical e horizontal .

Este ocorre quando as linhas imaginárias que passam pelos centros dos eixos além de estarem separadas por certo gradiente de altura (sentido vertical) e distância (sentido horizontal) entre as máquinas movida e motora, não são paralelas entre si (as linhas imaginárias se cruzam em um ponto fora do centro do acoplamento oposto). A Figura 3.20 (a, b) mostra os esquemas dos desalinhamentos acima descritos.

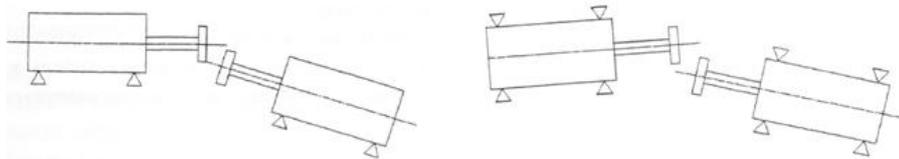


Figura 3.20 a) Desalinhamento combinado off-set vertical b) a) Desalinhamento combinado off-set horizontal.

3.4.2. Principais Métodos de Alinhamento

Existem vários métodos de alinhamento que são utilizados em máquinas rotativas, desde as mais simples com réguas e espaçadores aos mais sofisticados com relógios comparadores e, atualmente, o uso de equipamento dotado de laser.

- Régua /calibrador de folga (rudimentares);
- Com uso de relógios comparadores;
- Com uso de Codificador ótico;
- Com uso do laser.

O método com régua e calibrador de folga (por ser um método pouco preciso) como também o método com uso de codificador ótico (pouco usado), não serão mencionados, nesse trabalho. Abordaremos as técnicas com uso de dispositivo e de relógios comparadores, bem como as que utilizam equipamentos dotados de emissores a laser.

O método com relógio comparador utiliza dispositivo para fixação dos relógios (Figura 3.21). Existem no mercado mundial equipamentos que dispõem de software integrado em equipamento portátil para cálculo dos calços e compensações das diferenças durante o alinhamento, um exemplo é mostrado na Figura 3.22.



Figura 3.21 - Dispositivos de alinhamento com relógios comparadores (A-Line Manufacturing's).



Figura 3.22 - Dispositivo de alinhamento com relógios comparadores com computador (Accushim, Inc.)

Método Indicador Reverso

Este utiliza a medição de dois relógios nas faces dos acoplamentos, um na máquina motora outro na máquina movida, e o esquema de montagem do dispositivo é mostrado na Figura 3.23. Porém nada impede de ser usado um só relógio, desde que sejam efetuadas duas medições invertendo o conjunto com o relógio. As medições são realizadas, em quatro pontos norte (0:00h), sul (6:00h), leste (3:00h) e oeste (9:00h), esse método é bem utilizados em distância que variam de 3''(76,2mm) a 30''(762mm) (Piotrowski,1995).

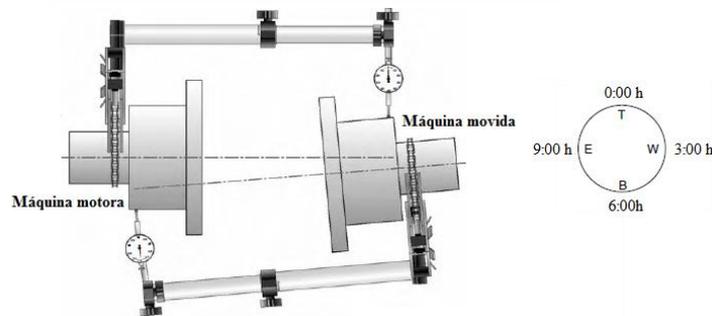


Figura 3.23 - Método indicador reverso (Piotrowski, 1995).

Vantagens:

- É mais preciso e pode ser usado em distâncias maiores do que o método face borda.

- Caso o eixo tenha um descolamento axial não há nenhuma alteração na leitura dos relógios.
- Precisão na leitura.

Desvantagens:

- Os eixos têm que girar ao mesmo tempo.
- Difícil visualização das leituras em algumas posições.
- A flecha do suporte deve ser medida e compensada nos cálculos dos calços.

Método Face e Aro

É um método que utiliza um relógio na face e outro no aro do acoplamento, ou em dispositivo colocado para leituras das medidas face aro, a montagem básica é mostrada na Figura 3.24. O relógio da face mede o desalinhamento angular no sentido horizontal (N, S) e vertical (L, O) o do aro mede o desalinhamento paralelo também nos dois sentidos, e é preciso fazer quatro medições como no método reverso, cada medição com 90° de deslocamento obedecendo aos pontos (0:00h), (6:00h), (3:00h) e (9:00h). A exatidão desse método depende do diâmetro do aro acima de $8''$ (Piotrowski, 1995) quando é obtida uma boa exatidão.

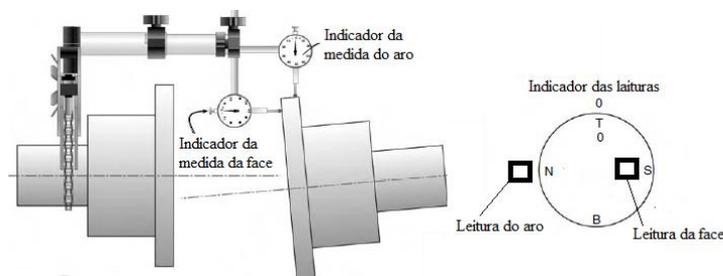


Figura 3.24 - Método face e aro (Piotrowski, 1995).

Vantagens:

- Pode ser utilizada quando um dos eixos não pode ser movimentado.
- Fácil entendimento das leituras paralela e angular.
- Esse método tem boa precisão quando as leituras podem ser tomadas em um diâmetro relativamente grande (igual ou acima de $8''$).

Desvantagens:

- Não é tão preciso quanto o método reverso.
- Nos casos em que exista um deslocamento axial do eixo há alterações na medida da face.

- A flecha do suporte deve ser mediada e compensada nos cálculos dos calços (Figura 3.25).

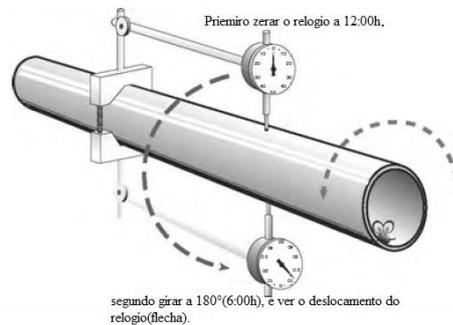


Figura 3.25 - Verificação da flecha do relógio comparador (Piotrowski, 1995).

Método Radial Duplo

Método pouco conhecido e só deve ser utilizado quando a distância entre pontos de medição exceder as 3'' (76,2mm). A precisão desse método aumenta conforme a distância entre pontos de medição aumenta (Piotrowski,1995). A montagem básica é mostrada na Figura 3.26.

Após a montagem do conjunto, que não precisa ter as duas medidas ao mesmo tempo, pode-se ler uma e depois a outra, desde que estejam em pontos próximos.

1. Zerar o relógio em 12:00h.
2. Deslocar o conjunto girando no intervalo de 90°, para em 3:00h, 6:00h e 9:00, anotar as medidas em cada ponto.
3. Voltar às 12:00 e ver se o relógio volta para o zero.
4. Repetir a medição de duas a quatro vezes.

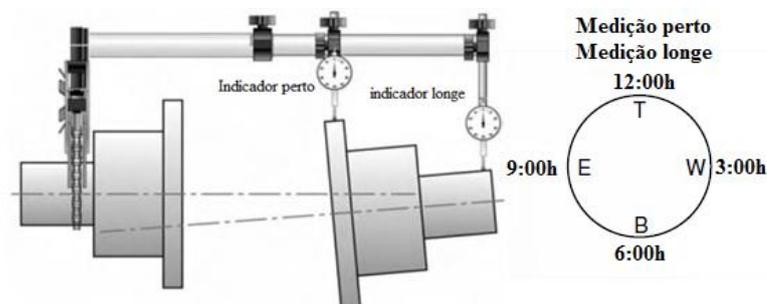


Figura 3.26 - Método radial duplo(Piotrowski, 1995).

Vantagens:

- É um bom método para ser usado quando os eixos das máquinas não podem ser girados, ou há dificuldade em rodar um eixo.

- É uma técnica para ser usada quando a leitura de perto e de longe podem ser separadas por um bom intervalo.
- Não sofre alteração que venha a comprometer os resultados das medições quando há deslocamento axial dos eixos.
- Pode ser configurada para medir uma superfície interna, como furo de alojamento de mancais.

Desvantagens:

- Não há superfícies do eixo expostas com comprimento suficiente para uma boa precisão.
- A flecha do conjunto tem que ser compensada.

Método Eixo com Espaçadores.

Existem situações onde as máquinas, movida e motora estão separadas por uma distância em que os métodos vistos acima não satisfazem as condições básicas para que se possa fazer o alinhamento, então esse método é recomendado quando a distância entre acoplamento começa a exceder as 30" (762mm) ou 40" (1016,00mm). Essa técnica pode ser usada em torres de resfriamento no sistema de ventilação, unidade de rolos secadores com junta universal na indústria de papel, sistema de eixo em veículos automotores, em turbina nos sistema de geração de energia e ou acionamento de compressores (Piotrowski ,1995). Para uma exatidão aceitável desse método, as distâncias dos pontos de fixação em cada acoplamento, em relação ao ponto de medição do relógio, devem ser de, pelo menos, 4" (101,60mm). Também pode ser usada a regra de manter essa distância em torno de 1/10mm, ou seja, se a distância entre o acoplamento for de 140" (3556,00mm), a distância mínima do ponto de fixação ao ponto de medição do relógio deve ser de 14" (355,6). A montagem básica é mostrada na Figura 3.27.

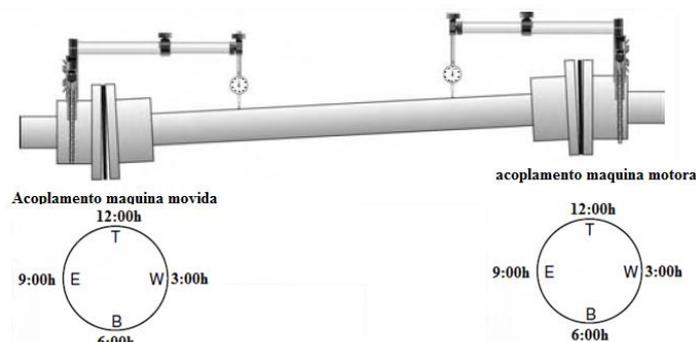


Figura 3.27 - Método eixo com espaçadores(Piotrowski, 1995).

Vantagens:

1. Talvez seja a técnica de medição mais precisa quando há grande distância entre as pontas de eixos.
2. Relativamente fácil de montar e de fazer as leituras.

Desvantagens:

1. Uma vez que o espaçador (também conhecido como “jackshaft” ou unidade de eixo”) deve ser mantido no lugar, ambos os eixos devem ser rodado em conjunto.

Método face-face.

Outro método usado em acoplamentos que têm grande distância entre si, mas é pouco usado, e sua precisão aumenta com o diâmetro da face onde é feita a medição (Piotrowski, 1995). A Figura 3.28 mostra a montagem básica.

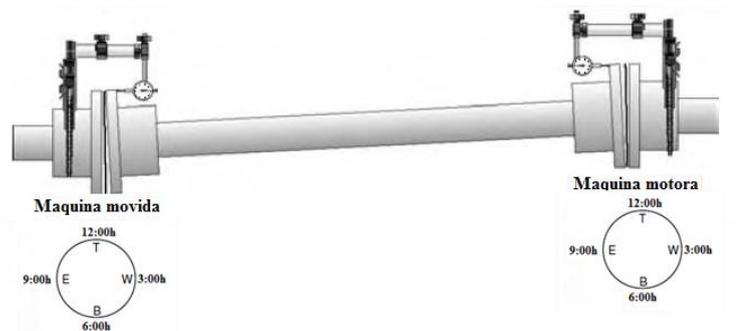


Figura 3.28 - Método face-face(Piotrowski, 1995).

Vantagens:

- Quando não é possível fazer a medição no eixo espaçador.
- Os dois eixos são projetados com uma diferença entre as linhas de centro.

Desvantagens:

- Não é tão preciso quanto o método eixo com espaçadores, principalmente em diâmetros pequenos.

Método usando alinhamento a laser

O primeiro sistema de alinhamento a laser foi utilizado em 1984 (Piotrowski,1995), a partir daí vem sendo comum sua utilização em diversos setores industriais, pela sua praticidade e fácil manuseio.

Esse método baseia-se em um emissor laser/receptor utilizando também um *software* para cálculo das correções e calços (Figura 3.29).



Figura 3.29 - Alinhamento a laser, turbogerador de 22MW.

Vantagens:

- Exatidão e rapidez nas medições.
- Não existem correções de flecha na medição.
- Fácil instalação e manuseio.

Desvantagens:

- Preço e fragilidade do equipamento.
- Sofre interferência em ambiente com forte incidência de luz solar e baixa visibilidade (ambiente com vapores).

3.5. Acoplamentos

Acoplamentos são elementos mecânicos usados para fazer a ligação entre os eixos ou árvores das máquinas rotativas.

Acoplamentos rígidos:

Não possuem qualquer flexibilidade, são torcionalmente rígidos não permitindo nenhum nível de desalinhamento, não absorvem choques ou vibrações, o que é ideal para transmissão de grande potência em baixa rotação.

Acoplamento rígido com flanges parafusadas: utilizado para acoplar árvores, melhor aplicação em transmissões de grande potência e baixa velocidade (Figura 3.30).

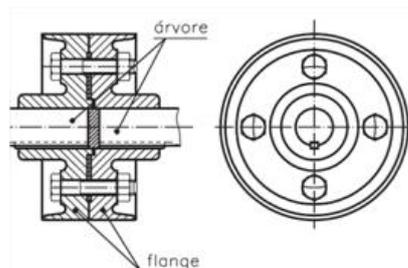


Figura 3.30 - Acoplamento rígido com flanges parafusadas (SENAI-FIEMG-2004).

Acoplamento com luva de compressão ou de aperto: esse tipo de acoplamento facilita a manutenção dos equipamentos, podendo ser montado e desmontado sem interferir no posicionamento das máquinas (alinhamento). Figura 3.31.

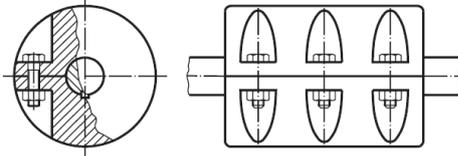


Figura 3.31 - Acoplamento com luva de compressão ou de aperto (SENAI-FIEMG-2004).

Acoplamento de discos ou pratos: utilizado em aplicações especiais, como, por exemplo, nas árvores de turbinas. As superfícies de contato podem ser lisas ou dentadas (Figura 3.32).

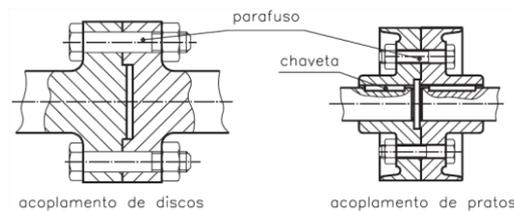


Figura 3.32 - Acoplamento de disco ou prato (SENAI-FIEMG-2004).

Acoplamentos flexíveis:

Tornam as transmissões mais suaves permitindo certos índices de desalinhamento vertical ou horizontal e combinado (Offset) nas posições, paralela e angular. Os elementos de transmissão podem ser de vários materiais tais como aço, borracha, polietileno.

Acoplamento elástico de pinos: os elementos de transmissão são pinos de aço com buchas de borracha (Figura 3.33).



Figura 3.33 - Acoplamento elástico de pinos (Soto-Filhos)

Acoplamento perflex: os discos de acoplamento são unidos perifericamente por uma ligação de borracha apertada por anéis de pressão. Esse acoplamento permite os maiores índices de desalinhamento entre os acoplamentos flexíveis (Figura 3.34).

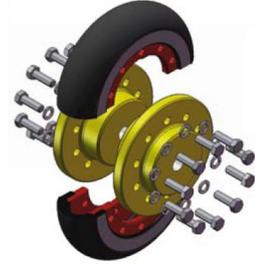


Figura 3.34 - Acoplamento perflex (Catálogo do fabricante Antares).

Acoplamento elástico de garras: os elementos de transmissão de rotação são estruturas de borrachas. Ver Figura 3.35.



Figura 3.35 - Acoplamento elástico de garras (Soto-Filhos).

Acoplamento elástico de fita de aço: os flanges são ranhurados onde se encaixam grade em aços, esses acoplamentos necessitam de lubrificação à graxa (Figura 3.36).



Figura 3.36 - Acoplamento elástico de fita de aço (Manual do fabricante Falk).

Acoplamento de engrenagem: os flanges são engrenagens de dentes retos externos onde se encaixa uma luva com dentes retos internos, esses acoplamentos são torcionalmente rígidos. Ver Figura 3.37.



Figura 3.37 - Acoplamento de engrenagem (Manual do fabricante Falk).

Os conjuntos de motor e bombas estudados utilizam quatro tipos de acoplamentos flexíveis, esses acoplamentos permitem desalinhamentos segundo as posições mostradas na Figura 3.38.

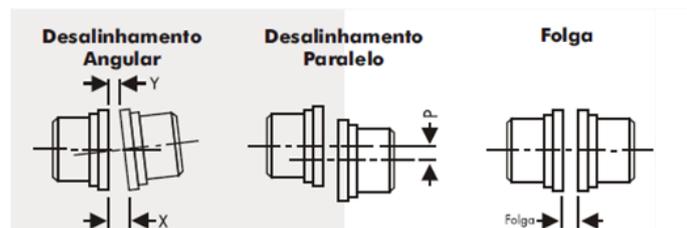


Figura 3.38 - Posicionamentos dos desalinhamentos e folga (gape) (Manual do fabricante Falk).

1-Acoplamento flexível marca Falk MOD 13F e MOD 14F (Figura 3.39). Os índices de desalinhamento máximo são mostrados na Figura 3.40.

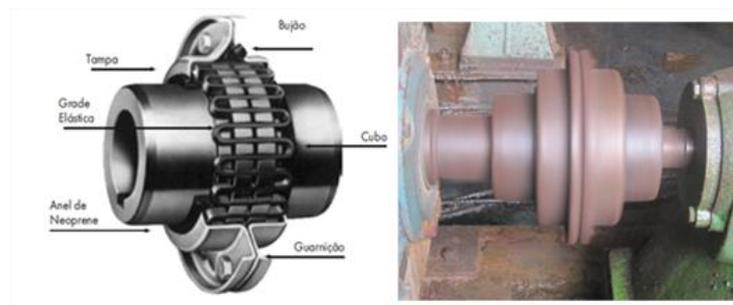


Figura 3.39 - Acoplamento Falk Mod.13 e Mod.14.

DIMENSÕES (mm)											
TAM.	Furo Min.	Furo Max.	Grades		Folga			Alinhar dentro de (mm)		Qtde. de Graxa (Kg)	Qtde. de Parafusos (Un)
			Nº Camadas	Nº Segm. Por Camadas	Mín.	Normal	Max.	X-Y	P		
13F	108	2	2	1,6	4,8	9,5	0,30	0,30	0,341	8
14F	50,8	118	2	2	1,6	6,3	12,7	0,30	0,30	0,681	8

Figura 3.40 - Índices de desalinhamento máximo e folga acoplamento 13F e 14F (Adaptado manual do fabricante Falk).

2-Acoplamento flexível marca Falk MOD 1090T (Figura 3.41). Os valores do desalinhamento máximo são mostrados na Figura 3.42.



Figura 3.41 - Acoplamento Falk Mod. 1090 T.

DADOS PARA INSTALAÇÃO * (medidas em milímetros)						
TAMANHO	Folga	Limites de alinhamento		Torque de aperto/paraf. (kgf x m)	Rotação (rpm)	Peso da graxa (kg)
		Paralelo (máx)	Angular (máx)			
1090T	3,2	0,20	0,18	2,30	3600	0,25

Figura 3.42 - Índices de desalinhamento máximo e folga acoplamento 1090T(Adaptado manual do fabricante Falk).

3-Acoplamento flexível marca Antares MOD 90D (Figura 3.43). Os valores do desalinhamento máximo são mostrados na Figura 3.44.



Figura 3.43 - Acoplamento Antares Mod. AT 90.

Modelo e dimensões em "mm"	d1	d2	S	GAP Máximo*	l1	l2	l3	d5	d6	Tolerância de alinhamento - mm		Torque de ajuste dos parafusos - Kgm	
										Axial	Radial	Instalação	Após 24h
AT 90	218	116	90	170	250	80	188	300	180	-2	1	5	6

Figura 3.44 - Índices de desalinhamento máximo e folga acoplamento Antares 90D(Adaptado do catálogo do fabricante).

4-Acoplamento flexível de pinos MOD D-15 fabricado na própria indústria (Figura 3.45). Os valores do desalinhamento máximo são mostrados na Figura 3.46.

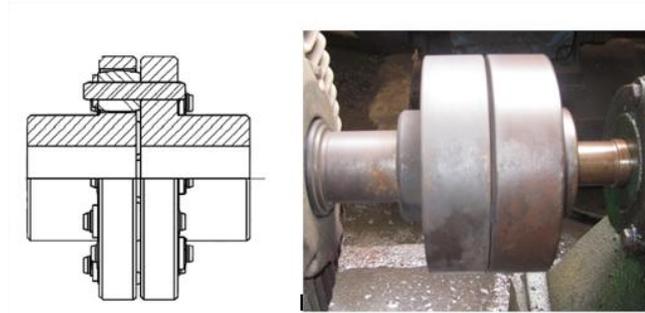


Figura 3.45 - Acoplamento pinos Mod. D-15 .

Tamanho	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	$\frac{N}{n} \times F$	Mt (mkgf)	GD ² (kgf.m ²)	rpm máx. (*)
D - 13	10 ± 2	0,8 máx.		1	720	5,5923	1700
D - 15				2	1430	17,650	1300
D - 17	12 ± 2			4	2860	49,250	1000
D - 18				5,6	4000	85,205	850

Figura 3.46 - Índices de desalinhamento máximo, acoplamento D-15(Adaptado do manual Ameridrive).

Existem situações em que não se tem referências do acoplamento para uma consulta ao manual do fabricante de acoplamentos, desta forma, uma boa prática é consultar tabelas fornecidas por fabricantes de alinhadores a laser. As Figura 3.47 e 3.48 mostram um exemplo de tabelas do fabricante de alinhadores Prufteknik, que tem como parâmetro a rotação dos equipamentos.

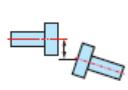
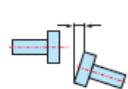
	[RPM]	metric [mm]		inch [mils]	
Soft foot	any	0.06 mm		2.0 mils	
Short "flexible" couplings Offset 		Acceptable OK	Excellent 😊	Acceptable OK	Excellent 😊
	600			9.0	5.0
	750	0.19	0.09		
	900			6.0	3.0
	1200			4.0	2.5
	1500	0.09	0.06		
	1800			3.0	2.0
	3000	0.06	0.03		
	3600			1.5	1.0
	6000	0.03	0.02		
	7200			1.0	0.5
Angularity (coupling gap difference per 100 mm or 10" diameter 	600			15.0	10.0
	750	0.13	0.09		
	900			10.0	7.0
	1200			8.0	5.0
	1500	0.07	0.05		
	1800			5.0	3.0
	3000	0.04	0.03		
	3600			3.0	2.0
	6000	0.03	0.02		
7200			2.0	1.0	

Figura 3.47 - Níveis de desalinhamento combinado e angular (Optalin Smart-Operatin Handbook 2008).

	[RPM]	metric [mm]		inch [mils]	
		Acceptable OK	Excellent 😊	Acceptable OK	Excellent 😊
	Spacer shafts and membrane (disk) couplings Offset (per 100 mm spacer length or per inch of spacer length)	600			3.0
	750	0.25	0.15		
	900			2.0	1.2
	1200			1.5	0.9
	1500	0.12	0.07		
	1800			1.0	0.6
	3000	0.07	0.04		
	3600			0.5	0.3
	6000	0.03	0.02		
	7200			0.3	0.2

Figura 3.48 - Níveis de desalinhamento combinado/ diâmetro de luva 100mm (Optalin Smart-Operatin Handbook 2008)

Nos acoplamentos rígidos, o desalinhamento, mesmo pequeno, provoca quebra dos parafusos e desgaste nos flanges.

Nos flexíveis, o desalinhamento fora dos limites indicados para cada tipo de acoplamento, causa flexão e ruptura por fadiga das grades elásticas e o desgaste dos cubos na região de contato com as grades. A Figura 3.49 mostra o desgaste em um cubo do acoplamento Falk tipo 13F.



Figura 3.49 - Acoplamento de grade danificado por desalinhamento .

Os acoplamentos são os componentes (elementos de máquinas) que mais sofrem com o desalinhamento, sendo, em alguns casos, fusíveis do conjunto.

4. Metodologia experimental

4.1. Local dos ensaios e equipamentos analisados

O presente estudo foi realizado utilizando-se uma análise experimental no sistema de acoplamentos de oito conjuntos de motores elétricos e de bombas centrífugas. A Figura 4.1 mostra um esquema de localização dos conjuntos que estão instalados em uma indústria produtora de açúcar e etanol estabelecida no município de Araçoiaba-PE. Esses conjuntos (Figura 4.2) fazem parte diretamente do processo de fabricação do açúcar, são formados por motores de indução trifásicos e por bomba centrífuga KSB ETA 300-35. Durante a análise, foram coletadas imagens termográficas de forma a verificar através de uma análise comparativa a aplicabilidade da termografia na detecção de desalinhamento de máquinas rotativas.

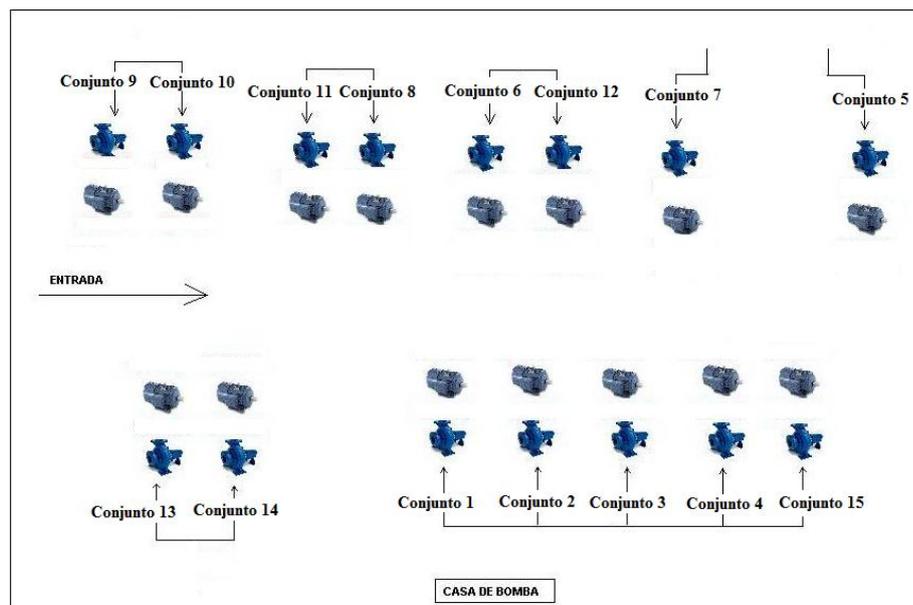


Figura 4.1 - Esquema de localização dos conjuntos motores e bombas .

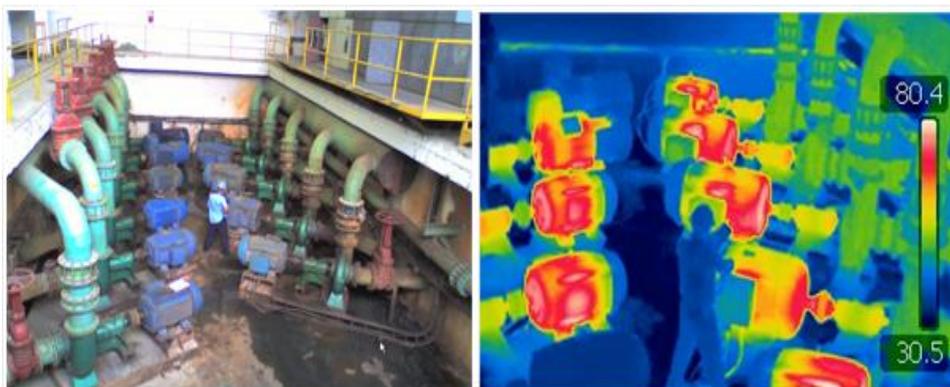


Figura 4.2 – Local de instalação dos conjuntos motores e bombas.

A Tabela 4.1 mostra a relação dos conjuntos investigados neste trabalho.

Tabela 4.1- Relação dos conjuntos da análise experimental.

Identificação	tipo da bomba	Motor elétrico (fabricante - modelo - potência)
Conjunto 01	KSB ETA 300-35	WEG - 315 S/M - 250cv/246,50hP
Conjunto 02	KSB ETA 300-35	WEG - S.355 M/L - 250 cv/246,50HP
Conjunto 03	KSB ETA 300-35	WEG - 355M/L - 300cv/295,80HP
Conjunto 04	KSB ETA 300-35	WEG - 355M/L - 300cv/295,80HP
Conjunto 05	KSB ETA 300-35	EBERLE - HGF 315 - 300cv/295,80hp
Conjunto 06	KSB ETA 300-35	WEG - 315 S/M - 250cv/246,50hP
Conjunto 07	KSB ETA 300-35	EBERLE - HGF 315 - 300cv/295,80hp
Conjunto 08	KSB ETA 300-35	WEG - 315 S/M - 250cv/246,50hP

A bomba KSB ETA 300-35 (Figura 4.3) é indicada para bombeamento de líquidos limpos e turvos e tem sua aplicação preferencial em abastecimento de água para indústrias, serviços públicos, em irrigação, na circulação de condensados e de óleos térmicos. É uma bomba horizontal, bipartida radialmente, com um estágio de simples sucção horizontal e descarga vertical para cima. Tem rotor fechado com diâmetro máximo de 300 mm. Ela utiliza dois rolamentos, um de esfera referência 6411C3 do lado LA, e o outro de esfera com contato angular referência 7313 do lado LOA (Manual do fabricante KSB).



Figura 4.3 - Bomba ETA KSB (Fonte: Manual técnico do fabricante KSB).

Os motores elétricos que acionam os conjuntos, são de indução trifásico (Figura 4.4). O motor elétrico de indução é fundamentalmente composto de duas partes: estator e rotor.



Figura 4.4 - Motor elétrico de indução trifásico (Extraído do Manual do fabricante WEG).

Estator:

- Carcaça (1): é a estrutura suporte do conjunto de construção robusta construída em ferro fundido, aço ou alumínio injetado, resistente à corrosão e, normalmente tem aletas.
- Núcleo de chapas (2): construído com chapas de aço magnético.
- Enrolamento trifásico (8): três conjuntos de bobinas iguais, um para cada fase, formando um sistema trifásico equilibrado ligado à rede de alimentação.

Rotor:

- Eixo (7): transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor.
- Núcleo de chapas (3): as chapas possuem as mesmas características das chapas do estator.
- Barras e anéis de curto-circuito (12): são de alumínio injetado, sob pressão numa única peça.

Outras peças do motor de indução trifásico:

- Tampa (4): fecha o conjunto, normalmente aloja os rolamentos.
- Ventilador (5): junto com as aletas forma um conjunto de resfriamento, que mantém a temperatura para qual o motor foi projetado.
- Tampa defletora (6): capta e direciona o ar externo.
- Caixa de ligação (9).
- Terminais (10).
- Rolamentos (11).

4.2. Instrumentação utilizada

Coletor de vibrações portátil

O coletor de vibrações portátil da Brüel & Kager, modelo 2526, foi utilizado na coleta de dados de vibrações mecânicas (Figura 4.5).



Figura 4.5 – Coletor de dados B&K, modelo 2526.

O coletor utiliza o *software* Sentinela versão cinco da própria Brüel & Kager que decodifica, transfere e armazenam os dados. Os dados são tratados digitalmente para que possam ser feitas as análises dos valores globais de velocidade e espectros de vibração utilizados durante a análise experimental.

Os valores globais e os espectros de vibração utilizados durante este trabalho foram medidos conforme as seguintes faixas:

- Global de velocidade medida na faixa de frequência 10 a 1000Hz expressa em mm/s.
- Espectro de velocidade medido na faixa de frequência 10 a 200Hz.

O acelerômetro utilizado é do modelo 4391(série industrial), de fabricação também da Brüel & Kjaer . Ele possui as seguintes especificações:

- Tipo “ Delta Shear”.
- Base isolada e conexão de topo rascada de 7/16” - 28 tipo UNEF – 2ª;
- Massa: 16 gramas.
- Sensibilidade: diferença de potencial de 6,67 mV/G ou carga $9,84 \pm 2\%$ pC/G na frequência de 159,2Hz e a 25°C (G é a aceleração da gravidade, aqui assumida $9,81 \text{ m/s}^2$).
- Limite de frequência : 12 kHz $\pm 10\%$.

A curva de calibração típica do acelerômetro B&K 4391 é apresentada na Figura 4.6.

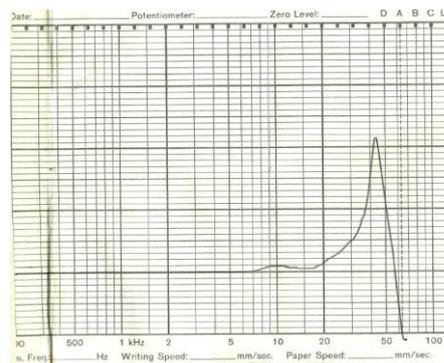


Figura 4.6 - Curva de calibração acelerômetro B&K 4391(Bruel & Kjaer 2006).

O coletor tem uma exatidão de resolução de $\pm 0,01 \text{ mm/s}$ e uma resolução de medição de $\pm 2\%$, resultando em uma incerteza combinada de $\pm 2\%$ da escala de medição.

Foram medidos dois pontos no motor elétrico e dois na bomba, em cada conjunto analisado. Conforme mostrado no esquema da Figura 4.7.

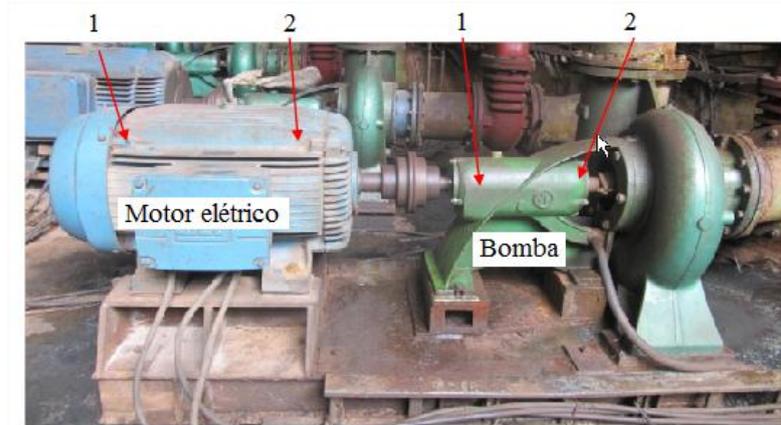


Figura 4.7 - Posição dos pontos de medição da análise de vibração.

Cada ponto medido tem três sentidos: H-horizonta, V-vertical e A-axial, conforme mostrados na Figura 4.8.

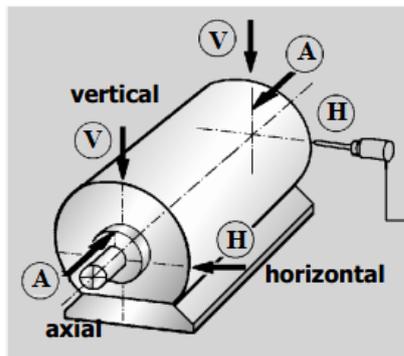


Figura 4.8 - Representação dos sentidos em cada ponto de medição .

Termômetro de Contato GTH 1160

O termômetro de contato GTH 1160 (Figura 4.9) com exatidão de $1\% \pm 1$ dígito, e resolução de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ para a faixa de temperatura de -20 a $+550^{\circ}\text{C}$, tem uma incerteza combinada de medição de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.



Figura 4.9 - Termômetro de contato GTH 1160.

Esse instrumento foi utilizado para medição de temperatura na casa de bombas em várias posições:

- Temperatura próxima à bomba (Figura 4.10).
- Temperatura próxima ao acoplamento (Figura 4.11).
- Temperatura próxima ao motor elétrico (Figura 4.12).
- Temperatura entre os conjuntos (Figura 4.13).



Figura 4.10 - Temperatura próxima à bomba.



Figura 4.11 - Temperatura próxima ao acoplamento.



Figura 4.12 - Temperatura próxima ao motor elétrico .



Figura 4.13 - Temperatura entre conjuntos.

Com a medição destas temperaturas, foi possível ter uma noção do campo de temperatura em todo o ambiente onde estão instalados os equipamentos, que foram analisados durante esse trabalho. Essas temperaturas foram utilizadas na configuração dos parâmetros da câmara termográfica antes de fazer as imagens. As temperaturas, descritas na Figura 4.14, seguem a denominação a seguir:

- T_b = temperatura próxima à bomba.
- T_m = temperatura próxima ao motor elétrico.
- T_a = temperatura próxima ao acoplamento.
- T_{cd} = temperatura entres os conjuntos (com c e d = 1,2,3.....14).

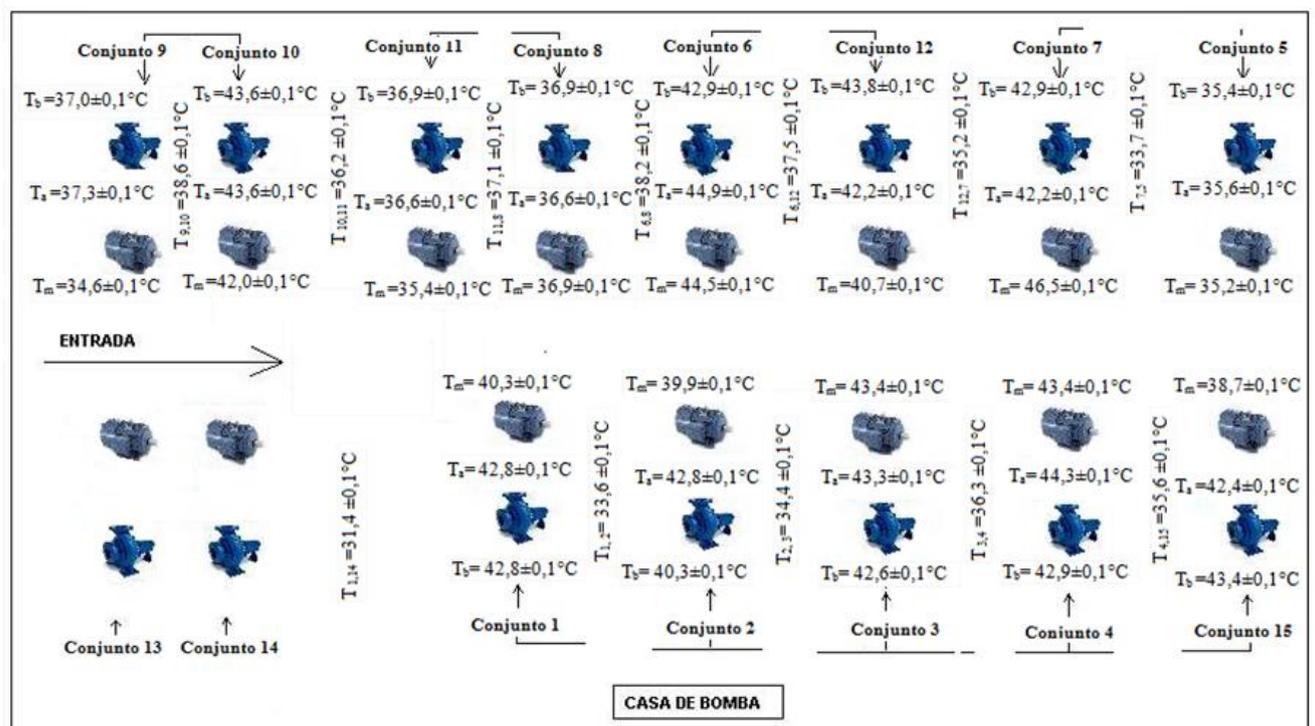


Figura 4.14 - Campo de Temperatura ao redor dos conjuntos analisados.

Termopares tipo T

Os termopares tipo T, numerados de 01 a 05 e conectados ao Daqpro 5300 (Figura 4.15) com exatidão de $\pm 0,5$ °C para a faixa de -50 – 50 °C, e $\pm 0,5\%$ para a faixa de 50 a 400 °C, e compensação de $\pm 0,3$ °C para a junção fria, foi utilizado para medir a temperatura do conjunto 05. Através dessas temperaturas, foi possível determinar a emissividade dos componentes envolvidos nesse estudo, assim denominados:

- Eixo da bomba (1).

- Cubo do acoplamento do lado da bomba (2).
- Tampa do cubo do lado da bomba (3).
- Tampa do cubo do lado do motor elétrico (4).
- Cubo do acoplamento do lado (5) do motor elétrico.
- Eixo do motor elétrico (6).



Figura 4.15 - Daqpro 5300.

A Figura 4.16 indica a posição dos pontos acima descritos e numerados.

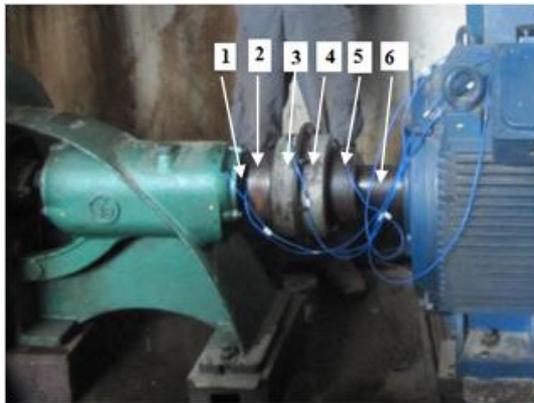


Figura 4.16 - Pontos de medição de temperatura .

. Cálculo da emissividade dos elementos mostrados na Figura 4.16.

Com as medições de temperaturas nos locais indicados na Figura 4.16, obtidas com os termopares, foi possível determinar a emissividade de cada elemento analisado. O procedimento adotado para a determinação das emissividades das partes numeradas de 1 a 6 nos conjuntos foi:

- Instalar os termopares nos lugares referenciados conforme numeração.
- Medir a temperatura local de cada ponto, com os termopares.

- Fazer uma imagem térmica do conjunto.
- Ajustar a emissividade na câmera termográfica para cada ponto até a temperatura se igualar à temperatura medida pelo termopar.

Os resultados são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Emissividade calculada

Posição	Termopar °C	Câmera Infravermelha °C	Emissividade
1	32,50 ± 0,8	34,74 ± 1,2	0,60
2	32,40 ± 0,8	34,66 ± 1,2	0,61
3	32,10 ± 0,8	34,37 ± 1,2	0,61
4	32,20 ± 0,8	34,46 ± 1,2	0,70
5	32,30 ± 0,8	34,51 ± 1,2	0,70
6	32,50 ± 0,8	34,74 ± 1,2	0,70
7	32,60 ± 0,8	34,86 ± 1,2	0,60
8	32,40 ± 0,8	34,67 ± 1,2	0,60

Câmera termográfica

A câmera termográfica utilizada durante este trabalho é do fabricante Flir, modelo T-200, mostrada na Figura 4.17, com sensibilidade maior que 0,08°C a +38°C/ 80mK, e resolução máxima (2048x1536 pixels). Ela foi utilizada durante o trabalho para fazer imagens termográficas dos conjuntos de bombas da Tabela 4.1.



Figura 4.17 - Câmera termográfica Flir mod. T-200(extraída do manual do fabricante Flir).

A Figura 4.18 mostra um exemplo da imagem termográfica do conjunto 7 na condição de desalinhado .

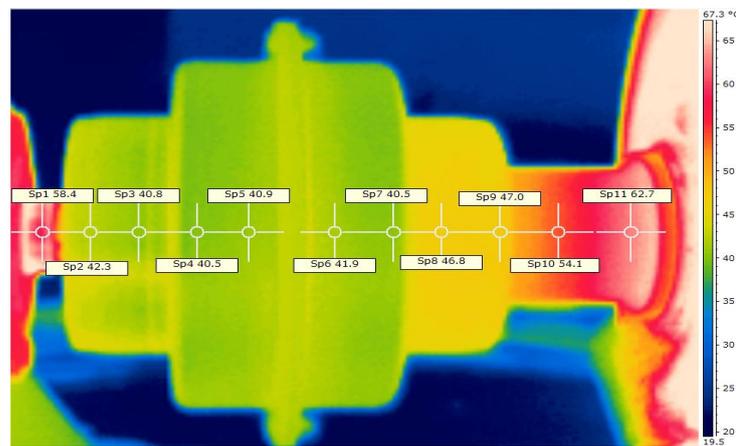


Figura 4.18 - Imagem termográfica do conjunto 7 desalinhado.

Alinhador laser

As medições dos índices de desalinhamento dos conjuntos analisados durante esse trabalho foram efetuadas com o alinhador laser do fabricante Pruftechnik, modelo Alingneo. A Figura 4.19 mostra o equipamento montado no conjunto motor elétrico e bomba centrífuga. O alinhador tem as seguintes características:

- Resolução 1µm.
- Exatidão 2% da medição.



Figura 4.19 - Alinhador laser Alingneo.

Para gravação de cópias de segurança e emissão de relatório, o Alingneo utiliza o *software* Alignment Reporter. Na Figura 4.20 é mostrado um exemplo dos valores obtidos em um conjunto de motor bomba analisado nesse trabalho.

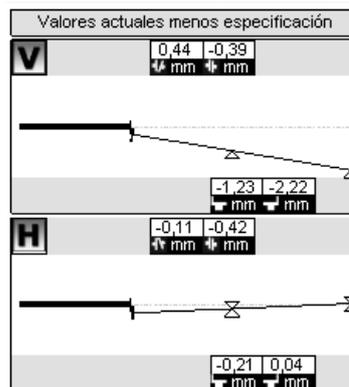


Figura 4.20 - Índices de desalinhamento (Extraído software Alignment Reporter).

Calibrador portátil para sensores de temperaturas

Foi utilizado na calibração do termômetro de contato e dos termopares tipo T. O forno modelo FORNO BAT do fabricante Ecil, é uma fonte de calor homogênea e estável que opera na faixa de temperatura de -50 °C a 1200 °C através de dois blocos equalizadores. No bloco

equalizador de baixa temperatura (BT) as temperaturas podem ser variadas de -50 a 140 °C e a exatidão é de $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$, por sua vez o bloco equalizador de alta temperatura (AT) opera na faixa de 140 a 1200°C e a sua exatidão é da ordem de $\pm 0,15^{\circ}\text{C}$. O forno BAT é mostrado na Figura 4.21.



Figura 4.21 - Calibrador portátil (Extraído do manual do fabricante).

Emissor de corpo negro:

Foi utilizado, na calibração da câmera termográfica, um emissor de corpo negro modelo BB701 do fabricante Omega, com as seguintes características:

- emissividade de 0,95.
- incerteza de medição de $0,8^{\circ}\text{C}$.
- Faixa de temperatura de -18 a 149°C .

A Figura 4.22 mostra a fotografia do emissor de corpo negro BB701.



Figura 4.22 - Emissor de corpo negro .

4.3. Calibração

4.3.1. Calibração Termômetro de Contato e Termopares

Termômetro de Contato

O processo de calibração do termômetro de contato GTH 1160 e dos termopares foi realizado utilizando-se o calibrador de sensores de temperatura FORNO BAT. Foi utilizado o bloco BT (baixa temperatura) com faixa de medição de -50 a 140°C e estabilidade absoluta de $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$, no qual foram colocadas temperaturas padrões de 30 , 40 , 55 , 60 , 75 e 90°C .

Procedimento de calibração:

- Estabilização da temperatura do forno BAT.
- Colocação do sensor do termômetro GTH 1160 no bloco BT.
- Estabilização da temperatura do sensor do termômetro GTH 1160 (15 minutos).

O procedimento foi repetido três vezes para cada temperatura padrão. Os resultados são mostrados na Tabela 4.3. Esses resultados apresentam uma incerteza combinada de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, a qual é fruto das incertezas das múltiplas medições, incerteza da resolução do forno e incerteza da resolução do termômetro GTH 1160.

Tabela 4.3- Resultados das temperaturas da calibração.

Temperatura padrão	$30,00 \pm 0,02^{\circ}\text{C}$	$40,00 \pm 0,02^{\circ}\text{C}$	$55,00 \pm 0,02^{\circ}\text{C}$	$60,00 \pm 0,02^{\circ}\text{C}$	$75,00 \pm 0,02^{\circ}\text{C}$	$90,00 \pm 0,02^{\circ}\text{C}$
Medição 1 GTH 1160	$30,1 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$	$39,9 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$	$54,7 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$	$59,55 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$	$74,6 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$	$89,6 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$
Medição 2 GTH 1160	$30,1 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$	$39,9 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$	$54,7 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$	$59,7 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$	$74,6 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$	$89,6 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$
Medição 3 GTH 1160	$30,1 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$	$39,9 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$	$54,7 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$	$59,4 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$	$74,6 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$	$89,6 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$

Com base nesses resultados foram utilizadas as ferramentas do Excel para traçar uma curva de ajuste para as medições com o termômetro GTH 1160 (Figura 4.23).

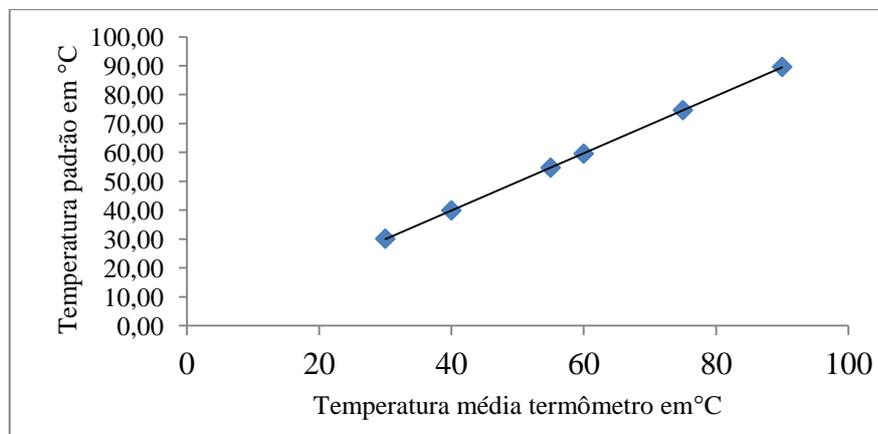


Figura 4.23 – Curva de ajuste termômetro de contato GTH 1160.

Termopares

Os termopares foram calibrados com o mesmo procedimento do termômetro de contato, mas com a diferença na quantidade de medições, pois nos termopares foi feita uma medição para cada temperatura padrão, os resultados são mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4- Temperaturas dos termopares.

Temperatura padrão	30,00 ± 0,02°C	40,00 ± 0,02°C	55,00 ± 0,02°C	60,00 ± 0,02°C	75,00 ± 0,02°C	90,00 ± 0,25°C
Termopar 1	27,70 ± 0,25°C	37,80 ± 0,25°C	52,90 ± 0,25°C	57,90 ± 0,25°C	72,60 ± 0,25°C	87,50 ± 0,25°C
Termopar 2	27,60 ± 0,25°C	37,70 ± 0,25°C	52,90 ± 0,25°C	57,80 ± 0,25°C	72,50 ± 0,25°C	87,50 ± 0,25°C
Termopar 3	27,60 ± 0,25°C	37,70 ± 0,25°C	52,80 ± 0,25°C	57,80 ± 0,25°C	72,50 ± 0,25°C	87,40 ± 0,25°C
Termopar 4	27,50 ± 0,25°C	37,80 ± 0,25°C	52,90 ± 0,25°C	57,90 ± 0,25°C	72,60 ± 0,25°C	87,50 ± 0,25°C
Termopar 5	27,60 ± 0,25°C	37,80 ± 0,25°C	52,90 ± 0,25°C	57,90 ± 0,25°C	72,60 ± 0,25°C	87,50 ± 0,25°C

Os resultados da calibração dos termopares apresentam uma incerteza combinada de $\pm 0,25^\circ\text{C}$, fruto das incertezas de resolução, incerteza do forno, incerteza do logger Daqpro 5300.

Com base nos resultados obtidos durante a calibração e utilizando as ferramentas do Excel, foram ajustadas as temperaturas dos termopares utilizados nesse trabalho. A Figura 4.24 mostra os resultados desses ajustes.

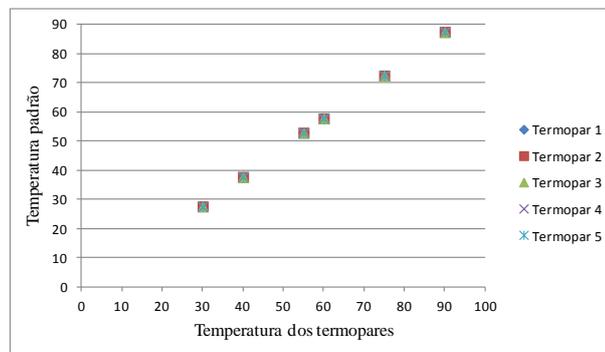


Figura 4.24 - Temperatura dos termopares 01 a 05.

Na Figura 4.25 é mostrado um exemplo da curva de ajuste para o termopar de número 01.

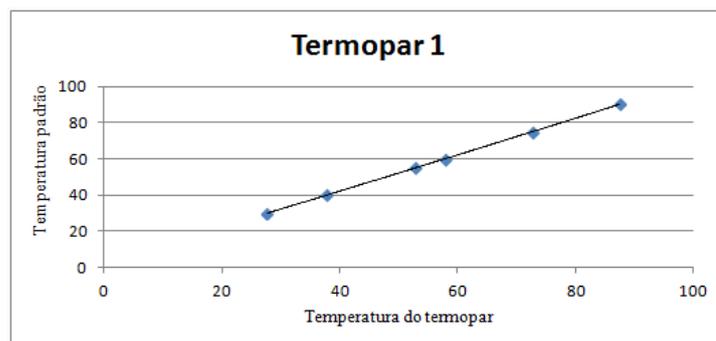


Figura 4.25 - Curva de ajuste do termopar 1.

4.3.2. Calibração da Câmera Termográfica

A calibração da câmera termográfica foi feita utilizando um emissor de corpo negro mod. BB701. A câmera foi colocada a uma distância de 0,4m do emissor de corpo negro conforme mostrado na Figura 4.26. Foram feitas imagens termográfica para sete diferentes temperaturas padrões, colocada no controlador do emissor de corpo negro.



Figura 4.26 - Aparato para aferição da câmera termográfica .

Para cada imagem termográfica de cada temperatura padrão, foi feita a média das cinco temperaturas distribuídas no termograma (Figura 4.27). Os resultados são mostrados na Tabela 4.5.

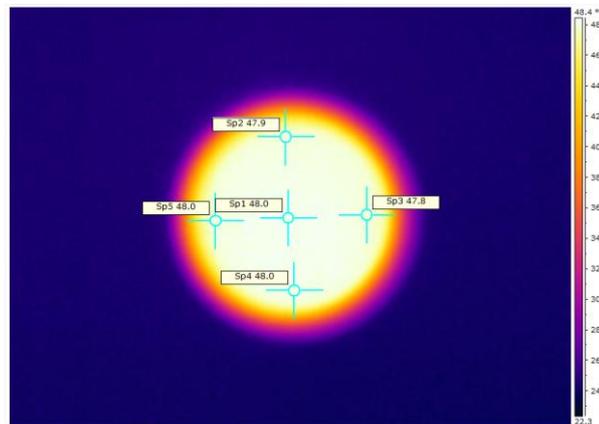


Figura 4.27 - Termograma aferição da câmera termográfica .

Tabela 4.5 - Temperaturas da câmera termográfica.

temperatura padrão	T1	T2	T3	T4	T5
33,5 ± 0,8°C	35,1 ± 1,2°C	35,0 ± 1,2°C	34,9 ± 1,2°C	34,9 ± 1,2°C	34,8 ± 1,2°C
46,9 ± 0,8°C	48,0 ± 1,2°C	47,9 ± 1,2°C	47,8 ± 1,2°C	48,0 ± 1,2°C	48,0 ± 1,2°C
61,9 ± 0,8°C	62,9 ± 1,2°C	62,3 ± 1,2°C	62,5 ± 1,2°C	62,8 ± 1,2°C	62,2 ± 1,2°C
74,3 ± 0,8°C	75,0 ± 1,2°C	73,3 ± 1,2°C	73,7 ± 1,2°C	74,6 ± 1,2°C	73,0 ± 1,2°C
86,7 ± 0,8°C	87,1 ± 1,2°C	86,3 ± 1,2°C	85,9 ± 1,2°C	86,6 ± 1,2°C	85,6 ± 1,2°C
99,5 ± 0,8°C	99,6 ± 1,2°C	99,7 ± 1,2°C	97,9 ± 1,2°C	99,0 ± 1,2°C	97,9 ± 1,2°C
115,8 ± 0,8°C	115,6 ± 1,2°C	114,5 ± 1,2°C	114,2 ± 1,2°C	114,7 ± 1,2°C	114,1 ± 1,2°C

Os resultados da calibração apresentam uma incerteza combinada de $\pm 1,1^{\circ}\text{C}$, que é fruto das incertezas das medições múltiplas, incerteza de resolução, incerteza da câmera termográfica e incerteza do emissor de corpo negro.

Com base nos dados obtidos durante a calibração e utilizando as ferramentas do Excel, foi possível traçar uma curva de ajuste para as medições de temperatura com a câmera termográfica (Figura 4.28).

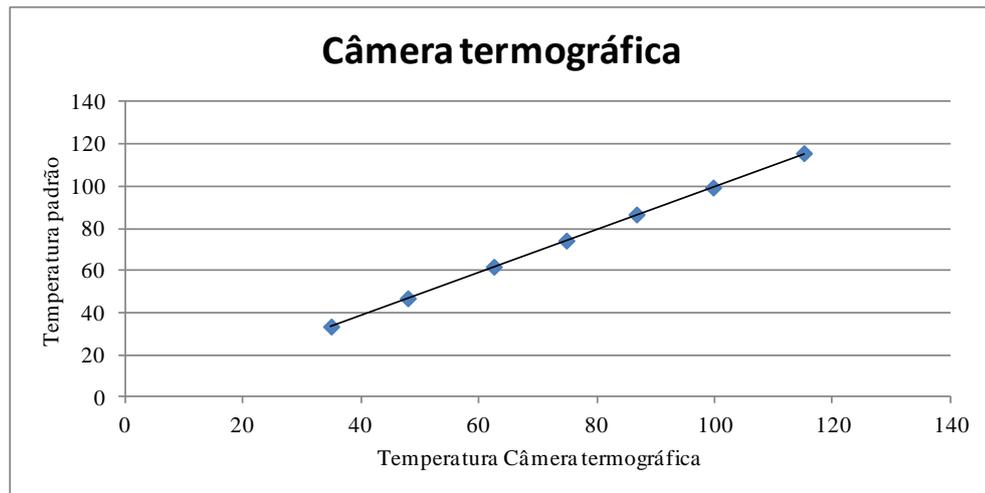


Figura 4.28 - Curva de ajuste câmera termográfica .

5. Resultados e discussões

Nos conjuntos analisados durante esse trabalho, foram realizadas medições de vibrações mecânicas, temperatura, índices de desalinhamento como também foram feitas imagens termográficas. Em uma análise inicial, e em conformidade com a disponibilidade dos equipamentos pela indústria, o conjunto 7 foi selecionado para que fosse realizado um alinhamento a laser, procedimento este que foi feito em duas etapas. Na primeira, não foi possível colocar as quantidades de calços e os materiais utilizados não foram os recomendados pelo fabricante do alinhador a laser. Na segunda, a indústria confeccionou os calços com o material adequado e um novo alinhamento foi realizado.

Com os dados iniciais de vibração, temperatura, índices de desalinhamento, imagem termográfica dos conjuntos que não tinham as mesmas características, foi feito um estudo comparativo da distribuição de temperatura ao longo do eixo (eixo do motor elétrico, eixo da bomba e acoplamentos). No conjunto que foi alinhado, todos os índices de temperatura obtidos foram comparados nas condições do conjunto desalinhado, após primeiro e segundo alinhamentos. No restante dos conjuntos com as mesmas características, foram analisadas as temperaturas ao longo do eixo e comparadas com os índices de desalinhamento.

O conjunto 7 tem potência de 300cv com um acoplamento flexível com elemento de transmissão metálico do modelo 14F. Após a parada do conjunto, o alinhador a laser foi instalado, e os índices de desalinhamento foram medidos (Figura 5.1). Comparando-se com os índices de desalinhamento permitidos pelo fabricante para esse tipo de acoplamento, verificou-se que os índices de desalinhamento estavam acima do permitido: no sentido vertical na posição paralela, 0,09 mm e angular 0,19 mm; no sentido horizontal paralelo, 0,12 mm e com base nesses resultados, foi feito o alinhamento. Importa dizer que os calços que foram colocados nos pés do motor excederam a quantidade recomendada pelo fabricante do alinhador a laser e sua confecção foi feita com um material diferente do recomendado pelo mesmo.

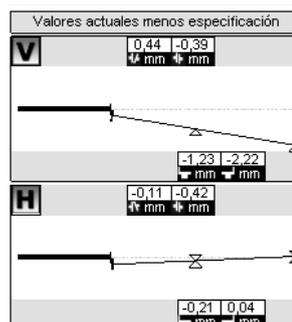


Figura 5.1 - Níveis de desalinhamento conjunto 7 (Extraído do Alignment Reporter).

Com o alinhamento realizado, houve uma redução no sentido vertical angular de 0,44mm, no vertical paralelo de 0,31mm, e no sentido horizontal angular de 0,10mm, e horizontal paralelo de 0,39mm, conforme mostrado na Figura 5.2. Esses valores estão dentro da faixa permitida pelo fabricante para esse tipo de acoplamento.

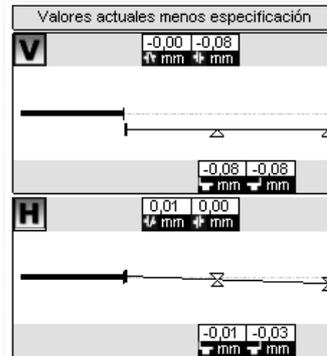


Figura 5.2 - Níveis de desalinhamento após primeiro alinhamento conjunto 7 (Extraído Alignment Reporter).

As Tabelas 5.1 e 5.2 mostram os índices de vibração global do motor e da bomba em mm/s do conjunto 7 antes do alinhamento (27/10/2011), depois do primeiro(29/10/2011) e depois do segundo alinhamento (10/01/2012).

Tabela 5.1- Índices de vibração do motor do conjunto 7.

Motor elétrico global vibração em mm/s			
Ponto	27/10/2011	29/10/2011	10/01/2012
H-1	5,76 ± 0,12	1,37 ± 0,03	2,59 ± 0,05
V-1	1,48 ± 0,03	2,64 ± 0,05	2,87 ± 0,06
A-1	2,26 ± 0,05	5,48 ± 0,11	3,49 ± 0,07
H-2	1,33 ± 0,03	1,69 ± 0,03	3,10 ± 0,06
V-2	1,03 ± 0,02	1,25 ± 0,03	1,85 ± 0,04
A-2	2,33 ± 0,05	5,09 ± 0,10	3,64 ± 0,07

Tabela 5.2- Índices de vibração da bomba do conjunto 7.

Bomba global vibração em mm/s			
Ponto	27/10/2011	29/10/2011	10/01/2012
H-1	5,02 ± 0,10	3,11 ± 0,06	4,66 ± 0,09
V-1	2,14 ± 0,04	1,87 ± 0,04	2,30 ± 0,05
A-1	3,28 ± 0,07	3,17 ± 0,06	3,66 ± 0,07
H-2	2,72 ± 0,05	2,54 ± 0,05	3,87 ± 0,08
V-2	2,54 ± 0,05	2,28 ± 0,05	3,49 ± 0,07
A-2	3,53 ± 0,07	2,53 ± 0,05	4,46 ± 0,09

No motor elétrico e na bomba não houve alterações significativas nos índices globais de vibração antes e após os alinhamentos.

As Figuras 5.3 e 5.4 mostram os espectros de vibração em velocidade do motor elétrico do conjunto 7 desalinhado e depois do primeiro alinhamento, onde é visível um pico na frequência fundamental e nas harmônicas em 2, 3, 4 e 5 vezes a frequência de rotação do eixo, caracterizando desalinhamento, Piotrowski (1995). Não houve alterações significativas nos espectros após o alinhamento.

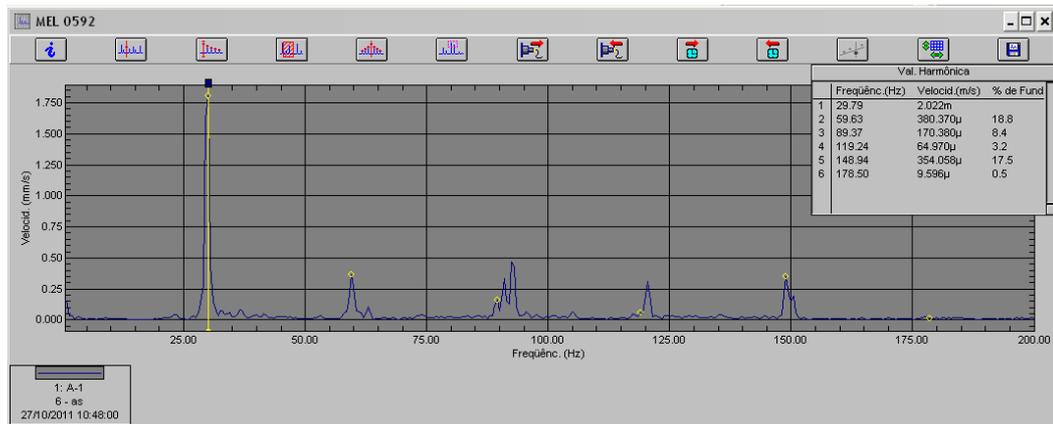


Figura 5.3 - Ponto A-1 do motor elétrico desalinhado.

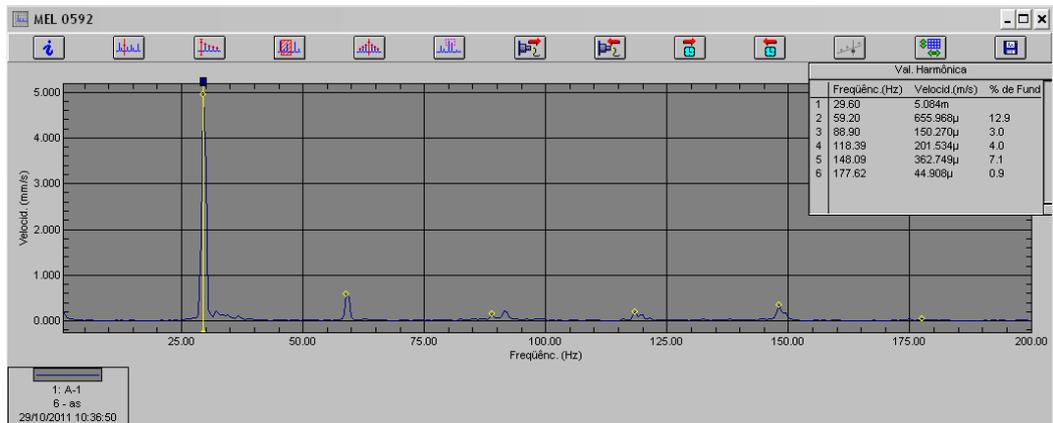


Figura 5.4 - Ponto A-1 do motor elétrico depois do primeiro alinhamento.

As Figuras 5.5 e 5.6 mostram os espectros em velocidade da bomba do conjunto 7 desalinhada e depois do primeiro alinhamento, respectivamente. Também é visível um pico na frequência fundamental e nas harmônicas 2, 3, 4 e 5 vezes a frequência de rotação do eixo. Nota-se uma diminuição nos picos da frequência fundamental e nas harmônicas em 2, 3, 4 e 6 vezes a frequência de rotação do eixo, e um discreto aumento na quinta harmônica (frequência de passagem de pás do rotor) após o alinhamento.

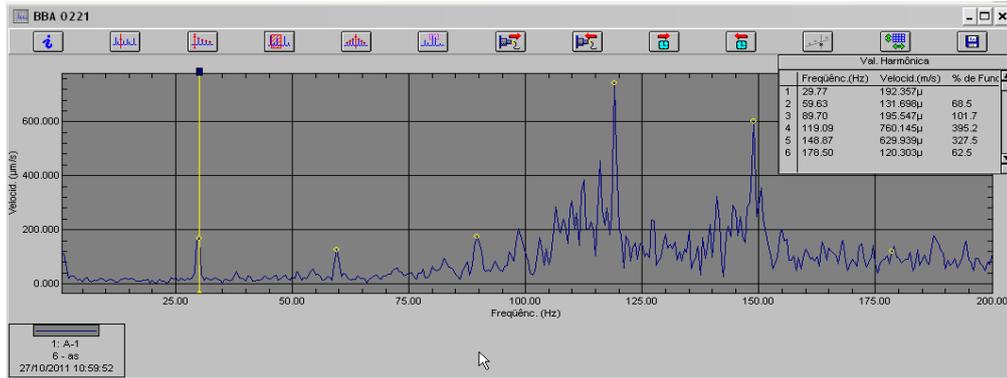


Figura 5.5 - Ponto A-1 da bomba desalinhada.

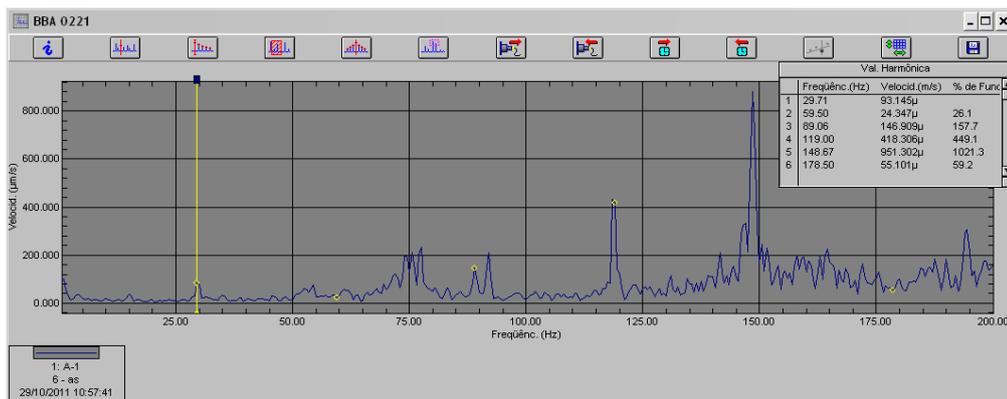


Figura 5.6 - Ponto A-1 da bomba depois do primeiro alinhamento.

Imagem térmica

A Figura 5.7 mostra a imagem térmica do conjunto 7 desalinhado onde visualizamos os elementos: eixo da bomba (2), cubo do acoplamento do lado da bomba (3), tampa do acoplamento do lado da bomba (4), tampa do acoplamento do lado do motor (5), cubo do acoplamento do lado do motor (6) e eixo do motor (7) com suas respectivas temperaturas pontuais. Destaca-se que, as temperaturas pontuais que aparecem nas imagens termográficas correspondem a valores brutos que não foram corrigidos pelas respectivas emissividades das superfícies.

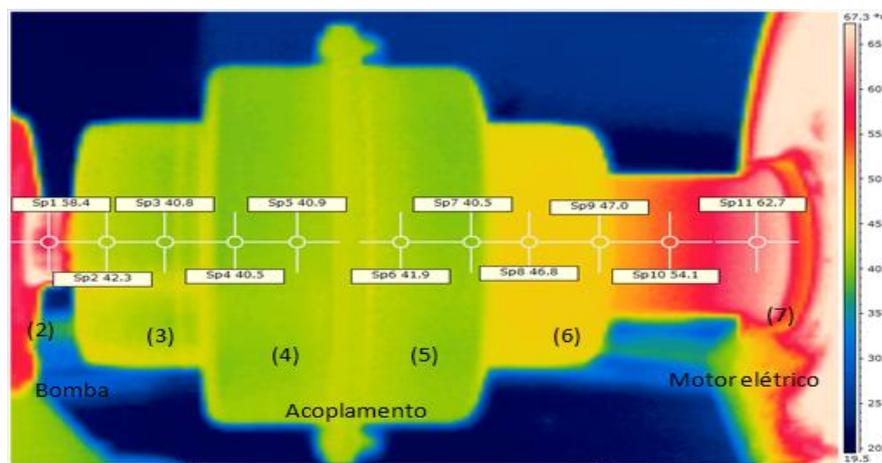


Figura 5.7 - Imagem térmica do conjunto 7 desalinhado.

A Figura 5.8 mostra a imagem térmica do conjunto 7 após o primeiro alinhamento .

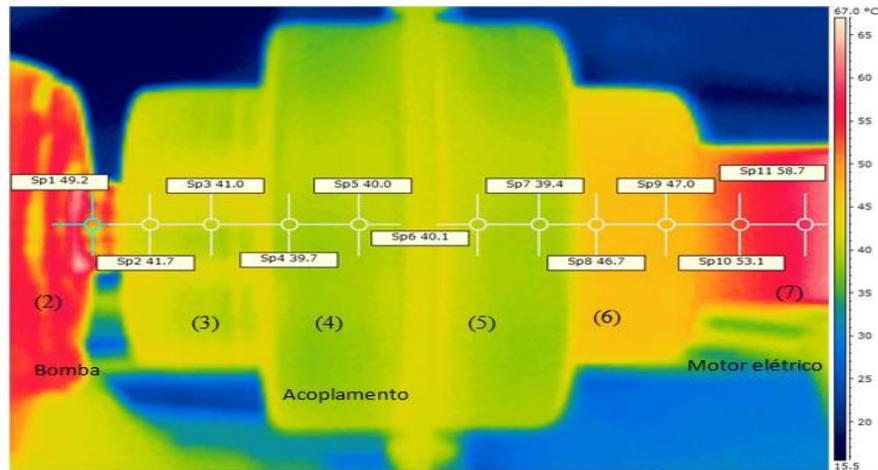


Figura 5.8 - Imagem térmica do conjunto 7 após primeiro alinhamento.

As temperaturas pontuais da figura foram localizadas pela criação de uma escala, que foi criada com o seguinte procedimento:

- Na planta da indústria. foram medidas todas as distâncias reais de cada componente envolvidos.
- As imagens termográficas foram medidas.
- Foi criada uma escala entre as duas medições.

Nota-se uma redução de temperatura em todos os pontos ao longo da linha do eixo . A Figura 5.9, mostra um gráfico comparativo das duas condições. Tanto nesta figura, quanto em todas as outras, de aqui em diante, que mostram o perfil de temperatura dos conjuntos de acoplamento, os resultados estão devidamente corrigidos para incorporar o efeito da emissividade das superfícies correspondentes.

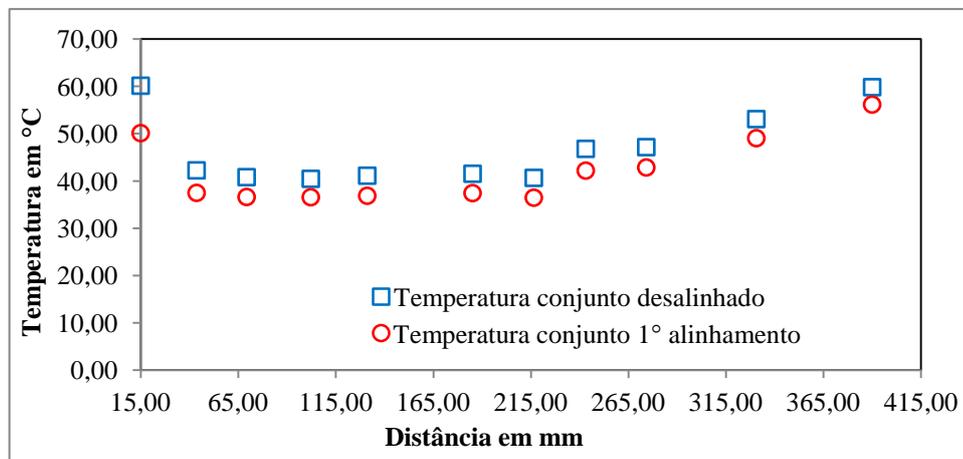


Figura 5.9 - Comparativo das temperaturas do conjunto 7 antes e depois do primeiro alinhamento.

Os resultados demonstram existir uma influência do desalinhamento no aumento de temperatura ao longo da linha de eixo do conjunto.

Os calços que foram colocados nos pés do motor não são do material recomendado pelo fabricante do alinhador laser como também a quantidade exedeu a recomendada pelo mesmo.

No dia 10/01/12, deu-se início à substituição dos calços colocados em 29/10/11. Antes da parada do equipamento, foi feita uma nova medição, e os índices de vibração apresentaram valores bem acima dos índices medidos no dia 29/10/11, porque os parafusos de fixação do motor elétrico estavam folgados. Após a parada do equipamento, foram feitas novas medições com o alinhador laser, os resultados são mostrados na Figura 5.10. Houve uma discreta variação dos índices de desalinhamento no sentido vertical angular (um aumento de 0,03mm), e no vertical paralelo (diminuição de 0,04mm). No sentido horizontal angular não houve alteração e no horizontal paralelo observou-se um aumento de 0,07mm.

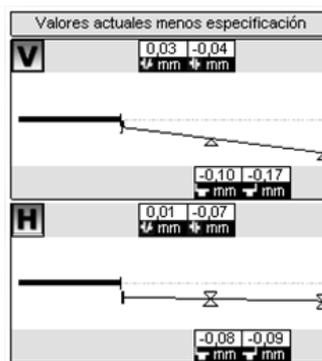


Figura 5.10 - Índices de desalinhamento antes do segundo alinhamento (Extraído de Alignment Reporter).

Os calços foram substituídos por calços usinados em aço, com espessuras maiores (Figura 5.11) e o completo com calços finos em aço inox encruado (Figura 5.12). Após essa substituição refez-se o alinhamento, os resultados são mostrados na Figura 5.13.



Figura 5.11 - Calços usinados



Figura 5.12 - Calços finos em aço inox encruado

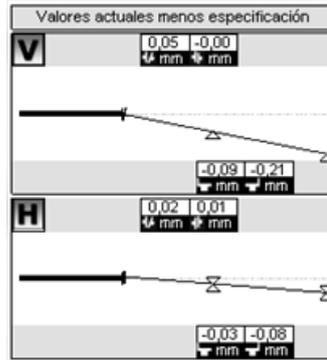


Figura 5.13 - Medidas depois do segundo alinhamentos (Extraído de Alignment Reporter).

Após o segundo alinhamento, foram coletadas novas medições de vibrações mecânicas. As Figuras 5.14 e 5.15 mostram o espectro de vibração em velocidade do motor elétrico e da bomba. Depois do segundo alinhamento não houve alteração significativa na frequência fundamental nem em suas harmônicas.

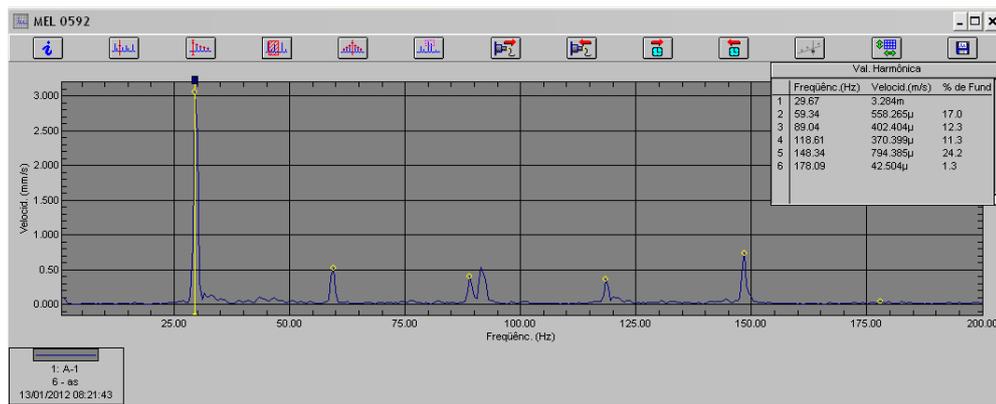


Figura 5.14 - Espectro ponto A-1 depois do segundo alinhamento.

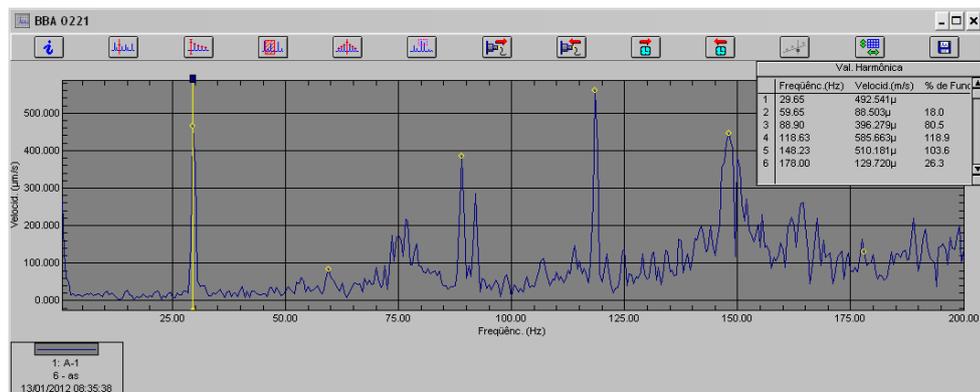


Figura 5.15 - Espectro ponto A-1 depois do segundo alinhamento.

A Figura 5.16 mostra a imagem térmica do conjunto 7 após o segundo alinhamento.

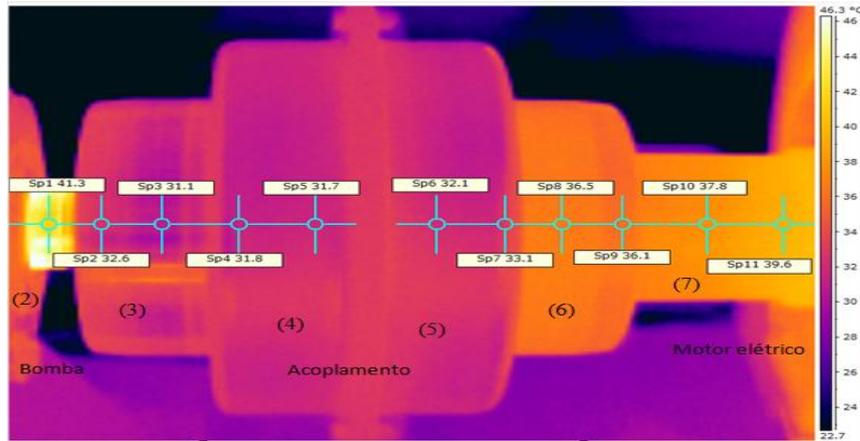


Figura 5.16 - Imagem térmica do conjunto. 7 após o segundo alinhamento.

A Figura 5.17 mostra as temperaturas pontuais em um gráfico que apresenta temperatura versus distância, tomando como base a primeira medida que dista 15,00 mm do corpo da bomba, nas três condições anteriores (desalinhado, após 1º alinhamento e após o 2º alinhamento).

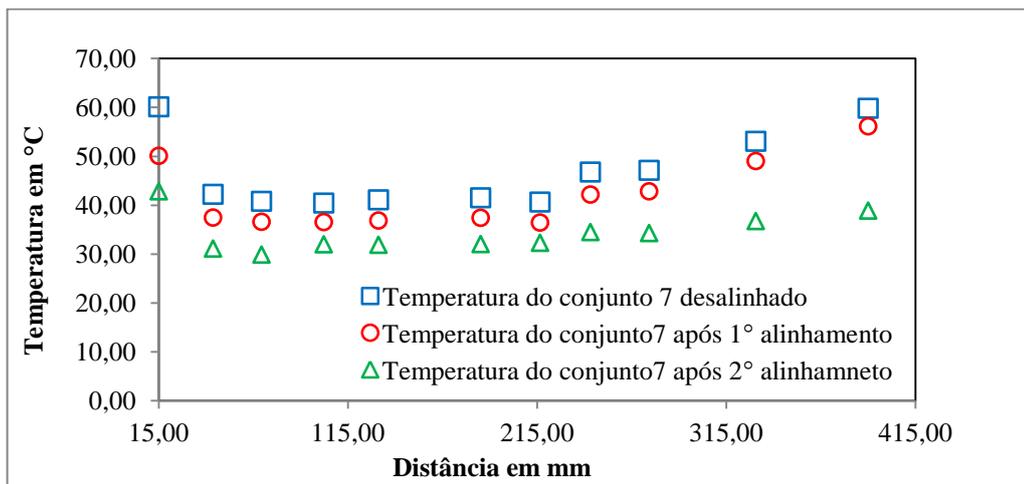


Figura 5.17 - Comparativo do conjunto 7 desalinhado, após o 1º e o 2º alinhamentos .

Nota-se uma redução de temperatura ao longo do eixo após os dois alinhamentos, sendo esta mais acentuada no segundo alinhamento quando os calços foram colocados com material e quantidade recomendados pelo fabricante do alinhador a laser.

O conjunto 7 tem uma potência de 300cv (296,85 HP) e as condições são de uma planta real em funcionamento. O equipamento, inicialmente, apresentou um desalinhamento no sentido vertical angular e paralelo, no sentido horizontal angular e paralelo. Com o primeiro e o segundo alinhamentos, os índices foram reduzidos, conseqüentemente, a temperatura ao longo do eixo também foi reduzida. A Tabela 5.3 mostra os valores da redução de temperatura ao longo do eixo depois do primeiro e segundo alinhamentos.

Tabela 5.3- Resultados da redução de temperatura do conjunto 7.

	Temperatura em °C										
	Redução de temperatura 1° alinhamento em °C	14,0±1,1	2,8±1,1	2,2±1,1	2,0±1,1	2,7±1,1	2,5±1,1	2,7±1,1	2,2±1,1	2,4±1,1	1,3±1,1
Redução de temperatura 2° alinhamento em °C	21,9±1,1	11,9±1,1	12,1±1,1	9,2±1,1	10,2±1,1	9,8±1,1	8,6±1,1	12,4±1,1	13,3±1,1	16,2±1,1	19,4±1,1

O conjunto 5 tem as mesmas características do conjunto 7, ou seja, os motores, as bombas e os acoplamentos são dos mesmos tipo e fabricante. Os índices de desalinhamento do primeiro são visualizados na Figura 5.18 e o do segundo na Figura 5.1. Os índices de desalinhamento do conjunto 5 foram medidos da mesma forma que o do conjunto 7. Esses índices estão acima do permitido pelo fabricante no sentido vertical posição paralela de 0,14 mm, angular de 0,33 mm. No sentido horizontal paralelo e angular estão dentro da faixa permitida pelo fabricante.

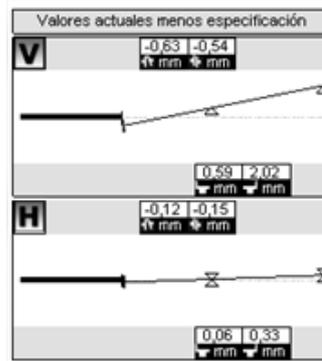


Figura 5.18 - Índice de desalinhamento do conjunto 5 (Extraído de Alignment Reporter).

Os espectros de vibração do motor e da bomba são mostrados nas Figura 5.19 e 5.20. Os espectros do motor e da bomba apresentam picos na frequência fundamental e harmônicas 2, 3, 4, e 5 vezes a frequência de rotação do eixo, caracterizando desalinhamento confirmado e quantificado com a medição do alinhador a laser.

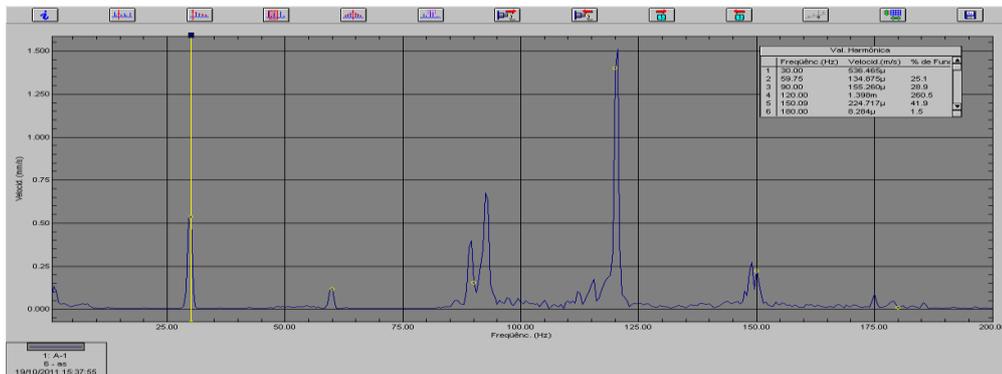


Figura 5.19-Espectro de vibra&ccedil;&atilde;o motor el&eacute;trico do conjunto 5 .

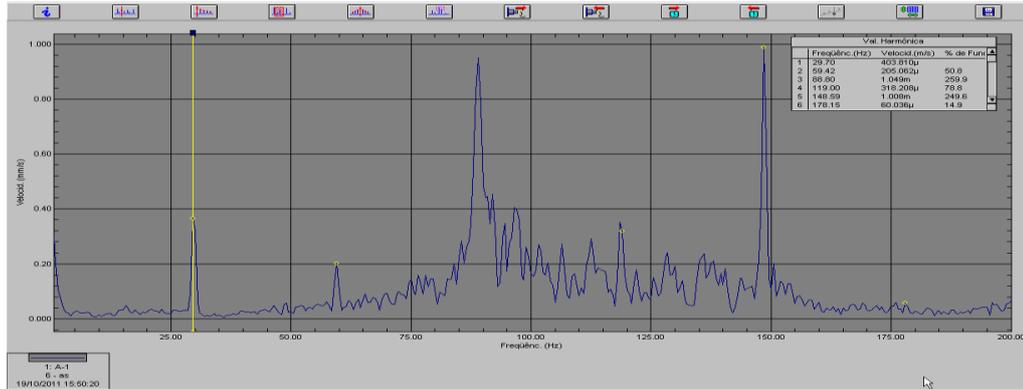


Figura 5.20 - Espectro de vibração da bomba do conjunto 5.

A Figura 5.21 mostra a imagem térmica do conjunto 5. A distribuição ao longo do eixo de temperatura versus distância é mostrada na Figura 5.22.

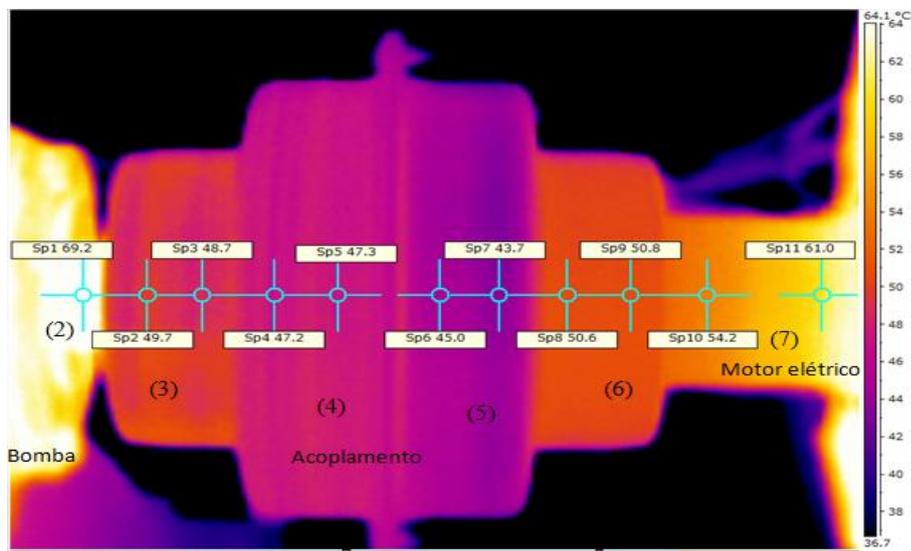


Figura 5.21 - Imagem térmica do conjunto 5 desalinhado.

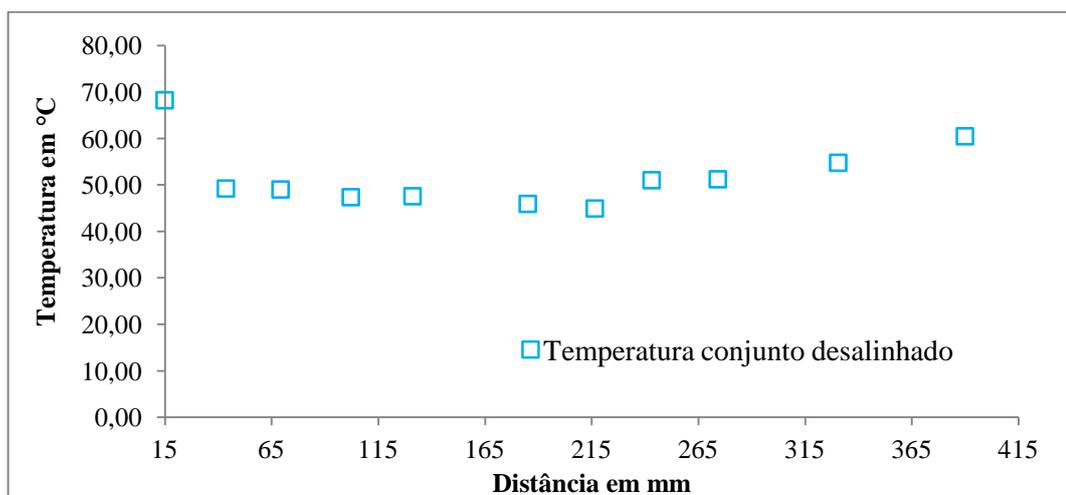


Figura 5.22 - Distribuição de temperatura do conjunto 5 desalinhado .
Temperatura ambiente 36,0°C.

Comparando com as temperaturas do conjunto 7, nota-se um ligeiro aumento de temperatura ao longo da linha dos eixos em quase todos os pontos (Figura 5.23), visto que o

conjunto 5 tem índices de desalinhamento maiores do que os do conjunto 7. Na Tabela 5.4 tem-se os valores da diferença de temperatura entre esses conjuntos.

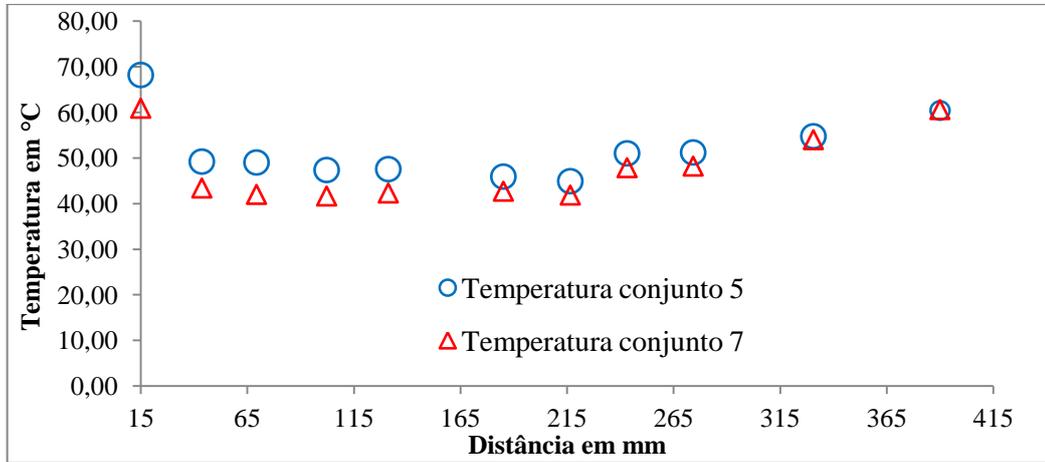


Figura 5.23 - Comparativo do conjunto 5 desalinhado e 7 desalinhado .

Tabela 5.4- Valores da diferença de temperatura entre os conjuntos 5 e 7.

Diferença conj.5 e 7 desalinhados	Temperatura em °C										
		7,2±1,1	5,8±1,1	7,0±1,1	5,7±1,1	5,25±1,1	3,2±1,1	3,0±1,1	3,1±1,1	3,0±1,1	0,8±1,1
Diferença conj.7 alin. e 5 desalin.	24,2±1,1	16,6±1,1	17,6±1,1	13,9±1,1	14,2±1,1	12,4±1,1	11,2±1,1	15,1±1,1	15,5±1,1	16,7±1,1	20,3±1,1

Quando a distribuição de temperatura do conjunto 5 é comparada com a distribuição de temperatura do conjunto 7 depois do segundo alinhamento, a diferença entre as temperaturas aumenta consideravelmente (Figura 5.24) comprovando a existência de uma relação direta entre a temperatura e os índices de desalinhamento.

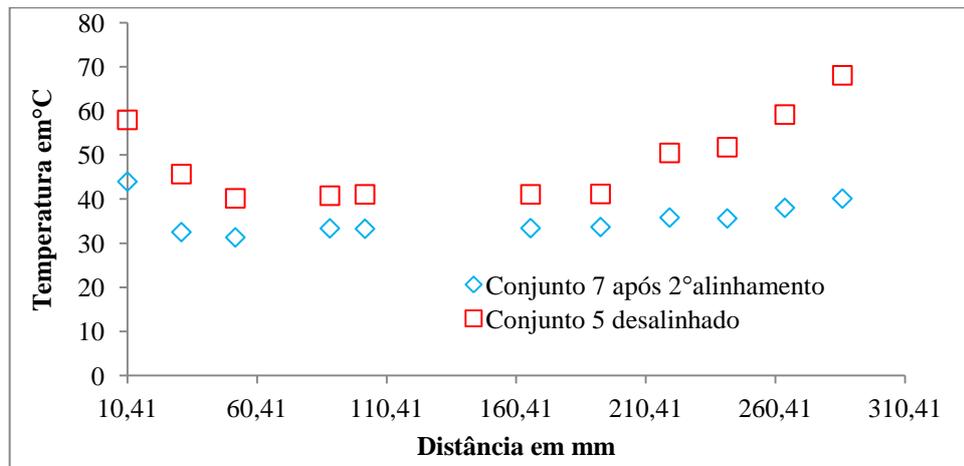


Figura 5.24 - Comparativo entre o conjunto 5 desalinhado e o conjunto 7 alinhado.

O gráfico do conjunto 5 mostra uma distribuição de temperatura semelhante à do conjunto 7, apesar de serem dois conjuntos independentes.

Os conjuntos 1 e 2 têm potências iguais de 250cv (246,50 HP) e acoplamento flexível com elemento de transmissão metálico do tipo 13F da Falk. Os índices de desalinhamento do primeiro conjunto são mostrados na Figura 5.25, e o do segundo, na Figura 5.26.

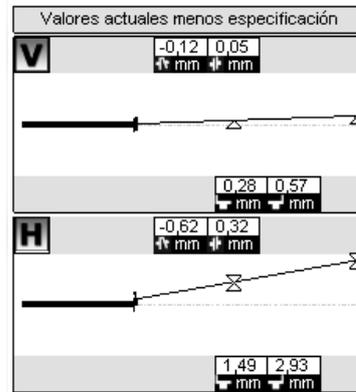


Figura 5.25 - Índices de desalinhamento conjunto 1(Extraído de Alignment Reporter).

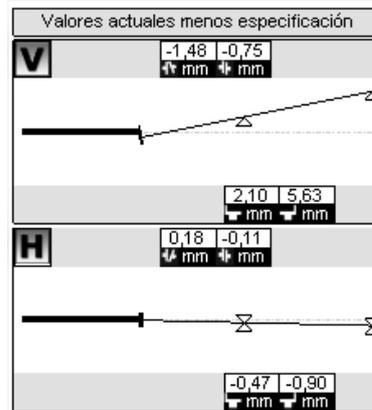


Figura 5.26 - Índices de desalinhamento conjunto 2(Extraído de Alignment Reporter).

No primeiro conjunto, os índices de desalinhamento no sentido vertical paralelo e angular estão dentro da faixa permitida pelo fabricante. No sentido horizontal paralelo, eles estão fora 0,11mm, e no angular 0,42mm. No segundo, o vertical angular está fora 1,30mm e o paralelo 0,55mm, no horizontal, tanto o paralelo como o angular estão dentro da tolerância estabelecida pelo fabricante.

Com a análise de vibração, foram obtidos os índices de vibração global em velocidade para o conjunto 1 (Tabela 5.5) e para o do conjunto 2 (Tabela 5.6).

Tabela 5.5- Índices de vibração em velocidade no conjunto 1.

Posição	H-1	V-1	A-1	H-2	V-2	A-1
Motor elétrico (mm/s)	6,05 ± 0,12	2,96 ± 0,06	3,92 ± 0,08	5,50 ± 0,11	3,18 ± 0,06	2,89 ± 0,06
Bomba (mm/s)	8,48 ± 0,17	5,66 ± 0,11	6,40 ± 0,13	5,63 ± 0,11	5,37 ± 0,11	8,61 ± 0,17

Tabela 5.6- Índices de vibração em velocidade no conjunto 2.

Posição	H-1	V-1	A-1	H-2	V-2	A-1
Motor elétrico (mm/s)	4,58 ± 0,09	6,26 ± 0,13	8,59 ± 0,17	4,24 ± 0,08	3,99 ± 0,08	10,33 ± 0,21
Bomba (mm/s)	13,21 ± 0,26	5,25 ± 0,11	8,10 ± 0,16	7,45 ± 0,15	6,63 ± 0,13	9,02 ± 0,18

Os espectros de velocidade do motor elétrico e da bomba são mostrados nas Figuras 5.27 e 5.28, os do conjunto 2 do motor elétrico na Figura 5.29, e o da bomba aparece na Figura 5.30. Nos espectros dos motores conjuntos 1 e 2 nota-se claramente um pico na frequência fundamental (1 vez a frequência de rotação do eixo) e harmônicas em 2, 3, 4, 5, e 6 vezes a frequência de rotação do eixo. Em ambos os espectros das bombas é mostrado um pico na frequência fundamental e nas harmônicas em 2, 3, 4, 5, e 6 vezes a frequência de rotação do eixo, caracterizando o desalinhamento no resultado, este confirmado através de medição realizada com o alinhador a laser.

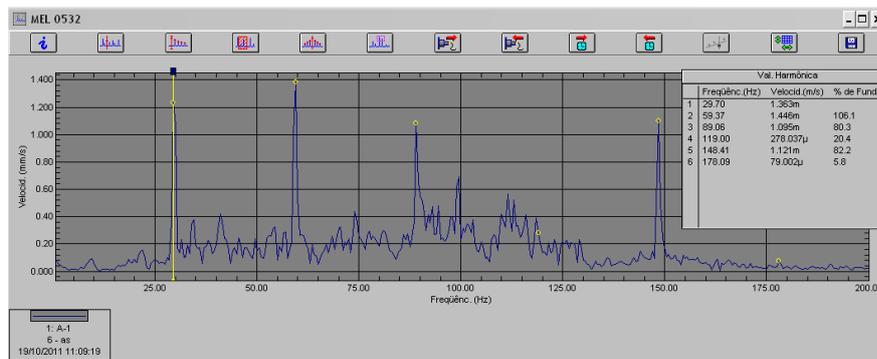


Figura 5.27-Espectro ponto A-1 do motor elétrico do conjunto 1.

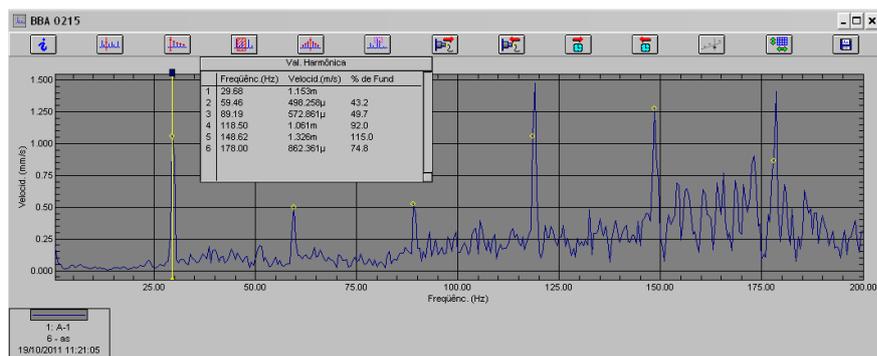


Figura 5.28 - Espectro ponto A-1 da bomba do conjunto 1.

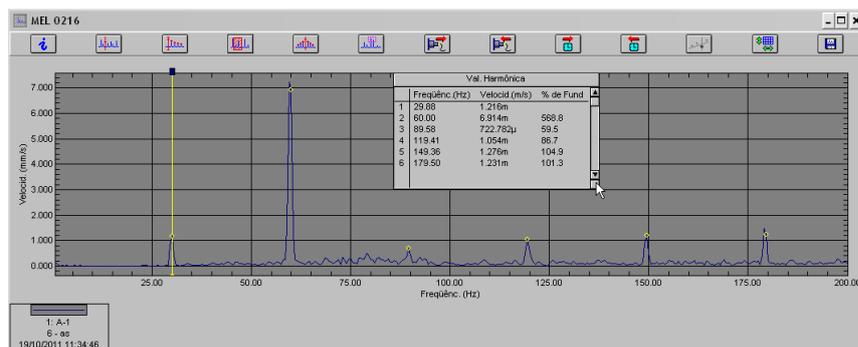


Figura 5.29 - Espectro ponto A-1 do motor elétrico do conjunto 2.

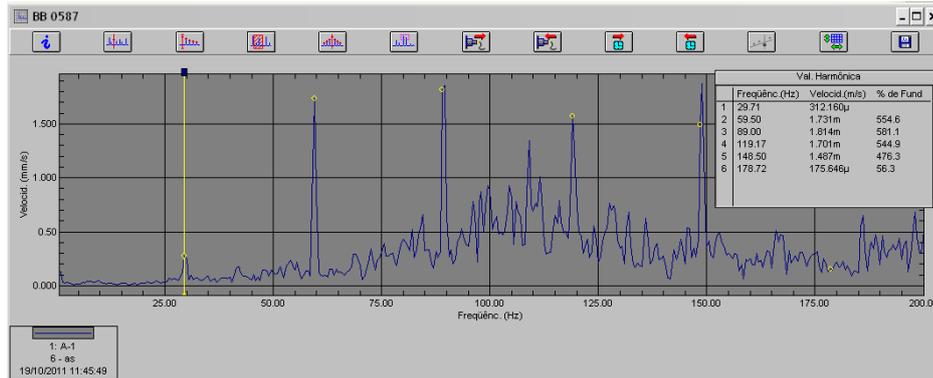


Figura 5.30 - Espectro ponto A-1 da bomba do conjunto 2.

As Figuras 5.31 e 5.32 mostram as imagens térmicas com as temperaturas ao longo da linha dos eixos dos conjuntos 1 e 2.

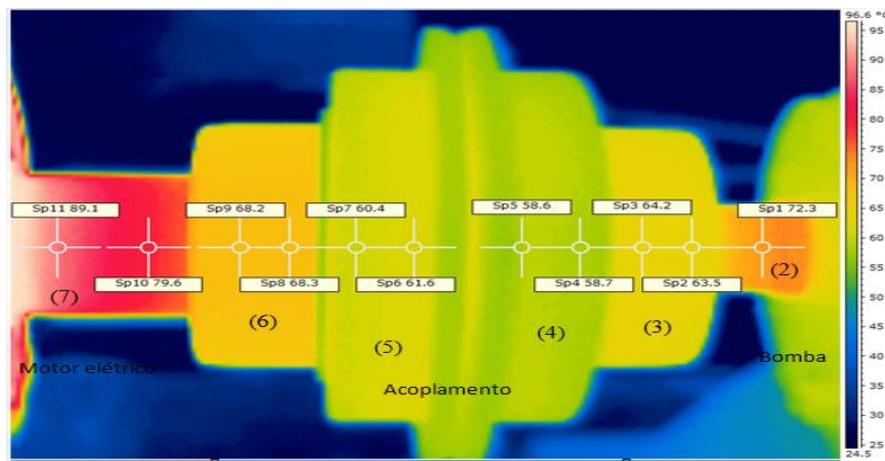


Figura 5.31 - Imagem térmica do conjunto 1 desalinhado .

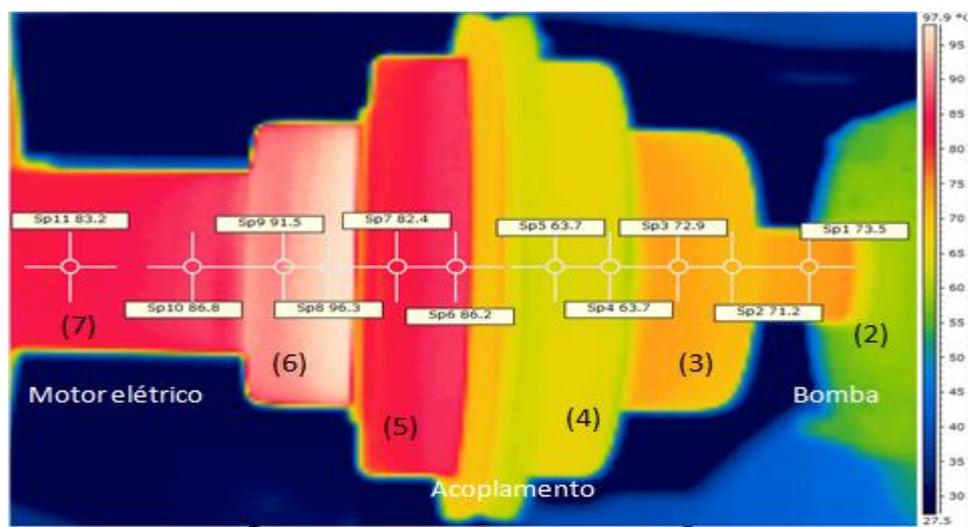


Figura 5.32 - Imagem térmica do conjunto 2 desalinhado .

Comparando a distribuição de temperatura nos dois conjuntos (Figura 5.33), nota-se a influência do índice de desalinhamento no aumento de temperatura ao longo dos eixos, ou seja, quanto maiores os índices de desalinhamento, maiores serão as temperaturas ao longo dos eixos. Na distribuição de temperatura do conjunto 2, é perceptível uma temperatura maior

no elemento acoplamento, como também a distribuição é irregular se comparada com exemplos anteriores. Essa distribuição, foi causada pelo desgaste prematuro do acoplamento (Figura 5.34), e foi a causa principal da queima do motor elétrico (Figura 5.35). Esses dois fatos, ocorreram na indústria durante o período da análise experimental.

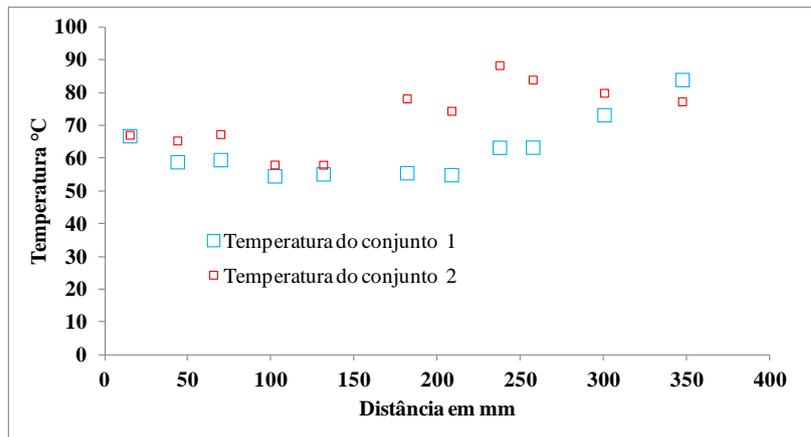


Figura 5.33 - Comparativo entre os conjuntos 1 e 2 .



Figura 5.34 - Acoplamento danificado por desalinhamento .



Figura 5.35 - Motor elétrico, queimado por desalinhamento.

A diferença das temperaturas do conjunto 2 em relação ao conjunto 1 é mostrada na Tabela 5.7. Nota-se que, apesar dos índices de desalinhamento do conjunto 1 serem menores do que os do conjunto 2, o ponto (7) do conjunto 1 tem temperatura maior do que o conjunto

2 tendo como possível causa o desgaste nos rolamentos do motor, conforme é mostrado no espectro de vibração mecânica.

Tabela 5.7- Diferença das temperaturas dos conjuntos 1 e 2.

Diferença dos conj.1 e 2 desalinhados.	Temperatura em °C										
		0,3±1,1	6,5±1,1	7,8±1,1	3,45±1,1	2,8±1,1	22,7±1,1	19,5±1,1	25,1±1,1	20,65±1,1	6,7±1,1

Medição do nível de desalinhamento dos conjuntos 3 e 4

Os conjuntos 3 e 4 têm potências iguais de 300cv (295,80HP) e acoplamento flexível com elemento de transmissão metálico do tipo 1090T do fabricante Falk . As Figuras 5.36 e 5.37 mostram os índices de desalinhamento de cada conjunto. No primeiro conjunto, os índices de desalinhamento no sentido vertical paralelo, vertical angular e no sentido horizontal paralelo estão dentro dos índices permitidos pelo fabricante , no horizontal angular tem-se um acréscimo de 0,22mm além do permitido pelo fabricante. No conjunto 2 tem-se acréscimo além do permitido pelo fabricante no sentido vertical paralelo de 0,10mm, no angular de 0,38mm, no sentido horizontal paralelo de 0,21mm, e no angular de 0,44mm.

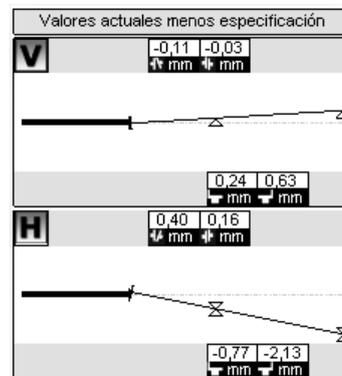


Figura 5.36 - Índices de desalinhamento do conjunto 3 (Extraído de Alignment Reporter).

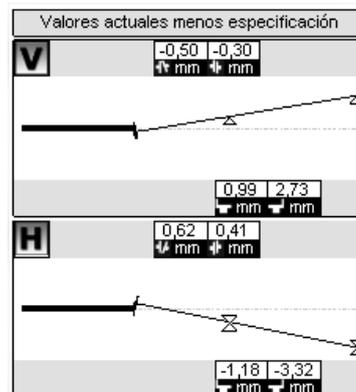


Figura 5.37 - Índices de desalinhamento do conjunto 4 (Extraído de Alignment Reporter).

Com a análise de vibração, foram obtidos os índices de vibração global em velocidade, mostrados na Tabela 5.8 para o conjunto 3, e na Tabela 5.9 para o conjunto 4.

Tabela 5.8- Índices de vibração em velocidade no conjunto 3.

Posição	H-1	V-1	A-1	H-2	V-2	A-1
Motor elétrico (mm/s)	2,72 ± 0,05	1,72 ± 0,03	1,92 ± 0,04	2,60 ± 0,05	2,60 ± 0,05	2,39 ± 0,05
Bomba (mm/s)	13,08 ± 0,26	4,35 ± 0,09	4,77 ± 0,10	6,46 ± 0,13	10,3 ± 0,21	6,39 ± 0,13

Tabela 5.9- Índices de vibração em velocidade no conjunto 4.

Posição	H-1	V-1	A-1	H-2	V-2	A-1
Motor elétrico (mm/s)	3,05 ± 0,06	2,94 ± 0,06	3,44 ± 0,07	2,94 ± 0,06	2,12 ± 0,04	3,01 ± 0,06
Bomba (mm/s)	12,48 ± 0,25	4,50 ± 0,09	4,08 ± 0,08	10,8 ± 0,22	5,12 ± 0,10	5,49 ± 0,11

Os espectros de velocidade do motor elétrico e da bomba do conjunto 3 são mostrados nas Figuras 5.38 e 5.39 respectivamente. O espectro do motor elétrico mostra um pico alto na frequência fundamental e na harmônicas correspondente à 2 vezes a frequência de rotação do eixo, sendo que nas demais harmônicas esses picos são desprezíveis. Por sua vez, no espectro da bomba tem-se um pico na frequência fundamental e nas harmônicas 2, 3, 4, 5 e 6 vezes a frequência de rotação do eixo, caracterizando em ambos o desalinhamento dos conjuntos. Estes resultados foram confirmados durante as medições com o alinhador a laser.

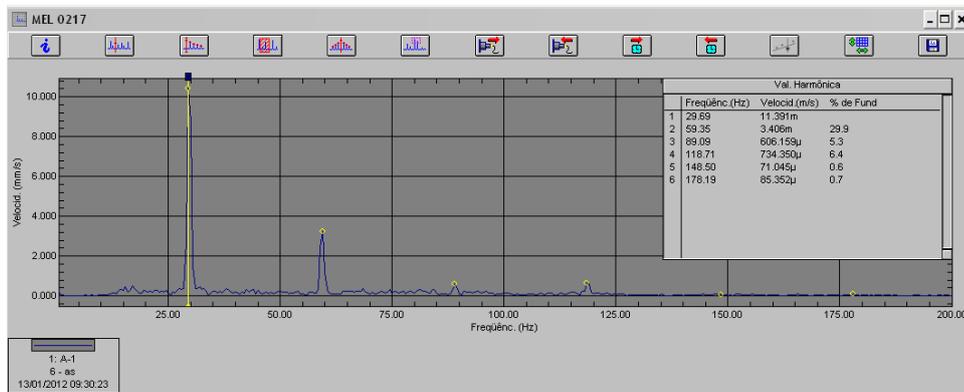


Figura 5.38 - Espectro ponto A-1 do motor elétrico no conjunto 3.

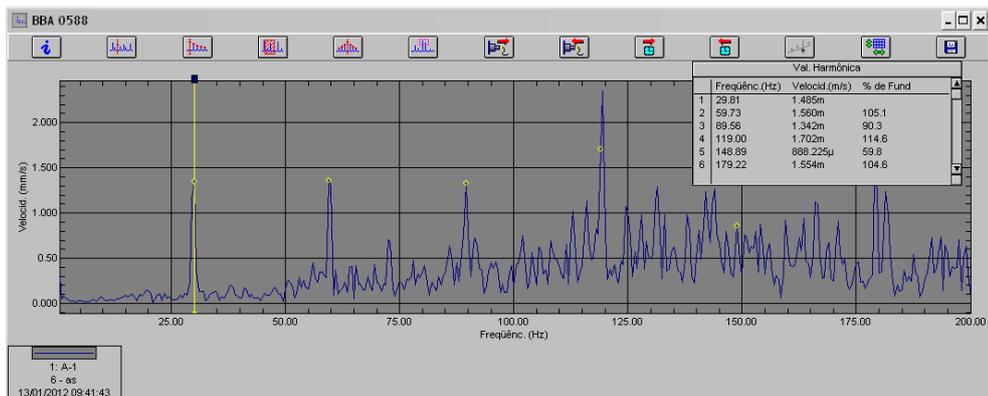


Figura 5.39 - Espectro ponto A-1 da bomba no conjunto 3.

Os espectros do motor elétrico e da bomba do conjunto 4 são mostrados na Figura 5.40 e Figura 5.41 respectivamente. O espectro do motor elétrico mostra um pico abaixo da frequência fundamental (instabilidade na base), na fundamental e nas harmônicas 2, 3, 4, 5 e 6 vezes da frequência de rotação do eixo. No espectro da bomba há um pico na frequência fundamental e nas harmônicas 2, 3, 4, 5 e 6 vezes da frequência de rotação do eixo, caracterizando em ambos o desalinhamento dos conjuntos, o que foi confirmado durante as medições com o alinhador a laser.

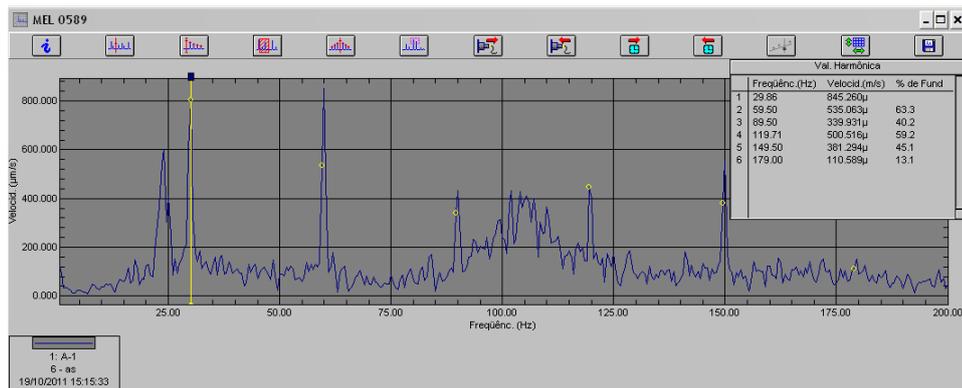


Figura 5.40 - Espectro ponto A-1 do motor elétrico no conjunto 4 .

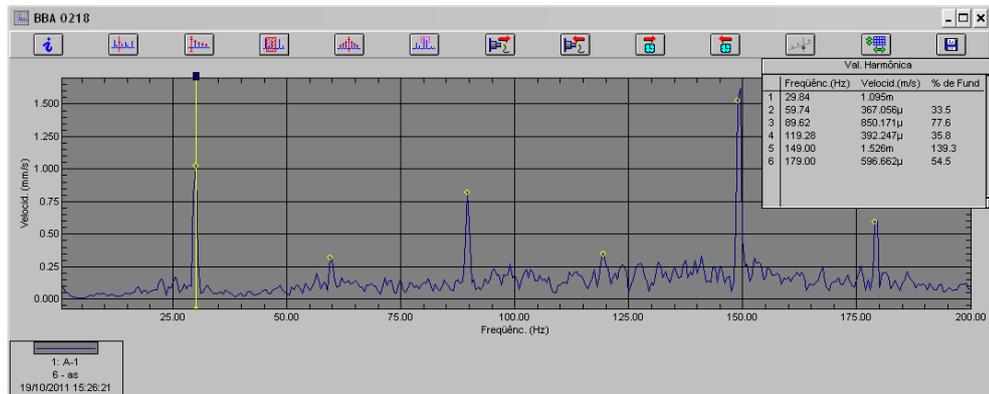


Figura 5.41 - Espectro ponto A-1 da bomba no conjunto 4 .

As Figuras 5.42 e 5.43 mostram as imagens térmicas com as temperaturas ao longo da linha dos eixos dos conjuntos 3 e 4.

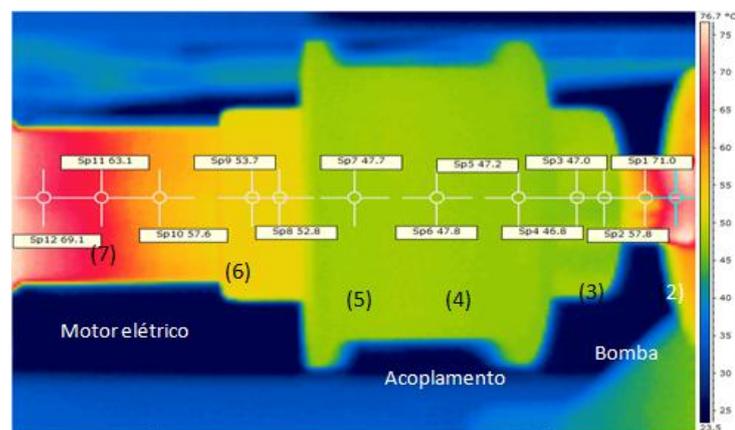


Figura 5.42 - Imagem térmica do conjunto 3 desalinhado .

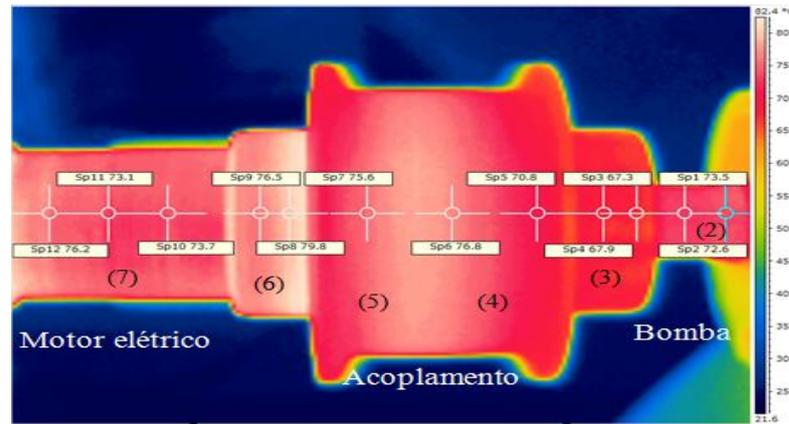


Figura 5.43 - Imagem térmica do conjunto 4 desalinhado .

Comparando a distribuição de temperatura nos dois conjuntos (Figura 5.44), nota-se a influência do índice de desalinhamento na distribuição de temperatura ao longo do eixo, ou seja, quanto maiores os índices de desalinhamento, maiores serão as temperaturas ao longo do eixo.

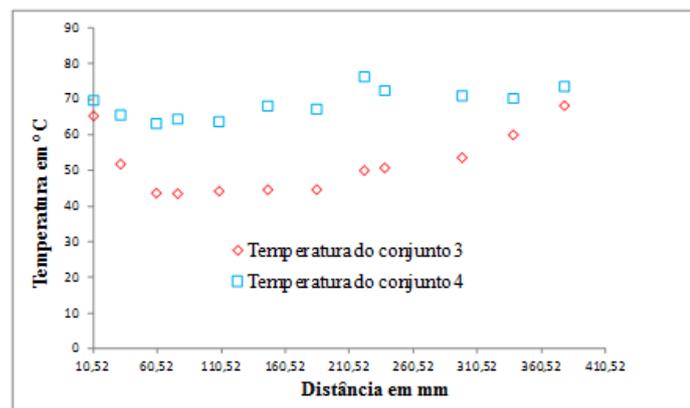


Figura 5.44 - Comparativo entre os conjunto 3 e 4.

As diferenças de temperatura do conjunto 4 em relação ao conjunto 3 são mostradas na Tabela 5.10, onde se vê que o conjunto 4 tem índices de desalinhamento maiores do que os do conjunto 3.

Tabela 5.10- Diferença das temperaturas dos conjuntos 3 e 4.

Diferença conj.3 e 4 desalinhado	Temperatura em °C										
	4,3±0,1	13,7±0,1	19,5±0,1	20,9±0,1	19,5±0,1	23,5±0,1	22,5±0,1	26,3±0,1	21,7±0,1	17,4±0,1	10,2±0,1

-Medição do nível de desalinhamento do conjunto 6

O conjunto 6 tem uma potência de 200cv, e um acoplamento flexível com elemento de transmissão de borracha AT90 do fabricante Antares. A Figura 5.45 mostra os índices de desalinhamento. Quando comparados com os permitidos pelo fabricante, o sentido vertical

angular está dentro dessa faixa, e acima estão os sentidos vertical paralelo, 0,37mm, horizontal angular, 0,21mm, e horizontal paralelo, 1,15mm.

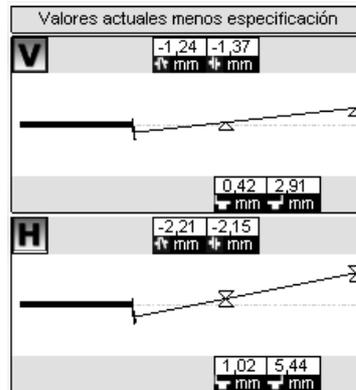


Figura 5.45 - Índices de desalinhamento do conjunto 6 (Extraído do Alignment Reporter).

Com a análise de vibração, foram obtidos os índices de vibração global em velocidade mostrados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11- Índices globais de velocidade do conjunto 6.

Posição	H-1	V-1	A-1	H-2	V-2	A-1
Motor elétrico (mm/s)	1,70 ± 0,03	1,34 ± 0,03	2,12 ± 0,04	2,04 ± 0,04	1,49 ± 0,03	1,27 ± 0,03
Bomba (mm/s)	2,80 ± 0,06	2,01 ± 0,04	2,70 ± 0,05	1,57 ± 0,03	1,42 ± 0,03	1,62 ± 0,03

Os espectro de velocidade do motor elétrico do conjunto 6 são mostrados na Figura 5.46, e os da bomba, na Figura 5.47. No espectro do motor elétrico visualiza-se um pico na frequência fundamental e picos em harmônicas 2, 3, 4 e 5 vezes a frequência de rotação do eixo, no espectro da bomba tem-se um pico na frequência fundamental e nas harmônicas 2, 3, 4 e 5 vezes a frequência de rotação do eixo caracterizando em ambos desalinhamento. Este resultado foi confirmado durante as medições com o alinhador a laser.

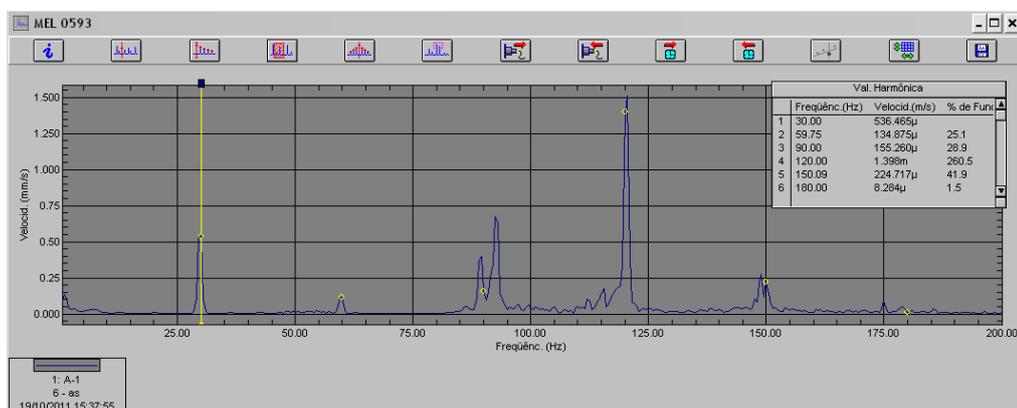


Figura 5.46 - Espectro ponto A-1 do motor elétrico no conjunto 6 .

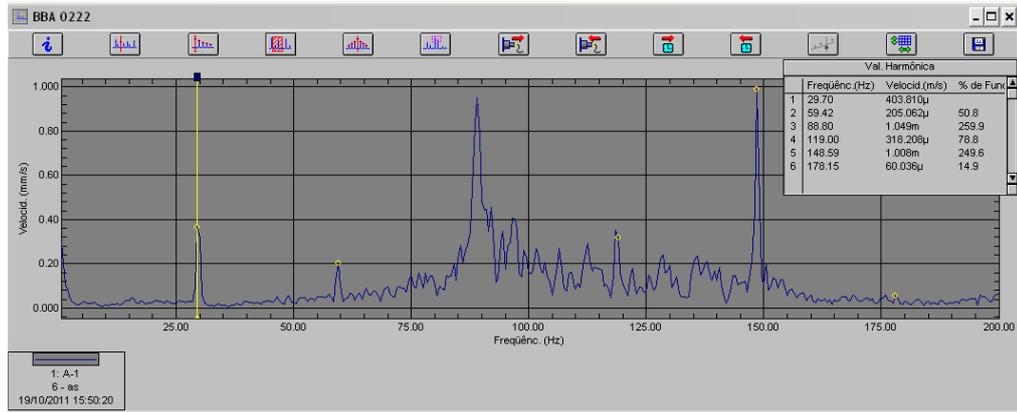


Figura 5.47 - Espectro ponto A-1 da bomba no conjunto 6 .

A Figura 5.48 mostra a imagem térmica com as temperaturas ao longo da linha do eixo do conjunto 6.

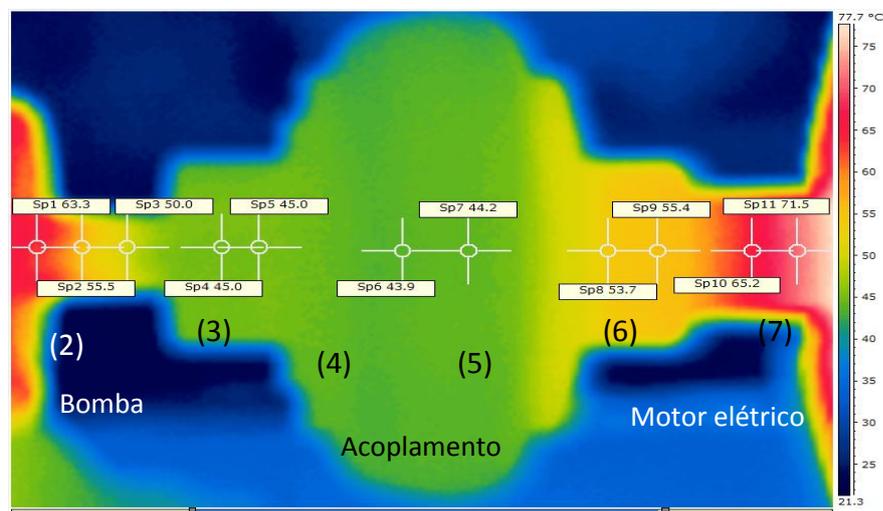


Figura 5.48 - Imagem térmica do conjunto 6 desalinhado .

A Figura 5.49 mostra as temperaturas pontuais em um gráfico de temperatura versus distância, tomando como base a primeira medida que dista 10,43mm do corpo da bomba.

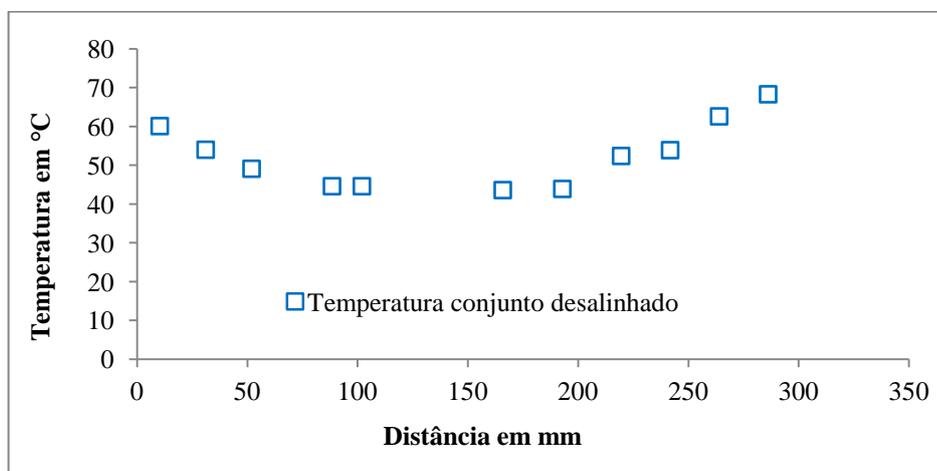


Figura 5.49 - Distribuição de temperatura do conjunto 6 desalinhado.

O conjunto 6 analisado durante esse trabalho tem desalinhamento conforme mostrado na Figura 5.45. Não foi possível durante a análise experimental, alinhar o conjunto tampouco foi medido outro conjunto para que se fizesse comparação dos índices de desalinhamento com o aumento de temperatura.

Medição do nível de desalinhamento do conjunto 8

O conjunto 8 tem uma potência de 200cv, e um acoplamento flexível com elemento de transmissão misto (pinos de aço revestidos de borracha) D-15 do fabricante Antares. A Figura 5.50 mostra os índices de desalinhamento, e quando comparados com os índices permitidos pelo fabricante, todos os parâmetros estão dentro do permitido.

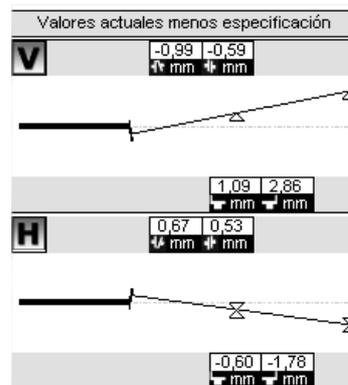


Figura 5.50 - Conjunto 8 (Extraído do Alignment Reporter).

Com a análise de vibração, foram obtidos os índices de vibração global em velocidade mostrado na Tabela 5.12.

Tabela 5.12– Índices de vibração global em velocidade no conjunto 8.

Posição	H-1	V-1	A-1	H-2	V-2	A-1
Motor elétrico (mm/s)	2,54 ± 0,05	3,57 ± 0,07	10,30 ± 0,21	4,09 ± 0,08	5,15 ± 0,10	8,54 ± 0,17
Bomba (mm/s)	26,11 ± 0,52	11,56 ± 0,23	7,99 ± 0,16	8,77 ± 0,18	7,33 ± 0,15	3,13 ± 0,06

As Figuras 5.51 e 5.52 mostram os espectros de velocidade do motor elétrico e da bomba do conjunto 8, respectivamente. No espectro do motor elétrico, visualiza-se um pico na frequência fundamental e picos em harmônicas 2, 3, 4 e 5 vezes a frequência de rotação do eixo. Na bomba tem-se um pico na frequência fundamental e nas harmônicas 2, 3, 4, 5 vezes a frequência de rotação do eixo, caracterizando em ambos um desalinhamento, resultado confirmado durante as medições com o alinhador a laser.

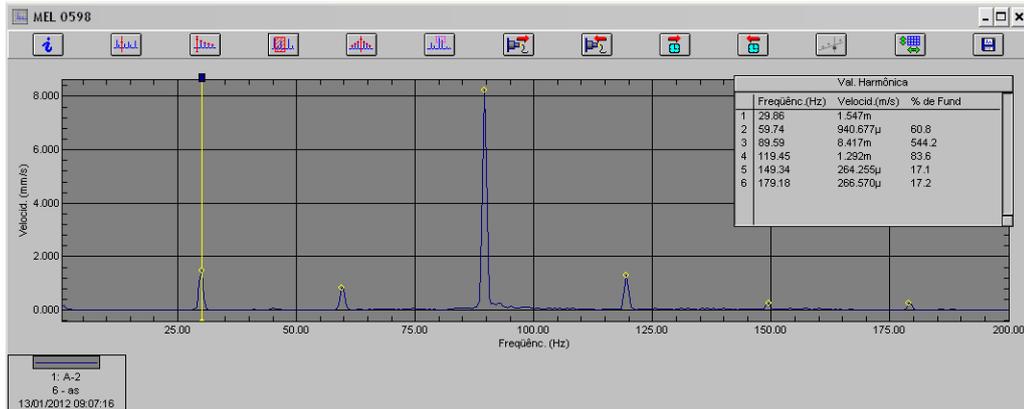


Figura 5.51 - Espectro ponto A-1 do motor elétrico no conjunto 8 .

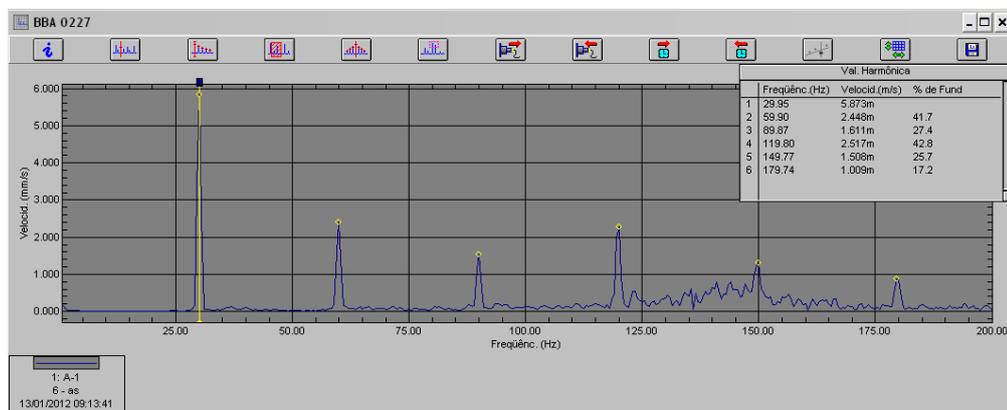


Figura 5.52- Espectro ponto A-1 da bomba no conjunto 8 .

A Figura 5.53 mostra a imagem térmica com as temperaturas ao longo da linha dos eixos do conjunto 8.

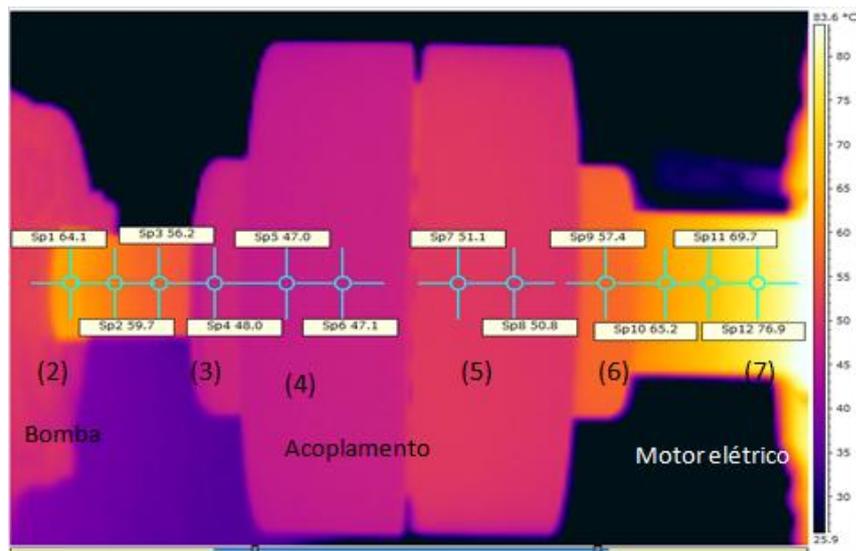


Figura 5.53 - Imagem térmica do conjunto 8.

A Figura 5.54 mostra as temperaturas pontuais em um gráfico de temperatura versus distância tomando como base a primeira medida que dista 10,43mm do corpo da bomba.

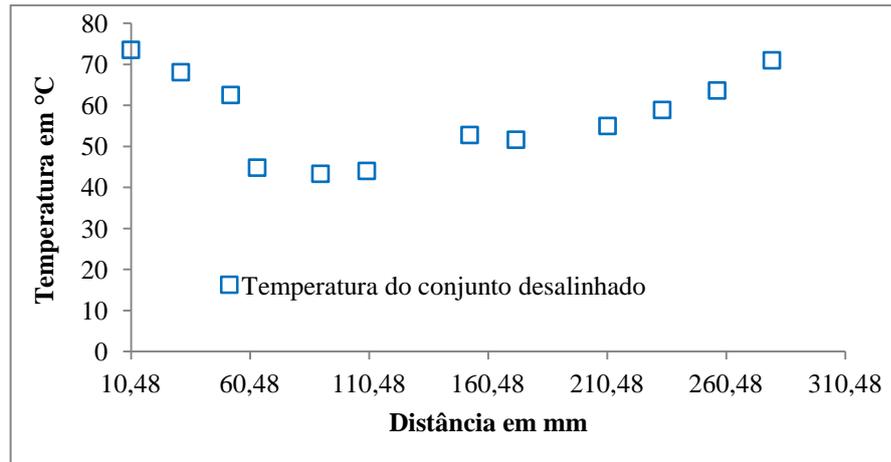


Figura 5.54 - Distribuição de temperatura no conjunto 8 .
(Temperatura ambiente 38,7°C.)

Nota-se que, apesar dos índices de desalinhamento permitidos pelo fabricante atingirem valores altos, quando comparados com outros tipos de acoplamentos, há um aumento bem acentuado de temperatura ao longo do eixo quando esses índices são comparados com a temperatura ambiente. Não foi possível, durante a análise experimental, alinhar o conjunto, tampouco foi medido outro conjunto para comparação dos índices de desalinhamento com o aumento de temperatura.

5.1. Análise das energias perdidas por desalinhamento

5.1.1. Cálculo da energia perdida por desalinhamento nos conjuntos

Durante a análise experimental, além dos parâmetros já mencionados foram coletadas as correntes elétricas de cada motor e, utilizando-se a média da corrente das três fases, foi calculada a potência real de cada motor, constatando-se que há uma diferença entre a potência de trabalho e a indicada na plaqueta dos motores. A Tabela 5.13 mostra esses resultados.

Tabela 5.13- Potência dos conjuntos analisados.

Equipamento	Potência calculada (hp)	Potência indicada na plaqueta (hp)
Conjunto 1	205	246,5
Conjunto 2	204	246,5
Conjunto 3	206	295,8
Conjunto 4	196	295,8
Conjunto 5	250	295,8
Conjunto 6	165	246,5
Conjunto 7	261	295,84
Conjunto 8	106	246,5

Utilizando a metodologia já utilizada por (Xu et al., 1993), ou seja, considerando o modelo numérico baseado no torque para cálculo da energia perdida por desalinhamento, foi

calculada a perda de energia por desalinhamento em cada conjunto, e o resultado é mostrado na Tabela 5.14.

Tabela 5.14-Energia perdida por desalinhamento.

Equipamento	Energia perdida por desalinhamento utilizando potencia calculada (KWh)
Conjunto 1	2418,04
Conjunto 2	5614,93
Conjunto 3	1562,38
Conjunto 4	2708,36
Conjunto 5	2670,75
Conjunto 6	8267,32
Conjunto 7	1996,89
Conjunto 8	2270,47
Energia total dos conjuntos	27509,14

No conjunto 7, além do resultado mostrado, foi feito um cálculo da potência e, após o primeiro e segundo alinhamentos, nota-se uma redução da perda de energia bem acentuada, tanto no primeiro alinhamento como no segundo, esses valores são mostrados na Tabela 5.15.

Tabela 5.15-Comparativo de energia perdida por desalinhamento conjunto 7.

Equipamento	Energia perdida por desalinhamento utilizando potencia calculada (KWh)
Conjunto 7	1996,89
Conjunto 7*	199,42
Conjunto 7**	121,55

* Primeiro alinhamento

**Segundo alinhamento

Considerando que a indústria vende energia pelo sistema de cogeração e utilizando o preço médio do MWh de R\$ 147,50 (dados obtidos no departamento elétrico da indústria), temos uma perda de aproximadamente RS 4.057,58 na safra 2012/2013, só nesses equipamentos medidos.

6. Conclusões e trabalhos futuros

6.1. Conclusões

Através dos resultados obtidos durante a análise dos índices de desalinhamento e de níveis de temperatura, observou-se uma relação direta entre o desalinhamento e o aumento de temperatura ao longo da linha dos eixos e no acoplamento. Assim, após o alinhamento do conjunto 7, a temperatura média ao longo do acoplamento caiu sensivelmente.

Quando comparados os índices de desalinhamento dos conjuntos em que os equipamentos são equivalentes (conjuntos 5 e 7, conjuntos 1 e 2 e os conjuntos 3 e 4), foi constatado, que naqueles em que os índices de desalinhamentos são maiores, há um aumento de temperatura ao longo da linha dos eixos e nos acoplamentos.

Desta forma, observou-se uma forte influência entre o aumento de temperatura e os tipos de materiais do elemento de ligação entre os acoplamentos. No conjunto em que são usados elementos não metálicos, o aumento de temperatura em relação aos índices de desalinhamento é muito baixo.

Nos gráficos, nos quais a distribuição de temperatura na região do acoplamento apresentou uma distribuição irregular, comprovou-se um desgaste excessivo no acoplamento.

Assim a termografia mostrou-se uma ferramenta com potencial para detecção de desalinhamento em conjuntos que têm elementos de ligação metálicos em seus acoplamentos.

6.2. Trabalhos futuros

- 1) Aprofundar os estudos do uso da termografia para caracterizar desalinhamentos de sistemas rotativos:
 - Realizar estudos sistemáticos em bancadas de laboratório com temperatura ambiente controlada.
 - Avaliar e comparar o efeito dos tipos de acoplamentos.
 - Verificar o efeito da potência dos equipamentos analisados.
- 2) Realizar estudos de avaliação e de quantificação das perdas de energia por desalinhamento em plantas industriais na região de Pernambuco e seu impacto econômico na produção.
- 3) Conduzir estudos teóricos sobre o processo de acoplamento de máquinas rotativas:

- Modelar matematicamente o conjunto rotativo e o acoplamento.
- Construir um modelo numérico do conjunto rotativo e do acoplamento.
- Fazer estudos numéricos impondo situações de desalinhamento e avaliar esforços mecânicos, vibrações e aumento de temperatura, resultante.
- Verificar relações funcionais entre esses parâmetros.

7. Bibliografia

ALMEIDA, M. T., ALMEIDA, R. F. V., Curso de análise de vibração I- Princípios de diagnósticos de defeitos em máquinas rotativas, 27ª Edição ampliada e revisada, 2010.

A-LINE MANUFACTURING'S, Disponível em <<http://www.alinemfg.com/A-750.htm>> Acesso em: 18 dezembro 2010.

ACCUSHIM, INC., Disponível <http://www.accushim.com/productDetail.asp_Q_catID_E_92_A_subCatID_E_82_A_productID_E_7>, Acesso em: 18 dezembro 2010.

ARAÚJO, M.C., Utilização de Câmera por Infra-Vermelho para Avaliação de Diferentes - Patologias em Clima Tropical e Uso Conjunto de Sistemas de bancos de Dados Para Detecção De Câncer de mama, Dissertação de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – UFPE, 2009.

BORTNEM, BRUCE, PRAY, F., BREWING, M., GROVER, P., Measuring Shaft Misalignment with Thermography , P/PM technology- February, 1995.

CORPORATION, F., GROUP, S., Introduction to Thermography Principles, American Technical Publishers, , 2009.

Catálogo do fabricante Antares de acoplamento, Disponível em <http://www.antaresacoplamentos.com.br/>, Acesso em: 18 dezembro 2010.

DAINTITH, E., GLATT, P., Reduce Costs with Laser Shaft Alignment, Germany, Technotes, Disponível em <<http://www.pruftechnik.com>>, Acesso em: 10 dezembro 2010.

FRAGA, A. S., TAVARES, M. R., MARTINS, K., ROSE, F., Ensaios não destrutivos termografia, Disponível em, <<http://pt.scribd.com/doc/21565850/Ensaios-nao-Destrutivos-Termografia>>, Acesso em: 10 dezembro 2010.

FLIR SYSTEMS, TermoCam T-200, manual do operador, 2009.

GABERSON, H.A., CAPPILLINO, R., Rotating Machinery Energy Loss Due to Shaft Misalignment, Proceedings of the Society for Machinery Failure Preventive Technology, Virginia Beach, VA, pp. 519-428, March 30 -April 2, 1996.

HAYRTON, R. P. F., Manutenção preditiva: acompanhando as condições dos equipamentos, Disponível em, <<http://qualidadeonline.wordpress.com/2010/03/08/manutencao-preditiva-acompanhando-as-condicoes-dos-equipamentos/>>, Acesso em: 8 outubro 2010.

HADDADNIA, J., RAHMANI, A., Intelligent fault detection of electrical equipment in ground substations using thermo vision technique , IEEE, 1997.

HINES, J. W., JESSE, S. J., KUROPATWINSKI, CARLEY, T., KUECK, J., NOWER, D., HALE, F., Motor shaft alignment versus efficiency analysis, published in P/PM Technology,

October 1997, pp10-13, and presented at the P/PM Technology Conference, Dec. 1-4, 1997, Dallas, TX.

HILI, M. A., FAKHFAKH T., HAMMAMI L., HADDAR M., Shaft misalignment effect on bearings dynamical behavior, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 26: 615–622, 2005.

HUSSAIN, K.M. A., Dynamic stability of two rigid rotors connected by a flexible coupling with angular misalignment , *Journal of Sound and Vibration* 266 pp.604–622, 2003.

INCROPERA, P. F., DEWITT, D., *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, 6ta. Edição, Editora LTC: Rio de Janeiro, 2008

JALAN, A. K.R., MOHANTY, A. R., Model based fault diagnosis of a rotor bearing system for misalignment and unbalance under steady-state condition, *Journal of Sound and Vibration* 327 pp.604–622, 2009.

Manual do fabricante de acoplamentos Falk, 2005.

Manual de operação do coletor 2526 da Buel & Kjaer, 1996.

Manual do fabricante de acoplamentos Ameridrive, 2011.

MCLEOD J.M., *Discovering misalignment with infrared: The Damage is Done*, Mississippi Power Company: Mississippi, 2001.

MODEST, M.F., *Radiative Heat Transfer*, 2º Edition, Academic Press, San Diego California, 2003.

MRA INSTRUMENTAÇÃO. *Manutenção Preditiva*, Disponível em http://www.mra.pt/industria/produtos/manutenção_preditiva, Acesso em: 18 dezembro 2011.

NIANCANG H., The infrared thermography diagnostic technique of high-voltage electrical equipments with internal faults, *Relatório, IEEE*, 1998.

NAKHAEINEJAD, M., GANERIWALA, S., *Observations on Dynamic Responses of Misalignments*, Tech Note, SpectraQuest Inc. 2009.

OPTALIN SMART-OPERATIN HANDBOOK, Prutechnik Alignment Sytems-Germany, 2008.

PIOTROWSKI, J., *Shaft Alignment Handbook*, 2nd edition. Marcel Dekker Inc, New York, NY, 1995.

RESENDE, O.C.F., Aplicações termográficas na manutenção. Disponível em <http://www.scribd.com/doc/36223052/artigo-termografia> Acesso em: 20 janeiro 2012.

SENAI-FEMIG., Apostila de manutenção,2004.

STEPHEN, J., HINES J. W., EDMONDSON A., NOWER D., Motor shaft misalignment bearing load analysis, The University of Tennessee. College of Engineering (1997).

SEKHAR, A.S., PRABHU, B.S., Effects of coupling misalignment on vibration of rotating machinery, Journal of Sound and Vibration 655–671, 1995.

SKF-Brasil, Disponível em <<http://www.skf.com/br/products/condition-monitoring/basic-condition-monitoring-products/vibration-measurement-tools/index.html>> acesso em: 13 de dezembro de 2011.

SOTO-FIHOS., Disponível em < http://www.sotofilhos.com.br/acoplamentos_elasticos.html> acesso em : 25 de junho de 2011.

VISION<<http://www.vision.ime.usp.br>> Acesso em 4 de março de 2011.

VOLLMER, M. , MOLLMANN, K. P., Infrared thermal imaging-Fundamentals, Research and applications, Wiley-Vch, 2010.

XU, M., ZATEZALO, J.M., MARANGONI R.D. Reducing Power Loss Through Shaft Alignment, P/PM Technology, October 1993.

XU, M., MARANGONI, R.D., Vibration analysis of a motor-flexible coupling-rotor system subject to misalignment and unbalance, Part I: theoretical model analysis, Journal of Sound and Vibration 663–679, 1994a.

XU, M., MARANGONI, R.D., Vibration analysis of a motor-flexible coupling system subject to a misalignment and unbalance, part 2: Experimental validation. J Sound Vib 176:681–691, 1994b.

YOUNUS, A. M., YANG, B. S., Thermal image analysis for machine fault diagnosis, The 8th IFTOMM International Conference on Rotor Dynamics, September 12-15, 2010.

Anexos

Anexo 1- Características dos termopares tipo T

Os termopares utilizados no protótipo foram do tipo T.

Tipo T - Termopares de Cobre

Constantan:Azul (+) e Vermelho (-) (Figura A.1).



Figura A.1 Termopares tipo T de Cobre Constantan azul (+) e vermelho (-)

Características:

- Resistentes à corrosão em atmosferas úmidas e são adequados para medições de temperaturas abaixo de zero.
- São resistentes à atmosfera oxidante (excesso de Oxigênio), redutoras (rica em Hidrogênio, Monóxido de Carbono), inertes (neutras), na faixa de -200 a 350°C.

Faixa de trabalho: -200 a 350 °C.

Aplicação: São adequados para trabalhar em faixas de temperatura abaixo de 0°C, encontradas em sistemas de refrigeração, fábrica de O₂, etc.

Identificação da polaridade:

- Cobre (+) é avermelhado, e o Cobre/Níquel (-) não.
- Código de cores/material isolante: Azul (+) e Vermelho (-).

Anexo 2-Análise de Erros

Os erros estão sempre presentes em medições experimentais, sendo a análise de erros experimental de fundamental importância para a validação de um experimento. Os erros experimentais podem ser classificados em erros fixos ou sistemáticos e erros aleatórios.

Erros fixos ou sistemáticos – são erros causados por fontes identificáveis, este tipo de erro indica valores acima ou abaixo do valor real quando se faz várias medições. Os erros sistemáticos podem ser causados devido a:

- Instrumento de medida com perda de calibração.
- Interferência de fatores externos ao experimento como temperatura, pressão, umidade, fontes de campo magnético, vibração, etc.
- Procedimento inadequado do observador, por exemplo, erro de paralaxe.

Erros aleatórios – são erros de natureza desconhecida, difíceis de serem eliminados. Têm uma relação direta com a repetitividade do instrumento. Esses erros podem ser tratados, de forma quantitativa, através de métodos estatísticos, de forma que o seu efeito na grandeza medida e na sua propagação em cálculos possa ser determinado.

Esse erro causa uma dispersão aleatória dos valores medidos, pois, quando se faz uma série de medições, a metade das medidas estaria acima do valor verdadeiro, e a outra metade abaixo deste valor. Para se ter uma boa estimativa da grandeza medida, calcula-se a média dos N valores medidos, conforme a Equação 4.1:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (\text{A2.1})$$

Os valores obtidos deverão estar distribuídos em torno do valor médio, sendo necessário estimar a incerteza ou o erro dessas medições, pois, dependendo da sua dispersão em torno da média, tem-se uma medida mais ou menos precisa. Uma forma de quantificar esta dispersão é através do desvio padrão (σ) definido pela seguinte Equação 4.2:

$$\sigma^2 = \Delta X = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \quad (\text{A2.2})$$

O desvio padrão estabelece uma probabilidade de 68% de que a medida esteja num intervalo ($\pm \sigma$) em torno da média. Para uma probabilidade maior, a faixa de incerteza deve ser aumentada, como mostra a Tabela A 2.1:

Tabela A 2.1-Valores de probabilidade em função do Parâmetro Z.

<i>Incerteza</i>	<i>Probabilidade</i>
0,647 σ	50,00%
σ	68,67%
1,645 σ	90,00%
2 σ	95,45%
2,576 σ	99,00%
3 σ	99,73%

O erro de uma estimativa de medições experimentais pode ser obtido através do cálculo do erro padrão da média conforme Equação 4.3:

$$\Delta \bar{x} = \sigma_m = \frac{Z\sigma}{\sqrt{N}} \quad (\text{A2.3})$$

Através da escolha do valor do parâmetro Z , tem-se uma probabilidade indicada na tabela.

O valor estimado de uma grandeza medida e sua incerteza ou erro experimental é dado pela Equação 4.4:

$$x = \bar{x} \pm \Delta\bar{x} \quad (\text{A2.4})$$

Para medições experimentais, onde é realizada apenas uma medição da grandeza de interesse, mede-se a incerteza dessa medição de duas formas, conforme segue:

4. Incerteza de Resolução: Se a grandeza física medida estiver estável ou variar muito lentamente, com o tempo pode-se estimar o erro através da resolução do instrumento de acordo com a seguinte regra: *A incerteza será computada como sendo a metade da menor divisão da escala.*
5. Incerteza Relativa: A incerteza relativa de uma medida é definida como a razão entre a incerteza absoluta e o valor da medida realizada, como segue:

$$u_{\text{medida}} = \pm \frac{\text{incerteza absoluta}}{\text{valor da grandeza física medida}}$$

Muitas vezes, os valores das grandezas medidas são utilizados para avaliar outras grandezas de interesse, a partir de modelos físico-matemáticos (lei dos gases perfeitos, lei de Fourier, Segunda lei de Newton, etc.) ou relacionados pela definição física de uma dada grandeza (densidade, Número de Reynolds, etc.). Nesse caso, as incertezas das medidas primárias ou experimentais devem se propagar através dos cálculos, resultando numa incerteza da grandeza secundária ou derivada.

A seguir será mostrado um procedimento geral sobre o cálculo da propagação de incertezas, considerando as medições experimentais de n grandezas, de acordo com as anotações de aula do professor Jorge Guerrero.

Sejam X_1, X_2, \dots, X_n grandezas físicas determinadas de forma experimental. Representam-se as incertezas relativas de cada uma destas grandezas como:

$$u_{X_i}, \text{ com } i = 1 \Rightarrow n$$

Deseja-se analisar, dessa forma, como os erros se propagam no cálculo da grandeza R , obtida indiretamente através das medidas das grandezas X_i .

Considera-se, aqui, que existe uma dependência funcional entre a variável R e as variáveis Xi.

$$R = R(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

O efeito de uma variação de δX_i sobre R pode ser descrita como; $\delta R = \frac{\partial R}{\partial X_i} \delta X_i$.

Normalizando esta variação de R (δR) em relação à grandeza R; $\frac{\delta R}{R} = \frac{\partial R}{\partial X_i} \frac{\delta X_i}{R}$ multiplicando

e dividindo o lado direito da equação por Xi, obtém-se a incerteza relativa de R devido à incerteza relativa de Xi conforme Equação 4.5.

$$\frac{\delta R}{R} = \frac{X_i}{R} \frac{\partial R}{\partial X_i} \frac{\delta X_i}{X_i} = \frac{X_i}{R} \frac{\partial R}{\partial X_i} u_{X_i} \quad (\text{A2.5})$$

Efeitos similares devem ocorrer devido a variações das demais grandezas envolvidas. Estima-se a incerteza de R devido à combinação dos efeitos das incertezas de todas as grandezas envolvidas. Isto pode ser realizado através da expressão mostrada pela Equação 4.6:

$$u_R = \left[\left(\frac{X_1}{R} \frac{\partial R}{\partial X_1} \frac{\delta X_1}{X_1} \right)^2 + \left(\frac{X_2}{R} \frac{\partial R}{\partial X_2} \frac{\delta X_2}{X_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{X_n}{R} \frac{\partial R}{\partial X_n} \frac{\delta X_n}{X_n} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Ou

$$\delta R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial X_1} \delta X_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial X_2} \delta X_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial X_n} \delta X_n \right)^2 \right]^{1/2}$$

Anexo 3-Equipamentos

Anemômetro: usado para a medição da umidade do ar na casa de bombas e na sala onde foi feita a calibração da câmera termográfica. O anemômetro, mostrado na Figura A 3.1, é tipo turbina HHF23 da OMEGA, com exatidão de $\pm 3\%$ da escala.



Figura A 3.1 - Anemômetro Omega tipo HHF23.

Alicate amperímetro digital: ET-3850 da MINIPA com precisão de 400A +- (2%Leit+5díg), faixa de 400A a 1000A, resolução de 0,1A, conforme mostra a Figura A 3.2. As medições de corrente foram usadas para determinar a potência consumida dos conjuntos de bombas medidos durante esse trabalho, como também para verificar se houve alguma redução na mesma após o alinhamento.



Figura A 3.2 - Alicate amperímetro.