

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Rodolfo Aquino de Farias

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA TERMOGRAFIA PARA A DETECÇÃO DE  
FALHA POR LUBRIFICAÇÃO INADEQUADA EM REDUTOR DE ROSCA  
SEM FIM**

Campina Grande, PB

2022

Rodolfo Aquino de Farias

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA TERMOGRAFIA PARA A DETECÇÃO DE  
FALHA POR DE LUBRIFICAÇÃO INADEQUADA EM REDUTOR DE ROSCA  
SEM FIM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Ciências e Tecnologias da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Análise e Projeto de Sistemas Termomecânicos

Orientador:

Wanderley Ferreira de Amorim Júnior, Dr.

Campina Grande, PB.

2022

F224e

Farias, Rodolfo Aquino de.

Estudo da viabilidade da termografia para a detecção de falha por lubrificação inadequada em redutor de rosca sem fim / Rodolfo Aquino de Farias. – Campina Grande, 2022.

142 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2022.

"Orientação: Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior".  
Referências.

1. Termografia Infravermelha. 2. Redutor de Rosca sem Fim. 3. Temperatura. 4. Termotribologia. I. Amorim Júnior, Wanderley Ferreira de. II. Título.

CDU 621(043)

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA TERMOGRAFIA PARA A DETECÇÃO DE FALHA POR  
LUBRIFICAÇÃO INADEQUADA EM REDUTOR DE ROSCA SEM FIM**

**RODOLFO AQUINO DE FARIAS**

Dissertação Aprovada em 23/02/2022 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes membros:

  
Prof. Dr. WANDERLEY FERREIRA DE AMORIM JR.  
CPF: 872.441.524-34  
(ORIENTADOR)

  
PROF. DR. MARCELO BEZERRA GRILO  
CPF: 112.085.114-91  
(EXAMINADOR INTERNO)

  
PROF. JÚLIO MANNUEL TAVARES DINIZ  
CPF: 013.024.554-27  
(EXAMINADOR EXTERNO)

Para minha mãe, Josélia Aquino de Farias, com todo meu amor e para minha namorada Marcela de Melo Cordeiro Eulálio, a qual sempre me apoia.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha mãe, Josélia Aquino de Farias, minha namorada, Marcela de Melo Cordeiro Eulálio, minha irmã, Mariana Aquino de Farias e meu sobrinho José Henrique Aquino de Farias Silva, familiares dedicados e sempre presentes que me apoiaram e me mantiveram firme para conceber este trabalho, que tanto me exauriu, ajudando e aconselhando para auxílio na transformação da pessoa que sou hoje.

Agradeço ao professor, o qual me instruiu sobre a ideia deste projeto, me cedeu todo o equipamento e material necessário e acima de tudo, apoio do início ao fim do trabalho, o Prof. Dr. Juscelino de Farias Maribondo pela sua paciência, atenção e disponibilidade em uma época de pandemia.

Agradeço especialmente ao Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior, o qual me trata como um filho desde a época de graduação, onde foi meu orientador de trabalho de conclusão de curso e orientador de estágio supervisionado, devido aos conselhos, orientações, auxílios e direcionamentos. Graças a sua ajuda, consegui evoluir como estudante, profissional e pesquisador.

Agradeço a todos os membros dos laboratórios LEEST, LVI e LAMMEA da Universidade Federal de Campina Grande, os quais me auxiliaram em várias etapas do trabalho, sempre buscando facilitar ou sanar os problemas durante as atividades de cada etapa.

Por fim, agradeço aos meus amigos pessoais, Douglas Arthur de Abreu Rolim, o qual sempre me auxilia em qualquer fase da minha vida, sendo uma amizade duradoura de mais de 10 anos e João Manoel de Oliveira Neto, o qual me auxiliou desde o início deste projeto até o dia da apresentação final sem medir esforços.

“Com numerosos cálculos, pode-se obter a vitória. Teme quando os cálculos forem escassos. E quão poucas chances de vencer tem aquele que nunca calcula!”

(Sun Tzu)

FARIAS, R. A. DE. **ESTUDO DA VIABILIDADE DA TERMOGRAFIA PARA A DETECÇÃO DE FALHA POR LUBRIFICAÇÃO INADEQUADA EM REDUTOR DE ROSCA SEM FIM**. 2022. 110p. Dissertação. (Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 2022.

## RESUMO

Este estudo teve por objetivo verificar a possibilidade de detecção de falhas decorrentes de lubrificação inadequada em redutor de velocidade do tipo rosca sem fim, a partir de condições controladas em laboratório aplicadas em bancada experimental, por meio da técnica de termografia infravermelha. A motivação surgiu do estudo sobre termotribologia, no qual se constatou a importância de compreender a influência das falhas derivadas do contato entre as peças que resultam na alteração da temperatura das máquinas e equipamentos. Metodologicamente, esta pesquisa, com abordagem quantitativa, classifica-se como aplicada, explicativa, experimental e bibliográfica. Para coleta dos dados experimentais, foram realizados ensaios termográficos em redutor mecânico de engrenagem rosca sem fim, onde aferiu-se os valores de temperatura a partir de sua face para seguintes condições de funcionamento: sem carga, variando os níveis de lubrificante e, com carga, variando os níveis de lubrificante em um ambiente fechado com rígido controle de temperatura ambiente e umidade do ar. Como resultados, apresentaram-se valores de temperatura que iniciam em 23 °C e chegam até 45 °C para condições sem carga e temperaturas que iniciam em 23°C e chegam até 59 °C para condições com carga. Estes valores demonstraram que o redutor não apresentou variação significativa de temperatura devido à falha, deficiência de lubrificação, mesmo quando trabalhando com carga extra. Somando a isso, foram concebidas equações de aquecimento do redutor para verificação do seu funcionamento. Então, conclui-se que não é possível distinguir, via termografia, a deficiência de lubrificante num redutor do tipo LILO ERV-042-n2.

**Palavras-chave:** Termografia infravermelha. Redutor de rosca sem fim. Temperatura. Termotribologia.

FARIAS, R. A. DE. **ESTUDO DA VIABILIDADE DA TERMOGRAFIA PARA A DETECÇÃO DE FALHA POR LUBRIFICAÇÃO INADEQUADA EM REDUTOR DE ROSCA SEM FIM**. 2022. 110p. Dissertação. (Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 2022.

### **ABSTRACT**

The objective of this study is to evaluate the possibility of detecting failures in a worm gear reducer system due to inadequate lubrication, using the infrared thermography technique, in a laboratory with controlled conditions. The motivation of this study arose from the study on thermotribology, in which was found that there is lack of understanding the relation between the contact failures between moving parts and the change of temperature in these parts in machines and equipments. Methodologically, this research, as a quantitative approach, is classified as applied, explanatory, experimental and bibliographical. To collect the experimental data, thermographic tests were carried out in a mechanical worm gear reducer, where the temperature values were measured from its surface for the following operating conditions: no load, varying the lubricant levels, and with load, varying lubricant levels, in a closed environment with strict control of ambient temperature and air humidity. As a result, temperature values that start at 23 °C and reach up to 45 °C for unloaded conditions and temperatures that start at 23 °C and reach up to 59 °C for loaded conditions were presented. These results reveal that the gearbox did not present a significant temperature change due to lack of lubrication, even when working with extra load. The results also present equations that relates the heating of the gearbox with its operation. Hence this paper shows that it is not possible to distinguish, via thermography, the lubricant deficiency in a LILO ERV-042-n2 gearbox.

Keywords: Infrared thermography. Worm-gear reducer. Temperature. Thermotribology.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Representação de elementos de transmissão em funcionamento	25
Figura 2:	Classificação dos redutores	27
Figura 3:	Exemplo de redução por corrente	28
Figura 4:	Redutor de engrenagem rosca sem fim	30
Figura 5:	Tipos de contato	32
Figura 6:	Principais tipos de desgaste	33
Figura 7:	Sistema de redução de Bauer et. al. (2018)	37
Figura 8:	Detecção de calor no redutor mecânico do trabalho de Bauer et. al. (2018) por meio de câmera infravermelha e simulação CFD	38
Figura 9:	Conceito de nova caixa de engrenagem com tampa longa mais o ventilador radial (a) e conceito com direção reversa do fluxo de ar (b)	39
Figura 10:	William Herschel e o espectro infravermelho	46
Figura 11:	Corpo emitindo radiação no vácuo	47
Figura 12:	Espectro de ondas eletromagnéticas (visão física)	49
Figura 13:	Subdivisão da banda do espectro infravermelho	50
Figura 14:	Transmissão de radiação para área de um espaço preenchido com material radiante	51
Figura 15:	Ilustração do ângulo sólido num volume semiesférico	53
Figura 16:	Intensidade radiativa se propagando através de um elemento de volume V qualquer	54
Figura 17:	Diferença entre corpo negro e corpo real	57
Figura 18:	Comparação entre emissividades (a) e direção das intensidades radiativas (b)	58
Figura 19:	Absorção, reflexão e transmissão espectrais associados a um meio semitransparente	61
Figura 20:	Exemplo de termovisor	67
Figura 21:	Termografias (a) qualitativa e (b) quantitativa	67
Figura 22:	Funcionamento da câmera termográfica	70
Figura 23:	Procedimentos simplificados para o método indireto ou refletor	73
Figura 24:	Exemplo de método indireto para aferir temperatura refletida	74
Figura 25:	Procedimentos simplificados para o método direto	74
Figura 26:	Exemplo de método direto para aferir temperatura refletida	75

Figura 27: Configuração do experimento de Waqar e Demetgul (2016)	78
Figura 28: Termogramas do redutor (a) sem defeito e (b) com defeito do trabalho de Waqar e Demetgul (2016)	79
Figura 29: Bancada experimental do trabalho de Karabacak, Ozmen e Gumusel (2020)	80
Figura 30: Defeitos das engrenagens do trabalho de Karabacak, Ozmen e Gumusel (2020)	81
Figura 31: Termogramas do redutor com as engrenagens no trabalho de Karabacak, Ozmen e Gumusel (2020)	82
Figura 32: Fluxograma metodológico da pesquisa	85
Figura 33: FASE 1 da pesquisa	86
Figura 34: FASE 2 da pesquisa	88
Figura 35: Perspectiva 3D do projeto da bancada experimental e indicação de seus principais componentes	89
Figura 36: Cabine de isolamento térmica	90
Figura 37: Testes de funcionalidade dos equipamentos para ensaios termográficos	91
Figura 38: FASE 3 da pesquisa	92
Figura 39: Equipamento de proteção individual utilizado pelo operador do termovisor	92
Figura 40: Limpeza do redutor para execução da termografia	93
Figura 41: FASE 4 da pesquisa	94
Figura 42: Equipamentos auxiliares para medição de rotações, temperatura e umidade	95
Figura 43: Arruelas industriais utilizadas no trabalho para simulação de carga extra	96
Figura 44: Equipamentos para coleta e armazenamento do óleo lubrificante do redutor	97
Figura 45: FASE 5 da pesquisa	99
Figura 46: Exemplo de termograma do redutor mecânico	100
Figura 47: FASE 6 da pesquisa	101
Figura 48: Software especializado em tratamento de termogramas FLIR tools	101
Figura 49: Gráfico de dispersão do aquecimento do redutor sem carga e com 150 ml de lubrificante	105
Figura 50: Gráfico de dispersão do aquecimento do redutor sem carga e com 100 ml de lubrificante	108

Figura 51: Gráfico de dispersão do aquecimento do redutor sem carga e com 50 ml de lubrificante	110
Figura 52: Termogramas do experimento 3 (sem carga e com 150 ml) ao longo dos 50 minutos	111
Figura 53: Termogramas do experimento 15 (sem carga e com 50 ml) ao longo dos 50 minutos	112
Figura 54: Gráfico de dispersão do aquecimento do redutor com carga e com 150 ml de lubrificante	115
Figura 55: Gráfico de dispersão do aquecimento do redutor com carga e com 100 ml de lubrificante	118
Figura 56: Gráfico de dispersão do aquecimento do redutor com carga e com 50 ml de lubrificante	120
Figura 57: Termogramas do experimento 21 (com carga e com 150 ml) ao longo dos 50 minutos	121
Figura 58: Termogramas do experimento 32 (com carga e com 50 ml) ao longo dos 50 minutos	122
Figura 59: Gráfico comparativo do aquecimento do redutor em todas condições	124
Figura 60: Análise de termogramas de redutor LILO ERV-042-n2	125
Figura 61: Gráfico de dispersão e equação do aquecimento do redutor sem carga e com 150 ml de lubrificante	128
Figura 62: Gráfico de dispersão e equação do aquecimento do redutor com carga e com 150 ml de lubrificante	130

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Possibilidades de falhas em engrenagens	41
Quadro 2: Normas técnicas para ensaios termográficos	69
Quadro 3: Informações obtidas sobre engrenagens de rosca sem fim e termografia	87
Quadro 4: Detalhamento técnico dos itens utilizados na construção da bancada de testes	90
Quadro 5: Temperaturas obtidas pela termografia no redutor sem carga e com 150 ml de lubrificante	104
Quadro 6: Dados do ambiente para termografia no redutor sem carga e com 150 ml de lubrificante	104
Quadro 7: Dados adicionais para termografia no redutor sem carga e com 150 ml de lubrificante	104
Quadro 8: Temperaturas obtidas pela termografia no redutor sem carga e com 100 ml de lubrificante	107
Quadro 9: Dados do ambiente para termografia no redutor sem carga e com 100 ml de lubrificante	107
Quadro 10: Dados adicionais para termografia no redutor sem carga e com 100 ml de lubrificante	107
Quadro 11: Temperaturas obtidas pela termografia no redutor sem carga e com 50 ml de lubrificante	109
Quadro 12: Dados do ambiente para termografia no redutor sem carga e com 50 ml de lubrificante	109
Quadro 13: Dados adicionais para termografia no redutor sem carga e com 50 ml de lubrificante	109
Quadro 14: Temperaturas obtidas pela termografia no redutor com carga e com 150 ml de lubrificante	114
Quadro 15: Dados do ambiente para termografia no redutor com carga e com 150 ml de lubrificante	114
Quadro 16: Dados adicionais para termografia no redutor com carga e com 150 ml de lubrificante	114
Quadro 17: Temperaturas obtidas pela termografia no redutor com carga e com 100 ml de lubrificante	117
Quadro 18: Dados do ambiente para termografia no redutor com carga e com	

100 ml de lubrificante	117
Quadro 19: Dados adicionais para termografia no redutor com carga e com 100 ml de lubrificante	117
Quadro 20: Temperaturas obtidas pela termografia no redutor com carga e com 50 ml de lubrificante	119
Quadro 21: Dados do ambiente para termografia no redutor com carga e com 50 ml de lubrificante	119
Quadro 22: Dados adicionais para termografia no redutor com carga e com 50 ml de lubrificante	119
Quadro 23: Temperaturas obtidas pela termografia no redutor sem carga e com 150 ml de lubrificante para geração da equação de aquecimento do redutor	127
Quadro 24: Dados do ambiente para termografia no redutor sem carga e com 150 ml de lubrificante para geração da equação de aquecimento do redutor	127
Quadro 25: Dados adicionais para termografia no redutor sem carga e com 150 ml de lubrificante para geração da equação de aquecimento do redutor	127
Quadro 26: Temperaturas obtidas pela termografia no redutor com carga e com 150 ml de lubrificante para geração da equação de aquecimento do redutor	129
Quadro 27: Dados do ambiente para termografia no redutor com carga e com 150 ml de lubrificante para geração da equação de aquecimento do redutor	129
Quadro 28: Dados adicionais para termografia no redutor com carga e com 150 ml de lubrificante para geração da equação de aquecimento do redutor	129

## LISTA DE SÍMBOLOS

$c$  - Velocidade da luz no vácuo [m/s];

$\lambda$  - Comprimento de onda [ $\mu\text{m}$ ];

$\nu$  - Frequência da onda eletromagnética [Hz]

$dA$  - Elemento infinitesimal da área projetada [ $\text{m}^2$ ];

$dV$  - Elemento infinitesimal do volume [ $\text{m}^3$ ];

$qA$  - Fluxo de energia, energia por unidade de área [ $\text{W}/(\text{m}^2)$ ];

$qV$  - Fluxo de energia, energia por unidade de volume [ $\text{W}/(\text{m}^3)$ ];

$t$  - Tempo (s);

$J$  - Joule;

$\theta$  - Ângulo entre a direção do fluxo que chega à área receptora e o vetor normal à superfície emissora [ $^\circ$ ], ângulo zênite

$\varphi$  - Ângulo entre o vetor normal à superfície receptora e a direção do fluxo [ $^\circ$ ], ângulo azimutal;

$T$  - Temperatura;

$c$  - velocidade da luz no meio (metros por segundo);

$c_0$  - velocidade da luz no vácuo (metros por segundo);

$n$  - índice de refração no meio;

$I_\lambda(S, \Omega, t)$  - intensidade radiativa espectral (medida em  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$ );

$dQ_\lambda(S, \Omega, t) / dAd\lambda d\Omega dt$  - diferencial de quantidade de energia mensurável em função da área finita, ângulo sólido e quantidade de tempo (medido em Joules);

$Q_{rad}(dA_1)$  - taxa de energia radiativa total do recinto chegando à área  $dA_1$  (Joules);

$qAdA$  - taxa de energia radiativa da superfície de um elemento de área do espaço cúbico (Joules);

$qVdV$  - taxa de energia radiativa do elemento volumétrico dentro do espaço cúbico (Joules);

$E_\lambda$  - Poder Emissivo Espectral (medido em  $\text{W}/\text{m}^2\mu\text{m}$ );

$\varepsilon_{\lambda, \theta}(\lambda, \theta, \varphi, T)$  - emissividade direcional espectral;

$I_{\lambda, \varepsilon}(\lambda, \theta, \varphi, T)$  - intensidade radiativa do corpo real;

$I_{b, \lambda}(\lambda, T)$  - intensidade radiativa do corpo negro;

$\varepsilon_\theta(\theta, \varphi, T)$  - emissividade direcional total;

$I_\varepsilon(\theta, \varphi, T)$  - intensidade radiativa do corpo real para uma média dos comprimentos de onda;

$I_b(T)$  - intensidade radiativa do corpo negro para uma média dos comprimentos de onda.

$\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$  - emissividade hemisférica espectral;

$E_\lambda(\lambda, T)$  - poder emissivo do corpo real;

$E_{b,\lambda}(\lambda, T)$  - poder emissivo do corpo negro.

$\varepsilon(T)$  - emissividade hemisférica total;

$E(T)$  - poder emissivo do corpo real médio para todos comprimentos de onda;

$E_b(T)$  - poder emissivo do corpo negro médio para todos comprimentos de onda.

$G_\lambda$  é a irradiação espectral (medida em  $(W/(m^2 \cdot \mu m))$ );

$G_{\lambda,abs}$  - porção de irradiação espectral absorvida pelo corpo  $(W/(m^2 \cdot \mu m))$ ;

$G_{\lambda,ref}$  - porção de irradiação espectral refletida pelo corpo  $(W/(m^2 \cdot \mu m))$ ;

$G_{\lambda,tr}$  - porção de irradiação espectral transmitida pelo corpo  $(W/(m^2 \cdot \mu m))$ ;

$\alpha_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \varphi)$  - absortividade direcional espectral;

$I_{\lambda,abs}(\lambda, \theta, \varphi, T)$  - porção da intensidade radiativa absorvida pelo corpo;

$I_{b,\lambda}(\lambda, T)$  - intensidade radiativa incidente total no corpo;

$\alpha_\lambda(\lambda)$  é absortividade hemisférica espectral;

$G_{\lambda,abs}(\lambda)$  é a porção de irradiação absorvida pelo corpo;

$G_\lambda(\lambda)$  é a irradiação espectral incidente;

$\rho_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \varphi)$  é a refletividade direcional espectral;

$I_{\lambda,ref}(\lambda, \theta, \varphi, T)$  é a porção da intensidade radiativa refletida pelo corpo;

$I_{b,\lambda}(\lambda, T)$  é a intensidade radiativa incidente total no corpo;

$\rho_\lambda(\lambda)$  é refletividade hemisférica espectral;

$G_{\lambda,ref}(\lambda)$  é a porção de irradiação refletida pelo corpo;

$G_\lambda(\lambda)$  é a irradiação espectral incidente;

$\tau_\lambda(\lambda)$  é transmissividade hemisférica espectral;

$G_{\lambda,tr}(\lambda)$  é a porção de irradiação transmitida pelo corpo;

$G_\lambda(\lambda)$  é a irradiação espectral incidente;

$\varepsilon$  é a emissividade hemisférica total;

$\tau$  é a transmissividade hemisférica total;

$\rho$  é a refletividade hemisférica total;

$\alpha$  é a absortividade hemisférica total.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I</b>	19
1. Introdução	19
1.1 Objetivo geral	22
1.2 Objetivos específicos	22
1.3 Justificativa	22
1.4 Delimitação do trabalho	23
1.5 Estrutura do trabalho	23
<b>CAPÍTULO II</b>	25
2. Sistemas de transmissão de movimento	25
2.1 Redutores de velocidade	26
2.1.1 Redutor de engrenagem rosca sem fim	28
<b>CAPÍTULO III</b>	31
3. Tribologia	31
3.1 Termotribologia	34
3.1.1 Aplicações da termotribologia	36
3.2 Falhas em engrenagens de rosca sem fim	40
3.3 Lubrificação	42
<b>CAPÍTULO IV</b>	45
4. Radiação térmica	45
4.1 História da radiação	45
4.2 Radiação térmica e o espectro eletromagnético	47
4.3 Intensidade radiativa	52
4.3.1 Ângulo sólido	52
4.3.2 Intensidade radiativa espectral	53
4.3.3 Características de emissão	55
4.4 Radiação de corpo negro	56
4.5 Propriedades radiativas dos materiais	57
4.5.1 Emissividade	58
4.5.2 Absorção, reflexão e transmissão em superfícies reais	60

4.5.2.1 Absortividade	62
4.5.2.2 Refletividade	63
4.5.2.3 Transmissividade	63
4.6 Lei de Kirchhoff	64
<b>CAPÍTULO V</b>	<b>66</b>
5. Termografia	66
5.1 Cálculos para aplicação da termografia	70
5.2 Aplicações da termografia	75
5.2.1 Aplicações da termografia em engrenagens de rosca sem fim	76
<b>CAPÍTULO VI</b>	<b>84</b>
6. Metodologia	84
6.1 Procedimentos metodológicos	85
<b>CAPÍTULO VII</b>	<b>103</b>
7. Resultados e discussões	103
<b>CAPÍTULO VIII</b>	<b>132</b>
8. Conclusões	132
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>134</b>
<b>APÊNDICE I</b>	<b>140</b>
<b>APÊNDICE II</b>	<b>142</b>

## CAPÍTULO I

Neste capítulo, são apresentados os temas abordados nessa pesquisa e os objetivos atingidos. São mostradas, também, a justificativa para realização deste trabalho, suas delimitações e a estruturação do documento.

### 1. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios, a humanidade tenta facilitar o emprego de movimentos e deslocamentos no seu meio, a fim de reduzir o esforço necessário e ganhar o máximo de produtividade em tais ações, pois agricultura, transporte de materiais, fabricação de armas e equipamentos e construção de habitações eram tarefas árduas para serem desenvolvidas apenas com trabalho braçal. Para conseguir isso, foram criados diversos sistemas mecânicos que foram evoluindo e, depois, sendo substituídos e complementados por sistemas elétricos, hidráulicos e pneumáticos.

Lago (2007) afirma que, todo equipamento ou sistema mecânico está sujeito a processos de deterioração. Esta deterioração, com o tempo, induz o aparecimento de defeitos que podem atrapalhar ou interromper, de maneira definitiva, a produtividade do sistema mecânico. Uma quebra não prevista acarreta em uma parada brusca do sistema, o que se traduz em grandes prejuízos e a perda de tempo de produção. Para que a produtividade de uma indústria, constituída por uma diversidade de máquinas e equipamentos, tenha bons resultados, é necessário que todos eles sejam mantidos nas melhores condições de funcionamento. Assim, esses equipamentos deverão passar por reparos, inspeções programadas, rotinas preventivas programadas e adequadas, substituição de peças, mudanças de óleo, lubrificações, limpezas, pinturas e correções de defeitos ao longo de suas vidas úteis. A todos esses processos citados, que devem evitar a deterioração, chamamos de manutenção.

Viana (2002) explica que, manutenção, palavra derivada do latim *manus tenere*, que significa manter o que se tem, está presente na história humana desde o momento em que começamos a manusear instrumentos de produção. Viana (2002) também esclarece que a manutenção tem como função, manter em bom funcionamento todo e qualquer

equipamento, ferramenta ou dispositivo. E que durante a Segunda Guerra Mundial a manutenção tomou a importância e começou a ser mais abordada nas indústrias.

Dentre as circunstâncias que causam problemas para as ferramentas e sistemas mecânicos, temos o atrito. Atrito pode ser entendido na literatura como: qualquer tipo de movimento relativo entre corpos sólidos, líquidos ou gasosos, que se opõe a esse movimento. O atrito produz calor, o que, entre outros inconvenientes, representa uma perda direta de energia. No funcionamento de qualquer máquina, ocorre o fenômeno conhecido como atrito metálico, nas partes animadas de movimentos relativos. Portanto, é de grande valia reduzir a um mínimo o atrito metálico, objetivando: diminuir a perda de energia e o aquecimento pelo calor despreendido e diminuir o ruído e o desgaste das peças, eliminando os riscos de ruptura das mesmas. Isto é obtido com a interposição, entre as peças metálicas de uma substância fluída, o lubrificante, que fornecerá uma película adequada. Esta película exerce uma função denominada “lubrificação”. Daí, diz-se que, “lubrificar” é interpor uma película de um fluido adequado entre superfícies em movimento relativo, de modo que o mesmo se faça com um mínimo de aquecimento, ruído e desgaste.

Para Budynas e Nisbett (2016), o objetivo da lubrificação é reduzir o atrito, o desgaste e o aquecimento de partes de máquinas que se movem em relação umas às outras. Um lubrificante é qualquer substância que, quando inserida em superfícies que se movem, alcança seus propósitos. Em um mancal de deslizamento, um eixo ou munhão, roda ou oscila dentro da manga, ou bucha, e o movimento relativo é de deslizamento. Em um mancal antiatrito, o movimento relativo principal é o rolamento. Um seguidor pode deslizar ou rolar no came. Os dentes de engrenagem unem-se entre si por uma combinação de rolamento e deslizamento. Pistões deslizam dentro de seus cilindros. Todas essas aplicações requerem lubrificação para reduzir o atrito, o desgaste e o aquecimento.

Um dos principais sistemas que necessita de lubrificação e que será abordado neste trabalho é o redutor de velocidade. Pode-se afirmar que um redutor nada mais é que um equipamento mecânico que tem como função principal a redução da rotação de um acionador. De maneira simples, o redutor de velocidade é ativado quando se torna necessário adequar a rotação do acionador, por exemplo, em carros ou motores. Ou seja, quanto menor for a rotação do motor, comparada à rotação dos eixos, a velocidade será maior. Por outro lado, a operação inversa – com a rotação do motor maior do que a do eixo – causa um aumento na força. Considerando as leis da física, quando a rotação diminui, o torque aumenta.

Porém, apenas lubrificar não garante que o sistema mecânico atue com eficiência, sendo preciso monitorar o sistema, já que o sistema pode falhar posteriormente ao seu uso das mais variadas formas. Porém, o monitoramento do sistema, na maioria dos casos, não deve interromper o funcionamento da máquina, principalmente se levar em consideração a competitividade industrial. Para tais casos, foram desenvolvidas as técnicas de ensaio não destrutivo.

Pereda (2010), define os Ensaios Não Destrutivos (END) como técnicas utilizadas na inspeção de materiais sem danificá-los, sendo executadas nas etapas fabricação, construção, montagem e manutenção. Uma das técnicas de ensaios não destrutivos mais conhecidas e estudadas atualmente é a termografia. De acordo com Cortizo (2007), a termografia pode ser definida como a percepção e mensuração da temperatura superficial de um corpo, uma vez que todo corpo com temperatura acima do zero absoluto emite radiação térmica.

Para Ávalo (2014), na maioria dos processos e atividades industriais, o parâmetro temperatura é importante. A termografia mede temperaturas apresentando algumas vantagens em relação aos outros sistemas de medição de temperatura que necessitam de contato, são elas: fácil medição da temperatura de objetos móveis e de difícil acesso; técnica sem contato, não interferindo com o funcionamento e com o comportamento do elemento a medir; facilidade e rapidez na medição de grandes superfícies; medição da temperatura de vários objetos de forma simultânea; tempo rápido de resposta, permitindo seguir fenômenos transitórios de temperatura; precisão elevada, alta repetição e fiabilidade das medições.

A termografia é aplicável em qualquer situação onde a temperatura superficial forneça dados significativos de uma estrutura, processo ou sistema, como: sistemas elétricos; sistemas mecânicos; sistemas de fluídos e vapor; indústria automível; indústria de processo; perdas de energia (edifícios, fornos e caldeiras); eletrônica; aeronáutica; vigilância e segurança; aplicações médicas: medicina e medicina veterinária. É uma ferramenta com forte implementação em manutenção preditiva e manutenção preventiva.

A termografia é, hoje, uma das técnicas mais utilizadas para identificar problemas e potenciais falhas em equipamentos industriais, antes que estes possam provocar danos a pessoas, em equipamentos ou provocar perdas efetivas de produção.

Dadas estas informações, debater-se-á os objetivos do trabalho a seguir.

## **1.1 OBJETIVO GERAL**

Verificar a possibilidade de detecção de falhas decorrentes de lubrificação inadequada em redutor de velocidade do tipo rosca sem fim, a partir de condições controladas em laboratório aplicadas em bancada experimental, por meio da técnica de termografia infravermelha.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para que o objetivo geral seja alcançado, faz-se necessário desenvolver os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o funcionamento de um redutor de velocidade de bancada experimental, por meio de medição de temperatura por termografia, com volume de lubrificação de 150 ml com carga e sem carga extra de 4 kg;
- Analisar o funcionamento de um redutor de velocidade de bancada experimental, por meio de medição de temperatura por termografia, com volume de lubrificação de 100 ml com carga e sem carga extra de 4 kg;
- Analisar o funcionamento de um redutor de velocidade de bancada experimental, por meio de medição de temperatura por termografia, com volume de lubrificação de 50 ml com carga e sem carga extra de 4 kg;
- Obter equações de aquecimento para o redutor a partir dos termogramas para as condições de carga extra de 4 kg e 150 ml de lubrificação e sem carga extra e 150 ml de lubrificação.

## **1.3 JUSTIFICATIVA**

As perdas de produção referentes à quebra de equipamentos e ou processos deficientes estão entre os problemas mais agravantes e de maior atenção nos mais diversos ramos industriais. Diante disso, conhecer e fazer uso de recursos que podem detectar

falhas de maneira não invasiva é de extrema importância para garantir continuidade operacional e confiabilidade de plantas industriais.

Tendo em vista que a termografia se trata de uma técnica não invasiva na qual não há o contato direto do operador com o equipamento a ser analisado e se poder obter um diagnóstico de forma fácil e rápida, sem acarretar em parada obrigatória da máquina, a mesma pode se tornar uma técnica muito importante para a manutenção preditiva industrial, de modo que não haja a necessidade de parada do maquinário para as devidas análises.

Além disso, será dada continuidade aos trabalhos realizados por Silva Júnior (2017), Cabral (2017), Olinda (2018), Batista (2019) e Oliveira Neto (2019), ampliando os resultados obtidos com a técnica da Termografia Infravermelha.

#### **1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO**

Esta pesquisa foi realizada em ambiente controlado de laboratório, no que diz respeito à temperatura, umidade e velocidade do vento.

Foi utilizado um redutor de velocidade do tipo rosca sem fim, acoplado em uma bancada experimental no Laboratório de Ergonomia e Engenharia de Segurança do Trabalho (LEEST) da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Foram introduzidas falhas do tipo escassez e excesso de lubrificação no sistema de redução mecânica como um todo para fazer as medições e analisar a resposta dada pelo redutor de velocidade que está acoplado a outros componentes e tem como elemento gerador de movimento um motor elétrico trifásico.

O trabalho foi realizado com o funcionamento do sistema a baixa rotação, onde a mesma se manteve constante, sendo controlada através de um inversor de frequência.

Também, foi produzida uma cabine, que tem por objetivo evitar trocas térmicas desta com o meio, para isolar a bancada em estudo durante o processo.

#### **1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO**

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos, a saber:

No Capítulo I, dá-se a contextualização e apresentação do problema em estudo, seus objetivos geral e específicos, as justificativas, a delimitação do trabalho e estruturação do trabalho científico.

No Capítulo II, apresenta-se a revisão da literatura, na qual, por meio de obras especializadas, informa-se sobre os temas: transmissão de movimento, redutores de velocidade e suas classificações.

No Capítulo III, apresenta-se a revisão da literatura, na qual, por meio de obras especializadas, informa-se sobre os temas: tribologia, termotribologia, lubrificação e falhas em engrenagens.

No Capítulo IV, apresentam-se informações sobre a radiação térmica, seus princípios e características, assim como as propriedades radiativas dos materiais e a Lei de Kirchhoff.

No Capítulo V, apresentam-se informações sobre a técnica da Termografia, normas para aplicação e trabalhos com manuseio da Termografia, tendo em vista sua utilização para detecção de falhas em componentes mecânicos.

No Capítulo VI, trata-se da metodologia empregada neste trabalho para desenvolvimento das atividades desde a necessidade à conclusão obtida.

No Capítulo VII, são apresentados os resultados e as análises dos dados obtidos durante os experimentos.

Por fim, no Capítulo VIII, são apresentadas as principais conclusões obtidas a partir das discussões efetuadas no capítulo anterior.

Além disso, detalha-se as referências e apêndices utilizados no trabalho.

## CAPÍTULO II

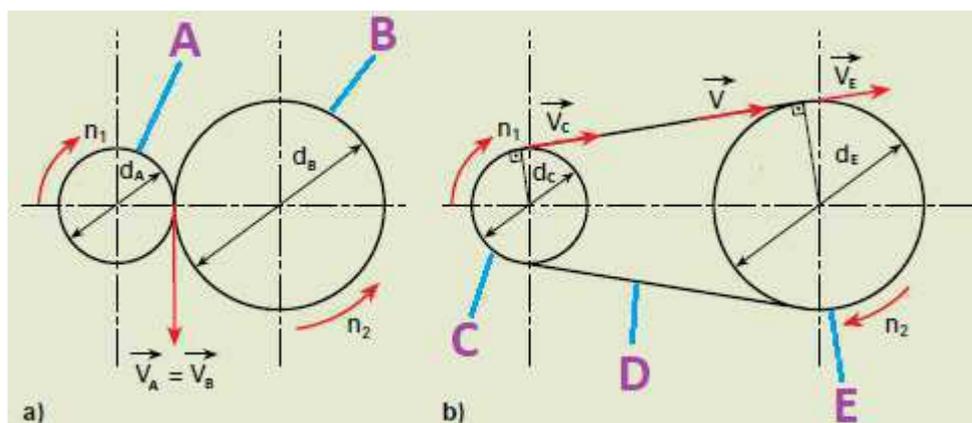
O objetivo deste capítulo é apresentar uma fundamentação teórica sobre redutores de velocidade, quanto ao seus principais tipos e características.

### 2. SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE MOVIMENTO

Segundo Alves e Taniguti (2011), elementos de transmissão são dispositivos mecânicos que possibilitam normalmente a transferência de torque ou carga a outro componente de um ou mais sistemas, aumentando ou diminuindo também a velocidade dos mesmos. Essa transmissão pode ocorrer por meio de rotação ou translação. Dentre os elementos de transmissão, temos: as engrenagens, correias, cabos de aço, acoplamentos etc.

Ainda, segundo Alves e Taniguti (2011), o movimento circular é, em geral, utilizado na transmissão de potência ou torque. Os tipos de transmissão de movimento circular mais comuns na mecânica ocorrem por meio de pares de engrenagens, polias, correias ou correntes. A seguir, na Figura 1, demonstra-se a representação em desenho técnico do funcionamento de alguns elementos de transmissão.

**Figura 1: Representação de elementos de transmissão em funcionamento**



**Fonte: Adaptado de Alves e Taniguti (2011)**

Na Figura 1, tem-se, em 1a, a representação de um par engrenado, ou seja, A e B são engrenagens que estão em contato direto, onde, uma engrenagem motora e que teve movimento induzido por outro componente ou sistema transmite esse movimento para a engrenagem que estava em repouso, ou seja, a engrenagem movida. Já em 1b, observa-se a representação de um sistema que utiliza polias ligadas por uma correia, onde C é a polia

menor, E é a polia maior e D, a correia. A transmissão no sistema 1b ocorre devido a correia D transmitir movimento de uma polia para outra. Nestes casos, define-se que, como estão movimentos circulares uniformes, possuem a mesma velocidade tangencial ou velocidade linear, ou seja, tomando-se como exemplo o sistema em a), tem-se:

$$V_A = V_B = V = \pi \cdot d \cdot n \Rightarrow \pi d_A n_A = \pi d_B n_B \Rightarrow \frac{n_A}{n_B} = \frac{d_B}{d_A} \quad (1)$$

Onde:  $V$  é a velocidade tangencial constante (m/s);

$\pi$  é a resultante da divisão do perímetro pelo diâmetro de um círculo;

$d$  é o diâmetro das circunferências (m);

$n$  é a frequência de rotação (rps).

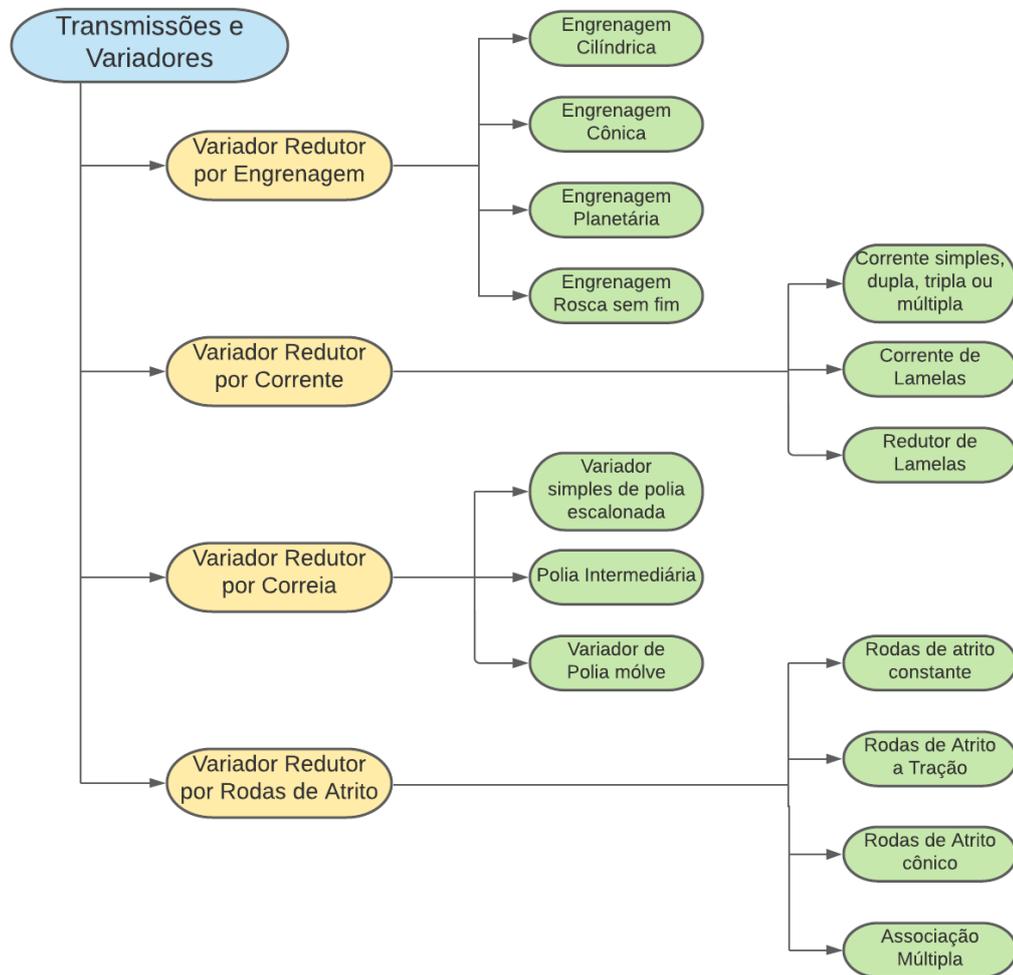
Na equação (1), demonstra-se a relação de velocidade de acordo com o conjunto de dois componentes girantes engrenados para transmitir movimento baseada nas frequências de rotações e diâmetro dos componentes. Com isso, obtém-se, pôr fim, a definição de relação de transmissão  $i_{A,B}$  que pode ser definida como a divisão da frequência de A ( $n_A$ ) pela frequência de B ( $n_B$ ) ou o diâmetro de B ( $d_B$ ) pela diâmetro de A ( $d_A$ ).

A relação de transmissão é importante para este trabalho e foi citada de forma preliminar, pois, o sistema que será estudado ao longo do trabalho é composto de vários elementos de transmissão girantes e tem como principal função, transmitir movimento com diminuição de velocidade e aumento de torque. O sistema abordado é conhecido como Redutor de Velocidade. No próximo tópico, detalhar-se-á o redutor e seus tipos.

## 2.1 REDUTORES DE VELOCIDADE

Segundo Niemann (1971) e Quartezi, Silva e Silva (2013), os redutores de velocidade são classificados na engenharia como elementos de máquinas de transmissão, pois têm como função transmitir potência, torque e rotação entre os elementos de uma máquina aumentando ou diminuindo a velocidade de rotação dos elementos. Eles são responsáveis por manter o bom funcionamento e rendimento das máquinas durante toda a operação industrial. Ainda, segundo Sousa (2011), existem vários tipos de redutores que são classificados em grupos como mostrados na Figura 2, a seguir:

**Figura 2: Classificação dos Redutores**



**Fonte: Adaptado de Sousa (2011)**

Como mostrado na Figura 2, existem vários tipos de redutores, com classificação de acordo com o tipo de componente utilizado para transmitir o movimento. A seguir, serão explicados os tipos de redutores com foco maior no redutor por engrenagem do tipo rosca sem fim.

De acordo com Niemann (1971), redutores por correia são os redutores que possuem, nos seus eixos de entrada e saída, uma correia acoplada, as correias são geralmente confeccionadas por borracha, couro, materiais fibrosos ou materiais sintéticos. Existem casos em que a correia com características mais elásticas “abraça” duas ou mais polias e, por meio do atrito, transmite o movimento por meio da força tangencial as demais polias de saída. Os redutores por corrente que são os redutores que possuem, entre os seus eixos de entrada e saída, rodas dentadas acopladas e, nestas rodas,

acopla-se uma corrente que é geralmente confeccionada com aços ao carbono ou aços especiais. Em alguns casos, chama-se a roda dentada motora de “coroa” e a roda dentada movida de “catraca”. A seguir, na Figura 3, tem-se exemplos do sistema redutor por corrente.

**Figura 3: Exemplo de redução por corrente**



Fonte: <http://buggies.builtforfun.co.uk/Howtoos/motors-page2.html>

Na Figura 3, mostra-se, de maneira simplificada, um motor acionador que está acoplado ao eixo com uma roda dentada de menor diâmetro e que possui uma corrente ligando a roda dentada menor com uma roda dentada de maior diâmetro, caracterizando um sistema de redução por corrente.

### **2.1.1 REDUTOR DE ENGENHAGEM ROSCA SEM FIM**

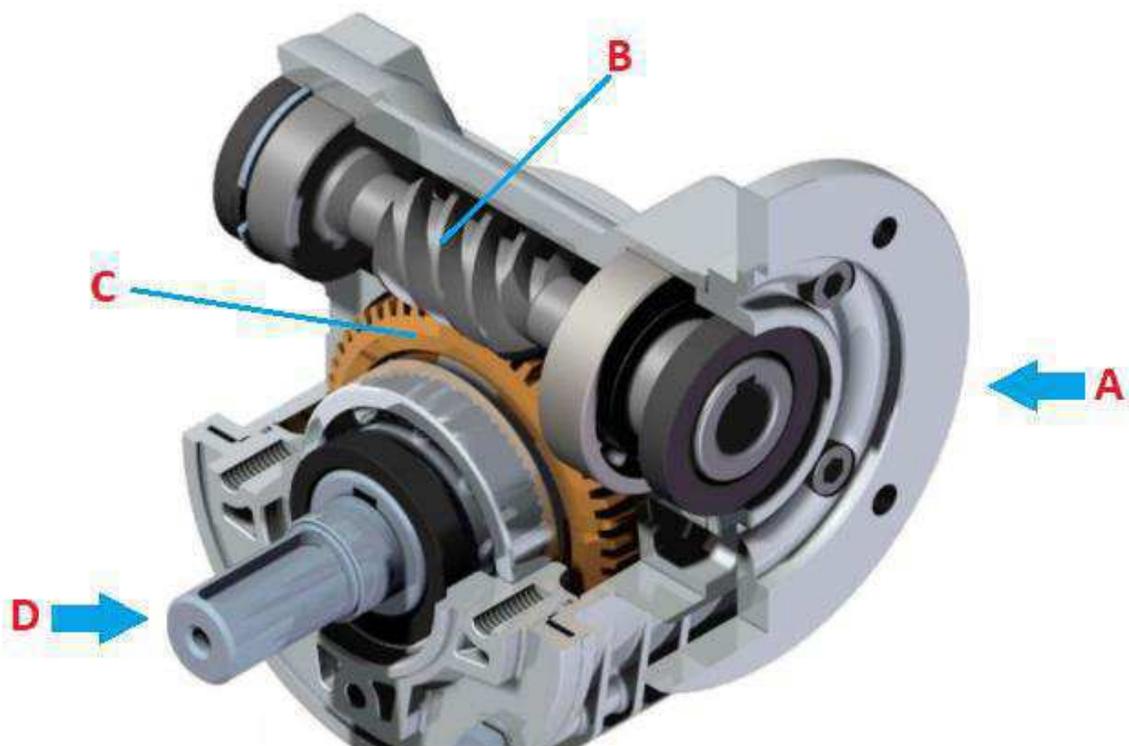
Os redutores por engrenagem são aqueles redutores que têm seu sistema composto por engrenagens, essas engrenagens dispensam componentes extras como correias e correntes, pois a transmissão se dá através do contato direto entre as engrenagens. Dentre os redutores por engrenagens, ainda se tem a subdivisão de acordo com cada tipo de engrenagem que compõe o redutor internamente. Os subgrupos de redutores de engrenagens são classificados de acordo com o tipo de engrenagem que os compõe, são eles: redutor de engrenagem cilíndrica, redutor de engrenagem cônica, redutor de

engrenagem planetária e redutor de engrenagem rosca sem fim. Neste trabalho, focar-se-á no tipo redutor de engrenagem rosca sem fim, que será o utilizado no estudo na bancada experimental criada no Laboratório de Ergonomia e Engenharia de Segurança do Trabalho (LEEST) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e utilizado para análise termográfica.

Para Budynas e Nisbett (2016), o redutor de rosca sem fim (ou redutor de coroa sem fim) é um sistema de redução que possui um eixo sem fim que atua junto de outra engrenagem diferente, como uma engrenagem de dentes retos ou helicoidais, fazendo-a girar pelo seu movimento. O nome da engrenagem sem fim se dá por causa do formato de sua rosca que, quando gira, parece nunca acabar. Na periferia da peça, há um eixo que a ajuda a fazer os movimentos rotacionais. Enquanto a maior parte das engrenagens utiliza velocidades mais altas, a taxa de transmissão da engrenagem sem fim é bem menor, mas varia de acordo com o número de dentes que a engrenagem possui e com o maquinário a qual ela se encaixa.

O movimento dentro da engrenagem sem fim do redutor é constante e consegue girar a engrenagem, porém a engrenagem não pode girar o eixo, pois, se houver a tentativa de inversão de acionamento, o eixo sem fim tende a ganhar um movimento axial de deslocamento, como se fosse empurrado para fora do redutor, o que prejudica todo o sistema. Esta é uma particularidade única deste tipo de redutor que acontece devido ao fato de a inclinação do eixo ser pequena demais para ser capaz de ser girada a partir da fricção iniciada pela engrenagem. O sistema, então, é bastante popular pela sua versatilidade e pode ser manuseado de forma prática, com alto nível de segurança e baixa vibração. A seguir, na Figura 4, demonstra-se um exemplar de redutor de rosca sem fim.

Figura 4: Redutor de engrenagem rosca sem fim



Fonte: Adaptado de <https://portallubes.com.br/2020/09/redutores-de-velocidade-do-tipo-parafuso-sem-fim-e-coroa/>

Como mostrado na Figura 4, o redutor de engrenagem rosca sem fim possui, em A, o eixo de entrada, o qual é acoplado ao acionador (não especificado na imagem) e dará início a transmissão de movimento no sistema. Após iniciado o movimento, tem-se, em B, a rosca sem fim girando em conjunto com o eixo A e transmitindo o movimento para a engrenagem C, que geralmente é uma coroa; enquanto que o eixo D, que é o eixo de saída do redutor, é girado por estar acoplado a C e, por sua vez, recebe o movimento transmitido da engrenagem.

## CAPÍTULO III

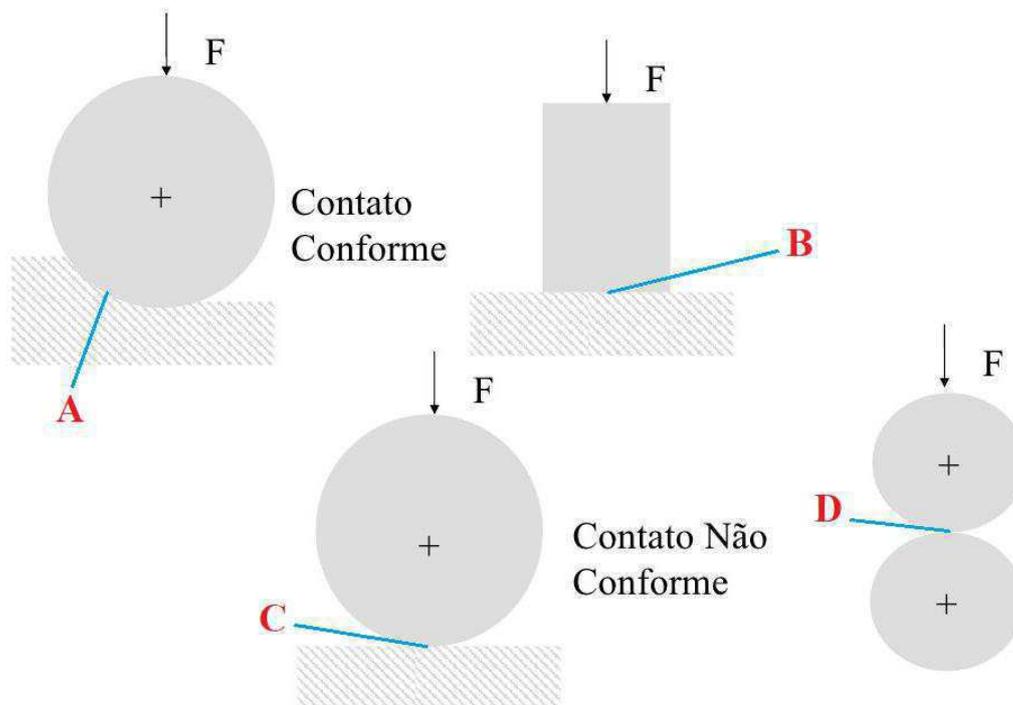
O objetivo deste capítulo é apresentar uma fundamentação teórica sobre lubrificação e as falhas derivadas da lubrificação inadequada para um entendimento sobre as possíveis perdas ou desgastes do sistema na bancada experimental. Posteriormente, levanta-se argumentações acerca dos métodos de lubrificação empregados em redutores de velocidade e técnicas de manutenção para máquinas e equipamentos.

### 3. TRIBOLOGIA

Para melhor compreensão do que acontece nos redutores, estuda-se a tribologia, a fim de entender o que essa ciência, que trata de analisar os contatos entre as superfícies e suas consequências. Segundo Jeyaprakash e Yang (2020), tribologia pode ser definida como a ciência de deslizar duas superfícies em movimento relativo com a investigação e aplicação do desgaste, fricção e lubrificação.

Para melhor compreensão da tribologia, estuda-se o significado de contato no ambiente da engenharia. De acordo com Johnson (1996), um contato é expresso como “conforme”, se as superfícies de dois corpos se encaixam ou muito se aproximam, promovendo, assim, uma área onde vários pontos se tocam. Por sua vez, o contato “não conforme”, ocorre quando corpos com diferentes perfis são colocados em união, fazendo com que o contato ocorra em um único ponto ou linha de contato. A Figura 5 exemplifica os tipos de contato para melhor compreensão.

Figura 5: Tipos de contato



Fonte: Adaptado de <https://pt.slideshare.net/Engenharia.de.Superficies/os-tipos-de-desgaste>

Na Figura 5, observa-se os tipos de contato em algumas imagens. Em A e B, o contato conforme, o qual é caracterizado pela conexão dos corpos em áreas. Em C e D, observa-se que a união entre os corpos ocorre em apenas um ponto ou linha, o que caracteriza um contato “não conforme”. Nos quatro exemplos, percebe-se que há uma força  $F$  sendo imposta para que ocorra a união. Barcelos (2019) afirma que no instante em que dois corpos “não conformes” são colocados em contato, inicialmente, este toque se dá apenas em um ponto ou linha de contato. Com a aplicação de uma força, ocorre uma deformação para que aconteça, de fato, o toque inicial em uma pequena área finita.

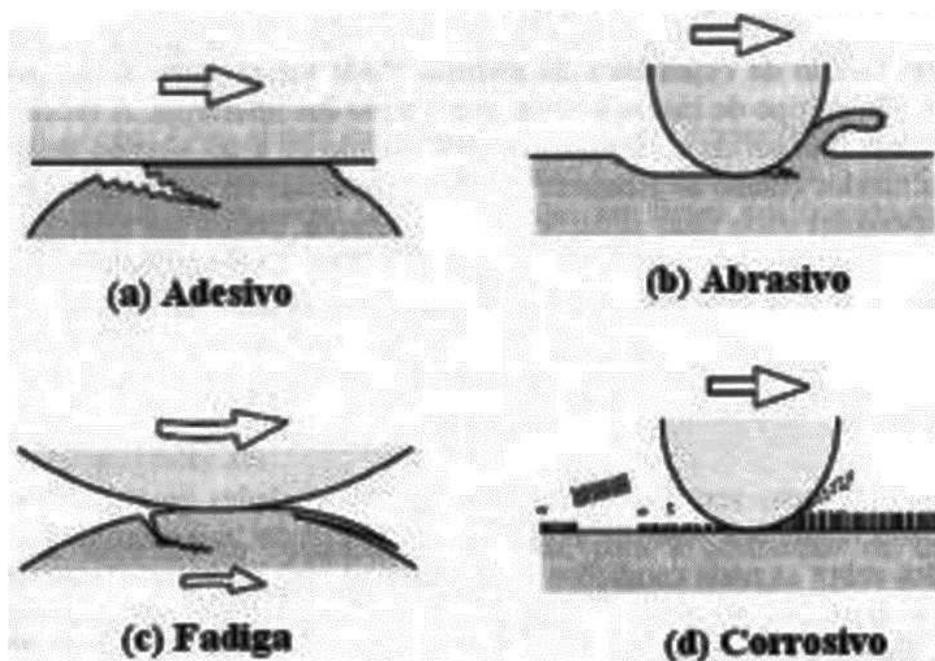
De acordo com Barber e Ciavarella (2000), os problemas de contato são fundamentais para a mecânica, porque o contato é o principal método de aplicação de cargas em um corpo deformável, pois, nestes corpos, a concentração de tensão resultante geralmente é o ponto mais crítico do corpo. Por fim, de acordo com Popov (2010), o contato normal também ocasionará um movimento relativo na direção tangencial entre as duas peças unidas, isso se deve por causa das diferentes contrações transversais dos corpos em contato, este contato ocasiona o atrito, que é um pré-requisito para os fenômenos tribológicos

Agora, com a definição de contato em mente, segue-se para a definição de tribologia. Segundo Jost (1990) e Radi *et al.* (2007), o termo tribologia, que vem do grego

Τριβή (Tribo - esfregar) e Λογος (Logos - estudo), e possui como definição: a ciência e tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionados. Para Mobley (2002), tribologia é o termo geral que se refere ao projeto e à dinâmica operacional da estrutura de suporte de lubrificação do maquinário. Como função, a tribologia pode ser utilizada como maneira de manutenção preditiva na indústria de acordo com as várias técnicas que possui, tais como: análise de óleo lubrificante, análise espectrográfica, ferrografia e análise de partículas de desgaste.

Segundo Sinatora (2005), os estudos iniciais de tribologia ocorreram por motivações econômicas, pois acreditava-se que com as estimativas de reduções de gastos apresentadas em relatórios mediante o uso do conhecimento existente sobre tribologia, seria possível reduzir, na época, as perdas industriais por desgaste em 20%. A seguir, mostra-se, na Figura 6, os principais tipos de desgaste, os quais são evitados ou minimizados pelo estudo da tribologia.

**Figura 6: Principais tipos de desgaste**



Fonte: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Representacao-dos-quatros-tipos-principais-de-desgaste\\_fig1\\_330916011](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Representacao-dos-quatros-tipos-principais-de-desgaste_fig1_330916011)

Na Figura 6, observa-se, em (a), o desgaste adesivo que ocorre quando a ligação adesiva entre as superfícies é suficientemente forte para resistir ao deslizamento. Por causa disso, o resultado dessa adesão é uma deformação plástica causada na região de contato, gerando uma trinca que pode se propagar, levando à geração de um terceiro corpo

e a uma transferência completa de material. Em (b), tem-se o desgaste abrasivo, que ocorre com a remoção de material da superfície. Esse desgaste acontece em função do formato e da dureza dos dois materiais em contato. Já em (c), denomina-se desgaste por fadiga, quando o desgaste é ocasionado devido ao alto número de repetições do movimento. Finalmente, em (d), o desgaste corrosivo ocorre em meios corrosivos, líquidos ou gasosos. Neste tipo de desgaste, são formados produtos de reação devido às interações químicas e eletroquímicas (RADI, 2007).

### 3.1 TERMOTRIBOLOGIA

Bogdanovich e Tkachuk (2009) afirmam que o homem lida com a liberação de calor durante o atrito desde os tempos antigos devido ao atrito. Atualmente, pelos avanços desse fenômeno de aquecimento por atrito em várias áreas da ciência, desenvolveu-se um campo independente de tribologia dedicado aos estudos de fenômenos térmicos em atrito a termotribologia. Este campo de estudo foi fundado pelo professor Harmen Blok (1910-2000). A criação desse campo foi estimulada pela necessidade de resolver inúmeras tarefas práticas, pois fenômenos térmicos e termomecânicos induzidos por atrito produzem efeitos significativos nas características de serviço das unidades de atrito, principalmente devido às variações induzidas pela temperatura na estrutura e composição química dos materiais de contato e nas propriedades dos filmes nas superfícies de atrito.

Para Bogdanovich e Tkachuk (2009), dentro da termotribologia é comum distinguir três temperaturas: a temperatura de aparente  $T_b$  (bulk temperature), que é a média da temperatura sobre um dos corpos de contato; a temperatura média de superfície  $T_s$  (average surface temperature), que é a média da temperatura sobre a fina camada dos corpos de contato; e a temperatura instantânea  $T_f$  (flash temperature), que é o incremento local de temperatura no contato devido as microasperidades nas superfícies. Entende-se que a temperatura máxima obtida num contato de fricção seja a soma dessas três temperaturas.

Para solução do problema de atrito térmico, são utilizados modelos de solução desenvolvidos por estudiosos que compreendem desde a solução da equação da condutividade térmica com as condições iniciais e de contorno, considerando o padrão real de contato, as condições de transferência de calor para o ambiente e as variações nas características mecânicas e térmicas dos materiais. A utilização destas hipóteses em

modelos de aquecimento por atrito simplificam a solução do problema do calor, porém, impõem certas limitações a aplicação das soluções. Dentre os modelos, destacam-se:

Bowden e Ridler (1936), foram os primeiros a desenvolver um modelo científico para cálculos de termotribologia. Para resolver o problema de encontrar a temperatura de contato pino-disco, inicialmente, Bowden e Ridler (1936) mediram, de forma experimental, a temperatura da superfície de atrito com um termopar natural e, então, Bowden formulou e resolveu o problema do calor mencionado anteriormente. A dependência linear da temperatura na velocidade de deslizamento e na carga concordou bem com os resultados experimentais tanto no caso de atrito seco quanto lubrificado. Ao contrário, a dependência da temperatura versus condutividade térmica não concordou com os dados experimentais. As causas disso são: a suposição de Bowden sobre a suavidade ideal das superfícies combinadas e a fonte de calor ter sido considerada estacionária, quando na realidade ela se move.

Blok (1937), considerou fontes de diferentes formatos (banda, circular, retangular) sem levar em conta sua natureza física. Ele resolveu o problema do calor unidimensional com um fluxo de calor direcionado normalmente ao plano da fonte. As soluções para fontes estacionárias e móveis foram estendidas ao caso em que um único ponto de contato de fricção isolado termicamente era uma fonte de calor. Como em todos os modelos de aquecimento por atrito, o modelo de Blok idealiza a geração e distribuição do calor de atrito por se basear em pressupostos distantes da realidade com características como: estado prematuro das superfícies de atrito, ausência de efeito mútuo das fontes de calor, ausência de troca de calor convectiva da superfície da fonte ao ambiente. Portanto, este modelo fornece valores baixos para as temperaturas instantâneas. Blok postulou a lei da distribuição da intensidade de uma fonte de calor em sua superfície. Entretanto, esta lei é governada pela forma dos pontos de contato reais e sua distribuição sobre a área de contato nominal. Em resumo, na maioria dos casos, a teoria de Blok fornece uma avaliação satisfatória da temperatura instantânea e foi utilizada por muitos tribologistas ao longo do tempo.

Jaeger (1942), em essência, o trabalho de Jaeger não contradiz a teoria de Blok e pode ser considerado como uma evolução do seu trabalho. Jaeger considerou as superfícies de contato planas; no entanto, ele formulou o problema do calor como estacionário. Ele encontrou a distribuição de temperatura para fontes retangulares e de banda com intensidade constante, estacionárias ou se movendo na superfície do meio-espaço a uma velocidade constante. Ademais, o modelo proposto por Jaeger resolveu o

problema do calor plano para uma fonte móvel com a intensidade distribuída por diferentes leis e descobriu que as temperaturas máxima e média da superfície de contato pouco dependiam da lei da distribuição da fonte de calor. Uma das principais diferenças do modelo Jaeger para o de Blok é que Jaeger resolveu o problema da distribuição da temperatura sobre a espessura da camada superficial de um dos corpos de contato.

Já, Archard (1952), desenvolveu um modelo de temperatura instantâneo que se distingue pela simplicidade matemática. Ele resolveu o problema do atrito térmico na mesma premissa de Blok e Jaeger, utilizando-se de uma única aspereza na superfície de um corpo deslizando sobre a superfície do outro. Para Archard, o ponto de contato é uma fonte de calor circular, os fluxos de calor para ambos os corpos são unidimensionais, o fator de partição de calor é encontrado a partir da igualdade das temperaturas médias das superfícies de contato dentro do ponto de contato e a transferência de calor por convecção para o ambiente está ausente. Archard também levou em consideração a dependência da área de contato com a carga normal e propôs uma teoria aproximada da temperatura de atrito em contatos elásticos e plásticos.

Os modelos de Blok e Jaeger foram baseados no uso do método da fonte de calor que também foi usado por outros pesquisadores. Graças aos estudos destes métodos, desenvolveram-se máquinas capazes de medir as temperaturas em sistemas mecânicos de modo a considerar a temperatura da superfície do sistema como uma temperatura mais exata e próxima da real.

### **3.1.1 APLICAÇÕES DA TERMOTRIBOLOGIA**

Na conferência Holm de 1989, Burton e Burton (1989) analisaram um conjunto de dados sobre a variação do coeficiente de desgaste, coeficiente de atrito e temperatura de contato de blocos de carbono executados contra a superfície de um disco de metal em velocidades de deslizamento de até 145 m/s. Já que estudos teóricos anteriores de contato termoelástico sugeriram que a instabilidade termoelástica levaria à formação de um monte térmico nas superfícies nominalmente planas, e que a carga de contato seria suportada em um remendo com pequenas dimensões em relação à área de contato nominal. A análise nesse estudo foi baseada na suposição de que o bloco e o disco estão em contato uniforme sobre a área do remendo. Ainda assim, a teoria do contato da aspereza exigiria que o remendo não fosse uma área única de contato uniforme, mas um aglomerado de microcontatos de asperezas individuais.

Burton e Burton (1991) foram atraídos para a presente investigação por esforços para compreender o papel dos microcontatos distribuídos em placas de contato confinadas. Tal remendo poderia ser formado pelo contato de esferas, estendendo-se desde o contato elástico até o caso de indentação de plástico. Sob a condição de alta tensão de contato em relação à dureza, a proporção da área de contato nominal para a área de contato real não é um número grande. Se o número de microcontatos for pelo menos uma ordem de magnitude maior que a razão das áreas de contato do bloco e do disco, então a junção se comporta como se estivesse em contato total, para condução estática de calor ou eletricidade. Contudo, cálculos simples mostram que a transferência de calor não é muito diferente da medida para um contato uniforme. Isso fornece algum suporte para a aceitação das previsões aproximadas de modelos de superfície lisa do contato termoelástico de escovas. Esses efeitos mostram por que é difícil conceber experimentos para distinguir placas de contato elásticas (com muitos microcontatos) de microcontatos individuais.

Bauer et. al. (2018) afirma que com o aumento da capacidade de potência mecânica das caixas de engrenagens, o limite de potência térmica tende a se tornar o fator limitante. A fim de obter um sistema equilibrado, o redutor precisa de resfriamento extra. Porém, devido à complexidade do equilíbrio de calor de uma caixa de engrenagens, os métodos de cálculo analítico são muito imprecisos para avaliações precisas de mudanças no sistema de resfriamento num sistema de redução como apresentado na Figura 7.

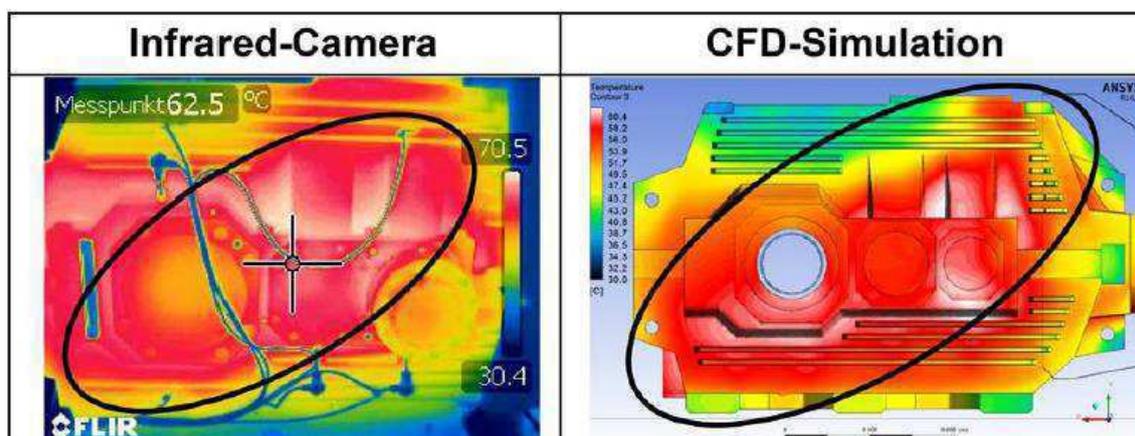
**Figura 7: Sistema de redução de Bauer et. al. (2018)**



**Fonte: Bauer et. al. (2018)**

A Figura 7 mostra o sistema de redução utilizado no trabalho de Bauer et. al. (2018). Percebe-se que unidos a carcaça do redutor tem-se um ventilador radial e tampa guia de ar curta. Neste sistema, a conversão do torque e da velocidade de revolução em unidades de engrenagens cônicas e de dentes retos causa perdas de energia nas peças móveis da máquina e gera calor em todo o sistema. No interior da caixa de engrenagens o calor é transportado pelo óleo, que é distribuído pelas partes giratórias - como as engrenagens. Sem resfriamento externo, a maior parte do calor é dissipada por convecção e radiação como mostra a Figura 8, a seguir:

**Figura 8: Detecção de calor no redutor mecânico do trabalho de Bauer et. al. (2018) por meio de câmera infravermelha e simulação CFD**



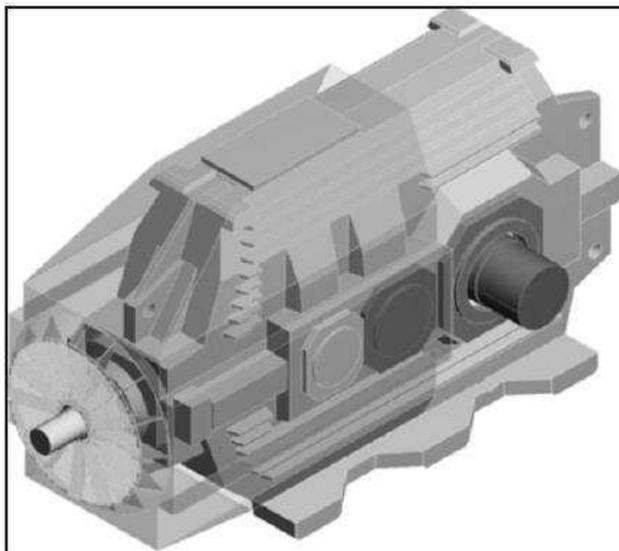
Fonte: Bauer et. al. (2018)

A Figura 8 mostra toda a distribuição de calor dentro do redutor por dois métodos: câmera infravermelha e simulação dinâmica de fluidos computacional (CFD). Para resolver tal problema de aquecimento faz-se necessário o equilíbrio de energia que só pode ser mantido se a temperatura aumentar ou se a capacidade de resfriamento da superfície for usada de forma mais eficiente. O aumento da temperatura do óleo é limitado devido aos efeitos de redução da vida útil do lubrificante e às restrições nos limites de temperatura da superfície.

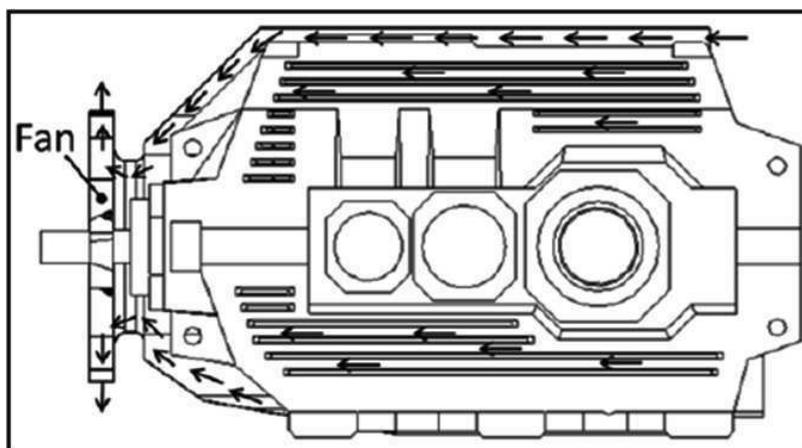
Para os cálculos, Bauer et. al. (2018) mede as perdas dos elementos da máquina. Em seguida, considera a saída de calor, separada em duas etapas: a primeira como a transferência de calor do óleo para o material da caixa, subdividida em áreas com e sem contato direto com o óleo; e a segunda como o cálculo o fluxo de calor da carcaça para o ambiente, considerando áreas com e sem aletas, perdas por radiação, e também condução

de calor demais partes do sistema. Porém, considerando a falta de homogeneidade na superfície da carcaça, essa abordagem é insuficiente para prever o comportamento térmico de um projeto de caixa de engrenagens alterado. Com isso, duas propostas foram admitidas pelos pesquisadores: A primeira abordagem foi estender a tampa do ventilador radial, Figura 9a, com a intenção é alcançar velocidades de ar mais altas diretamente na superfície da caixa de câmbio - em uma área maximizada; a segunda foi uma direção reversa do fluxo de ar, pois o fluxo de ar produzido de um ventilador sempre tem um componente de velocidade de rotação. Essa rotação de ar resulta em regiões com acúmulo de ar devido às barreiras ao redor da caixa de engrenagens na direção circular como mostrado na Figura 9b.

**Figura 9: Conceito de nova caixa de engrenagem com tampa longa mais o ventilador radial (a) e conceito com direção reversa do fluxo de ar (b)**



(a)



(b)

Fonte: Bauer et. al. (2018)

Com os conceitos utilizados da Figura 9, sendo: 9a, a tampa longa mais o ventilador radial e 9b, a direção reversa do fluxo de ar uma comparação das temperaturas de óleo previstas e medidas mostra duas coisas. Os resultados da simulação são confiáveis e os conceitos de resfriamento elaborados são muito eficazes. As caixas de engrenagens com os novos conceitos de refrigeração mantêm temperaturas significativamente mais baixas nas mesmas condições de operação. O conceito de resfriamento 1, com tampa mais longa e ventilador radial otimizado, reduz a temperatura em 3,5 K. O conceito 2, com tampa longa e bem ajustada e ventilador radial de sucção de ar, reduz a temperatura em 7 K em comparação com a solução padrão. Com esses resultados, o grupo de pesquisadores chegou à conclusão de que as novas opções de resfriamento resultam em capacidades térmicas consideravelmente maiores. O conceito 1 é até 20% melhor do que a solução padrão e o conceito 2 até 33%.

### **3.2 FALHAS EM ENGRENAGENS DE ROSCA SEM FIM**

Para Koda (2009), a obtenção de jogos de engrenagens com um peso-mínimo adequado está intimamente ligada ao projetista ter conhecimento dos detalhes complicados de muitas modalidades de falha das engrenagens. A Associação Americana dos Fabricantes de Engrenagens (AGMA) classifica 20 modalidades da falha da engrenagem em diversas categorias. Basicamente, as falhas podem ser classificadas como: sobrecarga, fadiga por flexão na raiz do dente, fadiga de contato (ou hertziana), desgaste (abrasão, adesão, cavitação, etc.) e engripamento (ou *scuffing*). O Quadro 1 apresenta as possibilidades de falha das engrenagens segundo a AGMA.

**Quadro 1: Possibilidades de falhas em engrenagens**

Falhas relatadas sem lubrificação	Falhas relatadas com Lubrificação	Desgaste	Engripamento
Sobrecarregamento	Fadiga de contato	Adesão: - suave; - moderada; - severa.	Esfolamento
Deformação plástica por: - escoamento a frio; - escoamento quente; - Sulcos; - Dobramento; - Interferência ponta a raiz; - Fadiga de Dobramento; - Fadiga de Baixo ciclo (<1000 ciclos para falha); - Fadiga de alto ciclo (>1000 ciclos para falha); - Identação: --Identação por rolamento; --Identação por esmagamento; --Identação por martelamento; --Similar a Identação Brinell.	Pitting: - inicial; - superficial; - destrutivo.	Abrasão: - arranhões; - raspagem; - sulcos; - incisões; - arrancamento.	Atrito: - inicial; - moderado; - destrutivo.
Fratura frágil	Lascamento (Spalling)	Cavitação	Soldagem
Fratura dúctil	Micropitting	Danos por descargas elétricas	Adesão
		Polimento (brunimento)	

Fonte: Adpatado de Koda (2009)

A Tabela 1 apresenta os tipos de falhas que ocorrem nas engrenagens. Como pode ser percebido, a lubrificação tem grande importância na conservação das engrenagens, dada a quantidade de problemas advindos dela. O engripamento, por sua vez, também pode ser denominado como Scuffing ou Scoring.

Para Sharif *et al.* (2001), as engrenagens coroa sem fim fornecem uma solução simples e econômica em aplicações de transmissão de energia onde uma alta taxa de redução é necessária em inversores de velocidade relativamente baixa. Para um efeito de comparação, se, em um mecanismo, for utilizada a engrenagem de eixo paralelo, haverá a necessidade de dois ou três estágios para atingir as mesmas reduções para um mesmo caso onde for utilizada uma engrenagem coroa sem fim, além de um consequente aumento na complexidade e no número de peças. As principais desvantagens da engrenagem coroa

sem fim são problemas de lubrificação e desgaste devido ao grau relativamente alto de deslizamento nos contatos dos dentes. A fim de evitar escoriações (soldagem e rasgamento das superfícies dos dentes causados pela quebra da lubrificação), até agora, foi necessário usar materiais metalurgicamente diferentes para o sem-fim e a roda dentada. Tradicionalmente, para amenizar os problemas, uma rosca sem fim de aço e uma roda de bronze fosforoso são usadas. O ferro fundido também foi testado como material para rodas, mas geralmente é menos resistente à abrasão do que o bronze. Porém, a utilização de um material relativamente macio para uma das superfícies limita as tensões de contato permitidas e, portanto, a capacidade de carga.

Para Ghodake, Mishra e Deokar (2016), as engrenagens coroa sem fim são geralmente feitas com uma roda de latão e uma sem fim de aço, porque a roda de latão é relativamente mais fácil de substituir do que a sem fim. Durante o contato das duas superfícies, a rosca sem fim está protegida do desgaste, pois a roda é mais macia, de modo que o desgaste ocorre na roda. Com isso, os relatórios de análise de óleo nos redutores sempre mostram um nível mais alto de cobre e um nível baixo de ferro como resultado da roda sacrificial. Ainda, segundo Ghodake, Mishra e Deokar (2016), as falhas de engrenagem do tipo rosca sem fim mais comuns que ocorrem em um redutor são desgaste, corrosão, ranhura, fratura e deformação plástica. Para detectar tais falhas nas caixas de engrenagens rosca sem-fim, várias técnicas são aplicadas, como análise de óleo, análise de vibração, análise de emissão acústica e análise de temperatura. A análise de óleo, por sua vez, é a técnica mais utilizada em comparação com outras técnicas de monitoramento de condição para detectar falhas nos redutores. Porém, essa técnica apresenta difícil implementação devido ao movimento deslizante contínuo que ocorre na caixa de engrenagem e no sem fim, provocando um amortecimento do sinal de vibração que é medido de acordo com os impactos na frequência das engrenagens.

### **3.3 LUBRIFICAÇÃO**

Para Norton (2013), com a exceção de engrenagens de plástico ligeiramente carregadas, todos os engrenamentos precisam ser lubrificados para evitar falhas prematuras como: desgaste por adesão, desgaste por abrasão, erosão, desgaste por corrosão e fadiga superficial. Os lubrificantes removem calor e separam as superfícies metálicas para reduzir o atrito e desgaste. O controle da temperatura na interface de engrenamento é importante para reduzir escórias, riscos e aspereza dos dentes. Por isso,

é preciso fornecer lubrificante em quantidade suficiente para que haja a transferência do calor do atrito para o ambiente sem permitir temperaturas locais excessivas no engrenamento. Chernets (2019) ainda afirma que, nas engrenagens sem-fim, na lubrificação com óleo, ocorre o atrito deslizante entre as bobinas sem-fim e os dentes da roda sem-fim na transferência de torque. Por sua vez, Nezamabadi, Soury e Houshmand (2014) explicam que, o lubrificante desempenha um papel importante nas engrenagens sem-fim e pode ser considerado um critério muito relevante para o desempenho dessas engrenagens, pois, quando a temperatura do lubrificante aumenta, é gerada uma dificuldade para utilização de engrenagens sem fim, logo, o lubrificante ajuda também no controle da temperatura. Nas primeiras horas de utilização dos redutores de rosca sem-fim, é comum que a temperatura do lubrificante aumente e, depois de algumas horas de trabalho, a temperatura estabilize em todo o sistema.

Jeyaprakash e Yang (2020) afirmam que existem regimes de lubrificação de filme fluido, utilizados principalmente para sistemas mecânicos como engrenagens e mancais, são eles: Lubrificação hidrostática, lubrificação hidrodinâmica, lubrificação de contorno e lubrificação mista. Norton (2013) esclarece que lubrificantes de engrenagem são tipicamente óleos, baseados no petróleo, de viscosidade diferente dependendo da lubrificação. Óleos leves (10-30W) são usados, às vezes, para engrenagens com velocidades altas o suficiente e/ou cargas baixas o suficiente para promover a lubrificação elasto-hidrodinâmica (um tipo de lubrificação hidrodinâmica), que é a lubrificação que ocorre quando, a baixas velocidades, as juntas de um engrenamento estarão em lubrificação de contorno e podem resultar em altas taxas de desgaste com possíveis riscos e marcas. A carga nessas juntas cria uma área de contato de deflexões elásticas das superfícies. Essa pequena área de contato pode providenciar tamanho suficiente de superfície plana para permitir a formação de um filme hidrodinâmico completo se a velocidade relativa de escorregamento for suficientemente alta. Essa condição é denominada lubrificação elasto-hidrodinâmica (EHD), porque ela depende das deflexões elásticas das superfícies e pelo fato de que pressões elevadas (100 a 500 kpsi) dentro da zona de contato aumentam muito a viscosidade do fluido.

Norton (2013) alega que o usual e recomendado é prover um banho de óleo alojando as engrenagens em uma caixa com óleo bem fechada, chamada de redutor. Esse redutor é parcialmente enchido com um lubrificante apropriado de forma que pelo menos um membro de cada par engrenado esteja parcialmente submerso, ou seja, o redutor nunca será completamente preenchido com óleo até o limite do seu volume. Com a lubrificação

adequada, a rotação da engrenagem carregará o lubrificante para os pares engrenados e manterá as engrenagens não submersas lubrificadas. Por fim, Norton (2013) esclarece que, em engrenamentos de cargas elevadas e/ou baixa velocidade, ou ainda, aqueles com grandes objetos deslizando, lubrificantes de pressão extrema são mais indicados. São normalmente óleos de engrenagem 80-90W com aditivos do tipo ácidos graxos que proporcionam alguma proteção contra escoreamento sob condições limites de lubrificação.

Desai, Bhat e Sonawane (2019), em seu estudo de modelamento tribológico de engrenagens de coroa sem fim, concluem que devido à geometria complexa do acionamento da engrenagem coroa sem fim, é difícil lubrificar o acionamento. O principal problema por eles detectado é a redução na eficiência devido ao atrito de deslizamento, sendo este o principal problema em engrenagens sem-fim. Então, para que haja um melhor aproveitamento dessas engrenagens em sistemas mecânicos, a utilização de técnicas de manutenção para prevenir problemas é obrigatória.

## CAPÍTULO IV

O objetivo deste capítulo é apresentar os conceitos básicos relativos à radiação térmica, abordando temas como o espectro eletromagnético, conceito de corpo negro, fatores que influenciam a irradiação térmica e as propriedades radiativas dos materiais.

### 4. RADIAÇÃO TÉRMICA

Segundo Modest (2003), os termos transferência de calor por radiação e radiação térmica são comumente usados para descrever a ciência da transferência de calor causada por ondas eletromagnéticas. Alguns exemplos de radiação térmica do dia-a-dia incluem o efeito de aquecimento da luz do sol em um dia claro, o fato de que - quando alguém está diante de uma fogueira - o lado do corpo voltado para o fogo fica muito mais quente do que o fundo, e assim por diante. Exemplos mais sutis de radiação térmica são que o céu claro é azul, o pôr do sol é vermelho e que, durante uma noite clara de inverno, sentimo-nos mais confortáveis em um quarto cujas cortinas estão fechadas do que em um quarto (aquecido à mesma temperatura) com cortinas abertas.

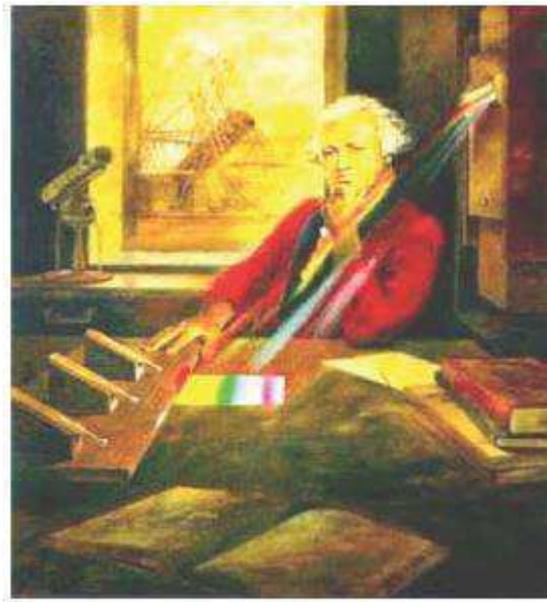
Todos os corpos (geleiras, nuvens, pessoas, objetos, planetas, fornos, estrelas) emitem radiação. Quanto maior a sua temperatura, mais emitem, daí que essa radiação é chamada radiação térmica. A radiação térmica tem um papel importante no balanço de energia dos corpos na natureza. Um caso mais simples para entendimento é utilizar o planeta Terra como exemplo. Se caso o planeta estivesse isolado no espaço, emitiria radiação, perdendo energia térmica e resfriando-se, porém, como estamos perto do Sol, o que a Terra perde para o espaço é compensado pela radiação solar que é absorvida de nossa estrela, e assim a Terra possui uma temperatura mais ou menos constante (existem ações dos humanos que desregulam essa constância). Fato é, se não existisse emissão de radiação térmica, a Terra acumularia mais e mais radiação solar, aquecendo-se até temperaturas altíssimas e impossibilitando a vida no planeta.

#### 4.1 HISTÓRIA DA RADIAÇÃO

Segundo Caramalho (2012), a descoberta da radiação infravermelha aconteceu por volta do ano de 1800, pelo astrônomo inglês William Herschel. Ao testar várias amostras

de vidro de cor que permitiam reduções semelhantes do brilho, ficou intrigado quando percebeu que algumas das amostras possibilitavam a passagem de um pouco de calor do sol, enquanto outras deixavam passar tanto calor que, após alguns segundos de observação, os olhos corriam o risco de sofrerem lesões. E após vários experimentos com materiais cerâmicos e termômetros, Herschel conseguiu descobrir o espectro termométrico, que seria chamado posteriormente, espectro infravermelho.

**Figura 10: William Herschel e o espectro infravermelho**



Sir William Herschel (1738 - 1832)

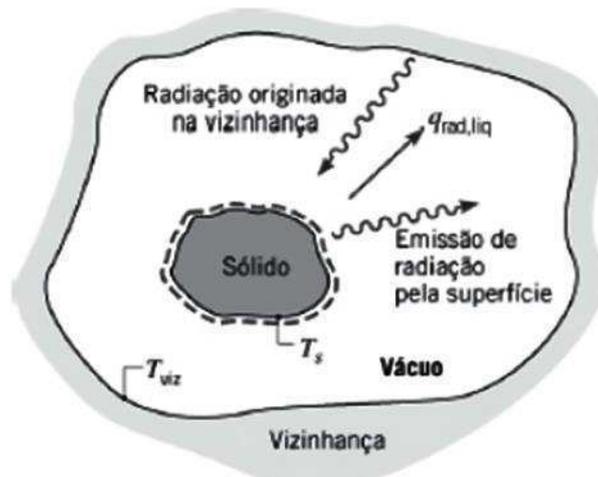
Fonte: CARAMALHO (2012)

A Figura 10 mostra o astrônomo William Herschel com seu experimento de vidros e termômetros para obter o espectro infravermelho que demonstra a variação de cores de acordo com a variação de temperatura. Posterior a descoberta do espectro, conseguiu-se a primeira imagem térmica, que só se tornou possível em 1840, após o resultado do trabalho efetuado por causa do astrônomo John Herschel, filho do descobridor dos infravermelhos. Após isso, apenas no período entre as duas grandes guerras mundiais ocorreu-se o desenvolvimento de detectores por infravermelhos que determinaram a evolução deste tema, são eles: o conversor de imagens e o detector de fótons. Durante esse período, as regras do sigilo militar proibiam terminantemente a divulgação do estado de desenvolvimento da tecnologia da formação de imagens de infravermelhos. Somente após a segunda guerra mundial, no período de 1960 a 1970, a termografia seria amplamente estudada, difundida e utilizada para outros fins, como medicinal e industrial.

## 4.2 RADIAÇÃO TÉRMICA E O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Segundo Bergman *et al.* (2014), considerando-se um sólido em um ambiente com vácuo que se encontra inicialmente a uma temperatura mais elevada  $T_s$  do que a de sua vizinhança  $T_{viz}$ , a presença do vácuo ao seu redor impede o sólido de perder energia em sua superfície por condução ou convecção. Contudo, por intuição, deduz-se que o sólido irá esfriar e finalmente atingir o equilíbrio térmico com sua vizinhança. Esse resfriamento está associado a uma redução na energia interna armazenada pelo sólido e é uma consequência direta da emissão de radiação térmica pela sua superfície. Por sua vez, a superfície irá interceptar e absorver radiação originada na vizinhança. Entretanto, se  $T_s > T_{viz}$  a taxa de transferência de calor por radiação líquida está saindo da superfície e a superfície resfriará até que  $T_s$  atinja  $T_{viz}$ , como mostrado na Figura 11.

**Figura 11: Corpo emitindo radiação no vácuo**



Fonte: Bergman *et al.* (2014)

Na Figura 11, mostra-se um corpo emitindo radiação para a vizinhança, ilustrando o que acontece quando se tem um corpo com temperatura acima do meio onde ele se encontra. Para Bergman *et al.* (2014), a radiação térmica é associada à taxa na qual a energia é emitida pela matéria como um resultado de sua temperatura não nula. O mecanismo da emissão está relacionado à energia liberada como um resultado de oscilações ou transições elétrons que constituem a matéria. Tais oscilações são, por sua vez, sustentadas pela energia interna e, conseqüentemente, pela temperatura da matéria.

Assim, associamos a emissão de radiação térmica às condições excitadas termicamente no interior da matéria.

Segundo Bergman *et al.* (2014) e Modest (2003), sabe-se que a radiação surge da emissão pela matéria e que seu transporte não exige a presença de qualquer matéria no meio. Mas, qual é a natureza desse transporte? Para a física quântica, a radiação dá-se como a propagação de um conjunto de partículas conhecidas por fótons ou quanta. Fótons podem ser descritos como um “pacote” de energia que se desloca a uma velocidade sempre igual à da luz, contendo exatamente a quantidade de energia perdida pelo elétron no salto entre uma órbita e outra ao redor do próton. Alternativamente, para a teoria clássica, a radiação pode ser vista como a propagação de ondas eletromagnéticas, que são oscilações formadas por campos elétricos e magnéticos variáveis, que se propagam tanto no vácuo quanto em meios materiais. Elas são ondas tridimensionais e transversais que viajam na velocidade da luz, transportando exclusivamente energia.

Para Modest (2003), todas as ondas eletromagnéticas ou fótons são conhecidos por se propagarem por qualquer meio em altas velocidades. Por fazer parte do espectro, a luz obteve destaque quando calculada sua velocidade, velocidade essa utilizada na atualidade para cálculos de várias outras grandezas físicas e conhecida como velocidade da luz ( $c$ ). Como exemplifica-se na equação 2, a velocidade da luz depende do meio pelo qual ela viaja e pode estar relacionada à velocidade da luz no vácuo,  $c_0$ .

$$c = \frac{c_0}{n} \quad (2)$$

Onde:  $c$  é velocidade da luz no meio (m/s);

$c_0$  é a velocidade da luz no vácuo (m/s);

$n$  é índice de refração no meio.

Ainda, segundo Modest (2003), na Equação 2, por definição, o índice de refração do vácuo é  $n = 1$ . Para a maioria dos gases, o índice de refração é muito próximo de 1 (um), por exemplo, o ar à temperatura ambiente tem  $n = 1,00029$  no espectro visível. Portanto, a luz se propaga através dos gases quase tão rápido quanto através do vácuo. Já as ondas eletromagnéticas viajam consideravelmente mais devagar através dos dielétricos (não condutores elétricos que possuem  $1,4 < n < 4$ ), e dificilmente penetram nos condutores elétricos (metais).

Com estas explicações em mente, desejou-se atribuir à radiação as propriedades-padrão da onda, a frequência  $\nu$  e de comprimento de onda  $\lambda$ . Para a radiação se propagando em um determinado meio, as duas propriedades estão relacionadas por:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (3)$$

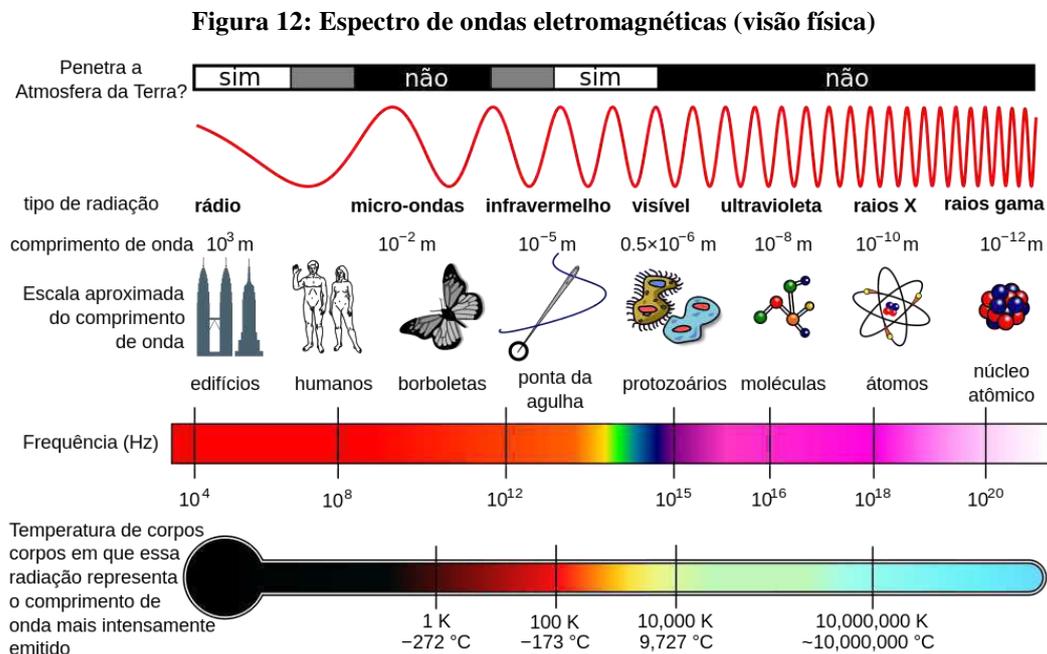
Onde:  $\lambda$  é o comprimento de onda ( $\mu\text{m}$  ou  $\text{nm}$ );

$c$  é a velocidade da luz no meio (m/s);

$\nu$  é frequência (hertz).

Percebe-se, na Equação 3, que, sendo  $c$  a velocidade da luz no meio, para a propagação no vácuo,  $c_v = 2,998 \times 10^8$  m/s. A unidade de comprimento de onda é comumente o micrometro ( $\mu\text{m}$ ), com  $1 \mu\text{m} = 10^{-6}$  m.

Com o cálculo da frequência foi possível obter o espectro de ondas eletromagnéticas, como pode ser visto na Figura 12 a seguir.



Fonte: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_eletromagn%C3%A9tico](https://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro_eletromagn%C3%A9tico)

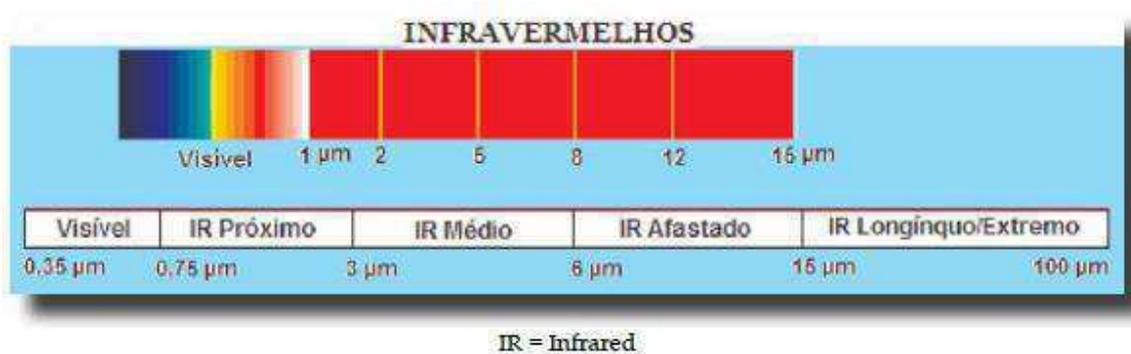
Na Figura 12, tem-se, por sua vez, a visão do espectro de ondas eletromagnético comparando as temperaturas dos corpos e a possibilidade de penetração na atmosfera de

cada tipo de onda apresentando, também, desde as ondas de rádio até os raios gama. Um detalhe importante dentro do espectro é a faixa conhecida pelo homem, mostrando desde os raios gama (com frequência  $\lambda$  igual  $10^{-4}$  nm,  $10^{-7}$   $\mu$ m ou  $10^{-13}$  m) até as ondas de rádio (com frequência  $\lambda$  igual  $10^{11}$  nm,  $10^8$   $\mu$ m ou 100 m). Percebe-se, também, o intervalo de luz visível no espectro eletromagnético (com frequência  $\lambda$  variando entre 400 nm a 700 nm).

Por fim, segundo Çengel e Ghajar (2015), a radiação térmica encontra-se na faixa de comprimento de onda entre 0,1 a 100  $\mu$ m do espectro eletromagnético. Sua extensão abrange parte da radiação ultravioleta (0,1 a 0,4  $\mu$ m), a radiação visível (0,4 a 0,76  $\mu$ m) e a radiação infravermelha (0,76 a 100  $\mu$ m), na Tabela 1, a faixa de frequência de radiação térmica está destacada pela cor amarelo claro.

Segundo Caramalho (2012), a faixa (ou banda) do Infravermelho é subdividida como mostra-se na Figura 13.

**Figura 13: Subdivisão da banda do espectro infravermelho**



**Fonte: Caramalho (2012)**

Na Figura 13, são mostradas as 4 subdivisões da banda do espectro infravermelho, são elas, de acordo com o comprimento de onda: a próxima de infravermelhos (0,75 – 3  $\mu$ m); a média de infravermelhos (3 – 6  $\mu$ m); a afastada de infravermelhos (6 – 15  $\mu$ m), e a extrema de infravermelhos (15 – 100  $\mu$ m).

De acordo com Howell, Siegel e Menguç (2010), a energia radiativa é transmitida entre elementos distantes sem requerer um meio entre eles. Considerando-se, por exemplo, um espaço cúbico aquecido com superfície A e volume V, preenchido com material radiante, como gás ou nuvem de partículas com altas temperaturas como mostrado na Figura 14. Se a taxa de energia  $q_A dA$  for definida como a taxa de energia radiante que chega a  $dA_1$  a partir de um elemento de superfície  $d_A$  e a taxa de energia

$q_v dV$  for definida como a taxa que chega na área  $dA_1$  a partir de um elemento de volume  $dV$ , então, a taxa de energia radiativa de todo o recinto chegando a  $dA_1$  é dada pela Equação 4.

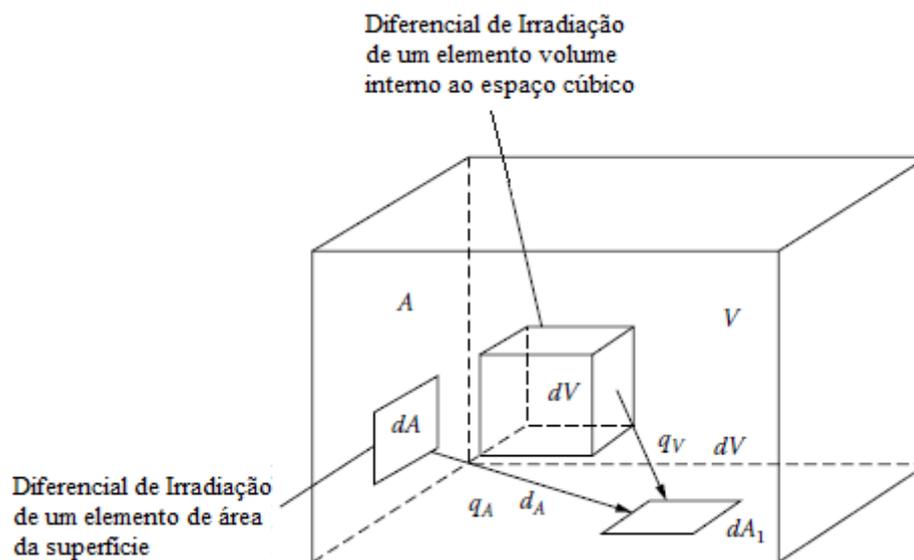
$$Q_{rad}(dA_1) = \int_A q_A dA + \int_V q_V dV \quad (4)$$

Onde:  $Q_{rad}(dA_1)$  é a taxa de energia radiativa total do recinto chegando à área  $dA_1$  (em Joules);

$q_A dA$  é a taxa de energia radiativa da superfície de um elemento de área do espaço cúbico (em Joules);

$q_V dV$  é a taxa de energia radiativa do elemento volumétrico dentro do espaço cúbico (em Joules).

**Figura 14: Transmissão de radiação para área de um espaço preenchido com material radiante**



**Fonte: Adaptado de Howell, Siegel e Mengüç (2010)**

Ainda, de acordo com Howell, Siegel e Mengüç (2010), como mostrado na Figura 14, a transferência radiativa precisa ser determinada de acordo com todos os efeitos direcionais e elementos radiantes. Além disso, os cálculos de transferência de radiação devem ser realizados em cada comprimento de onda ou frequência. A energia radiativa total é determinada pela integração de todos os comprimentos de onda ou frequências do espectro eletromagnético. Por fim, para se adequar a medição correta da radiação, faz-se necessário estudar adequadamente as propriedades radiativas, incluindo os coeficientes

de absorção, emissão e dispersão. Para isto, serão comentados mais alguns tópicos sobre radiação, como: intensidade de radiação, radiação de corpo negro e propriedades radiativas dos materiais.

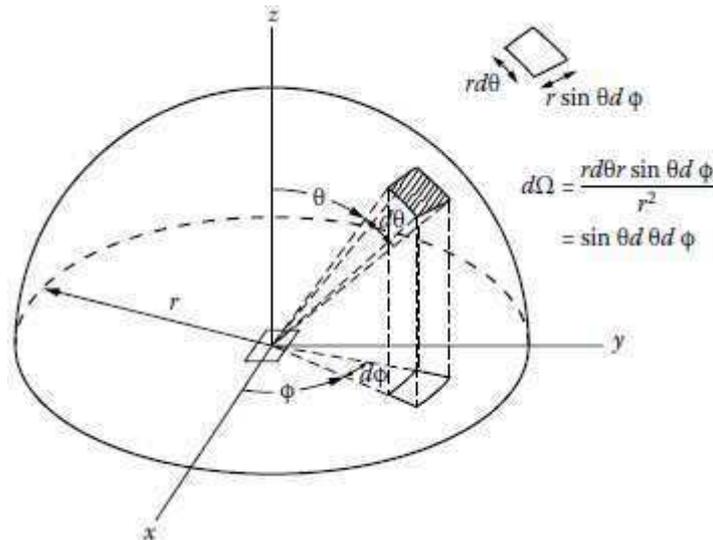
### **4.3 INTENSIDADE RADIATIVA**

Segundo Howell, Siegel e Menguç (2010), antes de abordar os fundamentos da transferência de calor por radiação, faz-se necessário fornecer uma visão geral de um problema físico onde a troca de radiação é importante, já que o principal objetivo nos cálculos de transferência radiativa é determinar a quantidade de energia que sai de uma superfície e atinge outra após viajar através de um meio intermediário, composto de partículas, gases ou algum outro material. Se o meio altera a quantidade de radiação que atinge a segunda superfície, é chamado de "participante". Para se analisar qualquer um desses problemas, precisa-se, primeiro, equipar-se com as definições adequadas de grandezas radiativas. Para o propósito deste trabalho, introduzir-se-á conceito de ângulo sólido e a intensidade da radiação. Depois disso, considerar-se-á a característica da emissão, radiação de um corpo negro, emissividade e propriedades radiativas dos materiais.

#### **4.3.1 ÂNGULO SÓLIDO**

De acordo com Howell, Siegel e Menguç (2010), o que acontece com a propagação da energia radiativa de uma superfície para a outra é importante para determinar a troca de energia entre corpos. Para o desenvolvimento desse fenômeno, considera-se, para um pequeno volume de controle qualquer no espaço, a propagação da energia radiativa espectral ao longo de uma direção  $S$ , incidente no volume de controle  $dV$ , em  $S(x, y, z)$ . Essa energia está confinada em uma pequena região cônica, que é chamada de ângulo sólido,  $\Omega$ . A seguir, na Figura 15, para a definição do ângulo sólido, considera-se uma área de superfície elementar  $dA$  cercada por um hemisfério (ou semiesfera) de raio  $R$ .

Figura 15: Ilustração do ângulo sólido num volume semiesférico



Fonte: Howell, Siegel e Mengüç (2010)

De acordo com a Figura 15, e, segundo Howell, Siegel e Mengüç (2010), para um hemisfério de raio unitário  $R$  igual a 1, o ângulo sólido em torno do centro da base é igual à área no hemisfério unitário. A direção, por sua vez, é medida pelos ângulos zênite e azimutal  $\theta$  e  $\phi$ , onde  $\theta$  é medido da direção normal para  $dA$ .

O ângulo sólido possui semelhança com o ângulo plano por definição, mas é dado no espaço tridimensional. Enquanto que o ângulo plano é a relação entre o comprimento da corda e a distância do vértice à base, o ângulo sólido é a relação entre a área da base e o quadrado do comprimento da corda.

#### 4.3.2 INTENSIDADE RADIATIVA ESPECTRAL

Para Howell, Siegel e Mengüç (2010), a intensidade radiativa espectral  $I_\lambda$  é definida como a energia radiativa espectral  $dQ_\lambda$  em função da área projetada  $dA$ , do ângulo sólido  $d\Omega$ , do intervalo de tempo de unidade  $dt$  e de um pequeno intervalo de comprimento de onda  $d\lambda$ . A Equação 5 faz a demonstração desta definição.

$$I_\lambda(S, \Omega, t) = \lim \frac{dQ_\lambda(S, \Omega, t)}{dA d\lambda d\Omega dt} \quad (5)$$

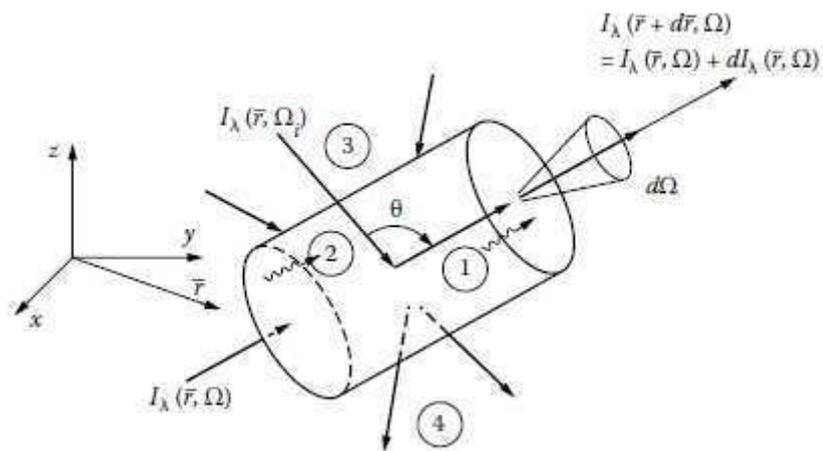
Onde:  $I_\lambda(S, \Omega, t)$  é intensidade radiativa espectral (medida em  $W/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$ );

$dQ_\lambda(S, \Omega, t) / dAd\lambda d\Omega dt$  é o diferencial de quantidade de energia mensurável em função da área finita, ângulo sólido e quantidade de tempo (medido em Joules);

Na Equação 5, utiliza-se limite para indicar que a intensidade é definida quando todos os intervalos de parâmetros independentes são muito pequenos. Já a energia radiativa  $Q(S, \Omega, t)$ , que é geralmente a quantidade mensurável, requer uma integração da intensidade radiativa sobre um elemento de área finita, ângulo sólido, intervalo de comprimento de onda e duração do tempo, produzindo unidades de energia em Joule (J).

A intensidade espectral é uma função de sete parâmetros independentes, incluindo três coordenadas espaciais ( $x, y, z$ ) ao longo de  $S$  e duas coordenadas angulares ( $\theta, \varphi$ ) para direção  $\Omega$ , tempo ( $t$ ) e sempre especificado com um comprimento de onda  $\lambda$  por unidade de intervalo de onda em torno de  $\lambda$ , como mostrado na Figura 16.

**Figura 16: Intensidade radiativa se propagando através de um elemento de volume  $V$  qualquer**



Fonte: Howell, Siegel e Mengüç (2010)

Na Figura 16, tem-se o exemplo, num volume  $V$  qualquer, da energia radiativa se propagando e perdendo parte de sua força à medida que se propaga por um caminho  $dS$  - devido ao espalhamento e absorção de energia como em 3 e 4, mas, por outro lado, ganha força adicional por causa do espalhamento interno da radiação e da emissão na direção  $\Omega$ , como mostrado em 1 e 2. Ao longo desta direção e caminho, podemos calcular a mudança na energia radiativa, que fornece uma equação de conservação da energia radiativa dentro de um pequeno cone direcional ao longo de uma determinada direção, para um pequeno intervalo de comprimento de onda em torno de um comprimento de

onda fixo, e dentro de uma duração de tempo infinitesimal em um determinado momento. Essa formulação é conhecida na física como Equação de Transferência Radiativa (RTE).

### 4.3.3 CARACTERÍSTICAS DE EMISSÃO

Todo material em temperatura finita emite energia radiativa. Em princípio, a emissão é direcional por natureza e é uma função das propriedades locais do material e da temperatura:

$$E_{\lambda} = f(T, \lambda, \theta, \varphi) \quad (6)$$

Onde:  $E_{\lambda}$  é Poder Emissivo Espectral ( $W/m^2\mu m$ )

$T$  é a temperatura (Kelvin)

$\lambda$  é o comprimento de onda ( $\mu m$ )

$\theta, \varphi$  são coordenadas angulares (radianos)

Na equação 6, tem-se a definição de Poder Emissivo Espectral  $E_{\lambda}$ . Segundo Bergman *et al.* (2014), o poder emissivo hemisférico espectral  $E_{\lambda}$  é a taxa na qual a radiação de comprimento de onda  $\lambda$  é emitida em todas as direções a partir de uma superfície por unidade de intervalo de comprimentos de onda  $d\lambda$  no entorno de  $\lambda$  e por unidade de área superficial. Assim sendo, entende-se que  $E_{\lambda}$  é o fluxo térmico espectral associado à emissão para um hemisfério hipotético acima de  $dA$ .

Para Howell, Siegel e Menguç (2010), um corpo ideal emitiria a quantidade máxima de energia uniformemente em todas as direções e em cada intervalo de comprimento de onda. Deste ideal, surgiu o conceito de corpo negro. Um corpo negro ideal tem por característica absorver toda a radiação incidente sobre ele. Por ser um absorvedor perfeito, o mesmo serve como padrão para comparação com os materiais reais.

Ainda, segundo Howell, Siegel e Menguç (2010), a interação da energia radiativa na superfície de um corpo depende não apenas das propriedades da própria superfície, mas também do material que compõe as camadas inferiores à superfície. Considerando que um feixe de luz incida sobre um corpo homogêneo, parte da radiação é refletida e o restante penetra no corpo. A radiação pode tanto ser absorvida quanto espalhada no meio durante o percurso. Se o material não for espesso o suficiente para absorver toda a

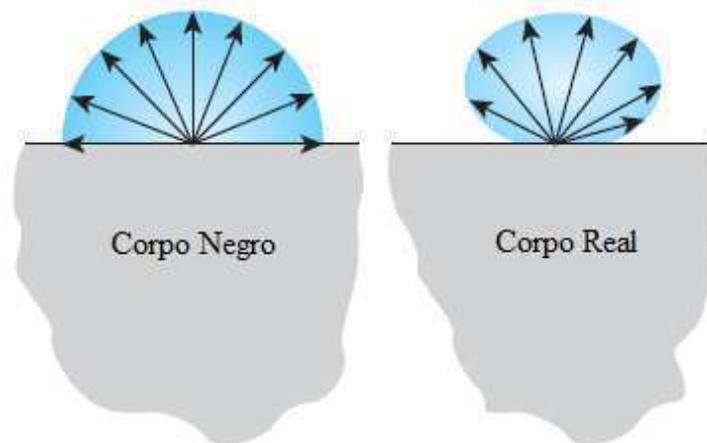
radiação, uma fração significativa dela transpassa o corpo. Se, por outro lado, o material é um forte absorvedor, nenhuma radiação pode penetrar no meio. Neste caso, a radiação não transmitida ou refletida na superfície é convertida em energia interna do objeto. Essa conversão varia em função da distância da superfície, dependendo das propriedades espectrais do meio. Com esse mecanismo de absorção, o corpo tem sua temperatura aumentada. Tem-se como definido corpo opaco todo o corpo no qual a radiação incidente em sua superfície for absorvida internamente. Materiais podem ser opacos se possuírem grande espessura ou semitransparentes se a espessura for relativamente pequena.

#### **4.4 RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO**

Para Çengel e Ghajar (2015), um corpo, em uma temperatura acima de zero absoluto ( $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$  ou  $0\text{ K}$ ), emite radiação em todas as direções em uma ampla faixa de comprimentos de onda. A quantidade de energia de radiação emitida de uma superfície em um determinado comprimento de onda depende da condição e temperatura da superfície e do material do corpo. Corpos diferentes podem emitir diferentes quantidades de radiação por unidade de área de superfície, mesmo quando possuem temperatura igual. Portanto, faz-se necessário medir a quantidade máxima de radiação que pode ser emitida por uma superfície de um corpo a uma certa temperatura. Pois essa quantidade máxima ilustra a definição de um corpo idealizado para servir de padrão e possuir propriedades radiativas para comparação com corpos reais. Este corpo ideal é denominado corpo negro.

De acordo com Bergman *et al.* (2014), corpo negro é um corpo que absorve toda a radiação incidente, independente do seu comprimento de onda e de sua direção. Em quaisquer valores de temperatura e comprimento de onda, nenhuma superfície pode emitir mais energia do que um corpo negro. Embora a radiação emitida por um corpo negro seja uma função do comprimento de onda e da temperatura, ela é independente da direção. Isto é, o corpo negro é um emissor difuso. A Figura 17 ilustra a comparação entre um corpo negro e um corpo real.

**Figura 17: Diferença entre corpo negro e corpo real**



**Fonte: Çengel e Ghajar (2015)**

A Figura 17 apresenta a diferença de emissão entre um corpo negro e um corpo real, sendo a emissão de radiação de um corpo negro uniforme em todas as direções, enquanto um corpo real não possui tal característica. Como a emissão de um corpo negro é difusa, a intensidade espectral  $I_\lambda$  da radiação que deixa a cavidade independe da direção.

#### **4.5 PROPRIEDADES RADIATIVAS DOS MATERIAIS**

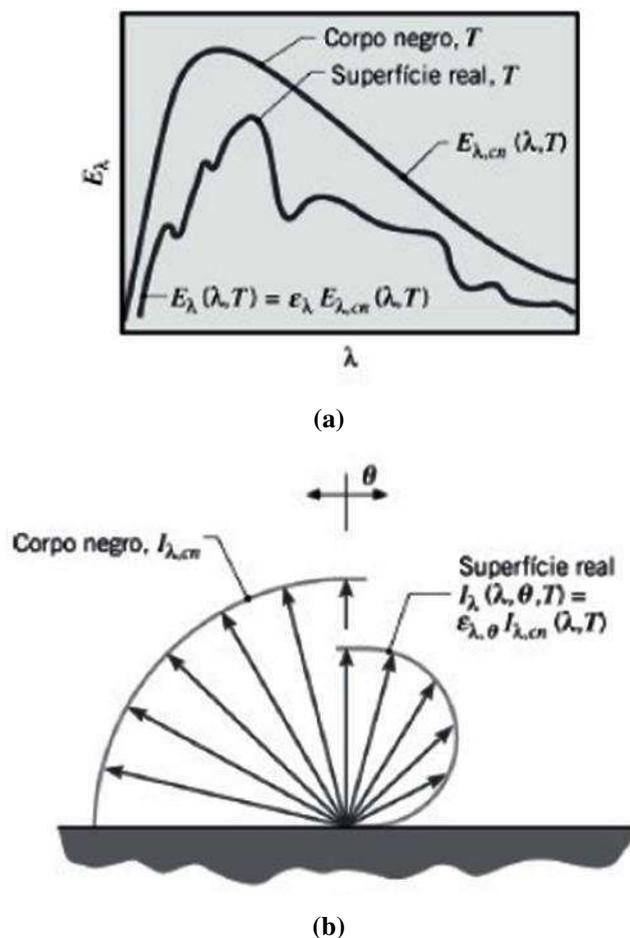
Os materiais mais comuns encontrados no dia-a-dia, como metais, madeira e tijolos são opacos, ou seja, absorvem a maior parte da radiação térmica incidente neles, logo, nas suas primeiras camadas superficiais estes materiais possuem propriedades únicas e são estudados como um grupo de propriedades radiativas de superfícies para materiais opacos. Já materiais como vidro e água, permitem que a radiação visível penetre em profundidades consideráveis antes que ocorra qualquer absorção significativa, sendo conhecidos como semitransparentes. A radiação para estes materiais não pode ser considerada um fenômeno de superfície, já que todo o volume do material interage com a radiação. Porém, até materiais como o vidro e a água são opacos frente à radiação infravermelha. Portanto, os materiais podem apresentar comportamentos diferentes em comprimentos de onda diferentes, e a dependência do comprimento de onda é uma característica importante no estudo das quatro propriedades radiativas que serão estudadas nos próximos tópicos, são elas: emissividade, absorvidade, refletividade e transmissividade de materiais. Lembrando-se sempre que, o corpo negro serve como

referência para estudo das características de emissão e absorção de superfícies reais, pois é absorvedor perfeito.

#### 4.5.1 EMISSIVIDADE

De acordo com Çengel e Ghajar (2015), a emissividade de uma superfície representa a razão entre a radiação emitida pela superfície em uma determinada temperatura e a radiação emitida por um corpo negro na mesma temperatura. A emissividade de uma superfície é denotada por  $\varepsilon$ , e varia entre zero e um,  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ . Emissividade é uma medida de quão próxima uma superfície real se aproxima de um corpo negro, que tem como característica  $\varepsilon = 1$ . A Figura 18 mostra a diferença de emissividade entre um corpo negro e um corpo real.

**Figura 18:** Comparação entre emissividades (a) e direção das intensidades radiativas (b)



Fonte: Bergman *et al.* (2014)

A Figura 18a demonstra que, em geral, a radiação espectral emitida por uma superfície real difere da distribuição de um corpo negro. Na Figura 18b, é apresentada a distribuição direcional da intensidade radiativa, enquanto no corpo negro ela é uniforme, no corpo real ela não possui uniformidade.

Para Çengel e Ghajar (2015), a emissividade de uma superfície real não é uma constante. Ao invés disso, ela varia com a temperatura da superfície, com o comprimento de onda e com a direção da radiação emitida. Portanto, diferentes emissividades podem ser definidas para uma superfície, dependendo dos efeitos considerados. A emissividade mais elementar de uma superfície em uma determinada temperatura é a emissividade direcional espectral ( $\epsilon_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\varphi,T)$ ), definida por ser a razão entre a intensidade da radiação emitida pela superfície em um comprimento de onda especificado em uma direção especificada e a intensidade da radiação emitida por um corpo negro com a mesma temperatura no mesmo comprimento de onda, onde nota-se a presença dos índices subscritos  $\lambda$  e  $\theta$ , os quais indicam a importância dos comprimento de onda e direção específicos para a emissividade. Já, a emissividade direcional total ( $\epsilon_{\theta}(\theta,\varphi,T)$ ) apresenta uma emissividade direcional, porém, por causa da ausência do fator  $\lambda$ , essa emissividade representa uma média espectral de  $\epsilon_{\lambda,\theta}$  e, por isso, é chamada de emissividade direcional total.

Bergman *et al.* (2014) afirma ainda que, na maioria dos cálculos em engenharia, deseja-se trabalhar com propriedades físicas superficiais que representam médias direcionais, ou seja, sem a presença da influência dos fatores  $\theta$  e  $\varphi$ . Para tal necessidade, foi definida a equação para emissividade hemisférica espectral ( $\epsilon_{\lambda}(\lambda,T)$ ), este cálculo de emissividade se diferencia da emissividade direcional espectral pelo fato de não possuir influência dos ângulos  $\theta$  e  $\phi$  (ângulos zênite e azimutal), já que, leva-se em consideração o poder emissivo para todo o hemisfério, definindo-se uma média para todas as direções.

Por fim, para abordar toda emissividade de um corpo com a média para todas as direções e para a média para todos os comprimentos de onda, criou-se a emissividade hemisférica total, como visto na Equação 11:

$$\epsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (7)$$

Onde:  $\epsilon(T)$  é emissividade hemisférica total;

$E(T)$  é poder emissivo do corpo real médio para todos comprimentos de onda;

$E_b(T)$  é o poder emissivo do corpo negro médio para todos comprimentos de onda.

Como observado na Equação 11, a diferença entre a emissividade hemisférica total e emissividade hemisférica espectral se faz na ausência do fator  $\lambda$  na equação, pois, para calcular a emissividade hemisférica total, considera-se os poderes emissivos médios em todos os comprimentos de onda.

Por fim, sobre emissividade, pode-se afirmar que: a emissividade de superfícies metálicas é geralmente pequena, atingindo valores de 0,02 para superfícies polidas de materiais preciosos, como ouro e prata. A presença de camadas de óxidos, por exemplo, pode alterar (aumentando) a emissividade de superfícies metálicas. Já, a emissividade de materiais não condutores é comparativamente maior, sendo, em geral, superior a 0,6. A emissividade de condutores aumenta com o aumento da temperatura; entretanto, dependendo do material, a emissividade de não condutores pode aumentar ou diminuir com o aumento da temperatura. Deve-se entender ainda que, a emissividade depende fortemente da natureza da superfície, que pode ser influenciada pelo método de fabricação, seu ciclo térmico e reações químicas com o ambiente.

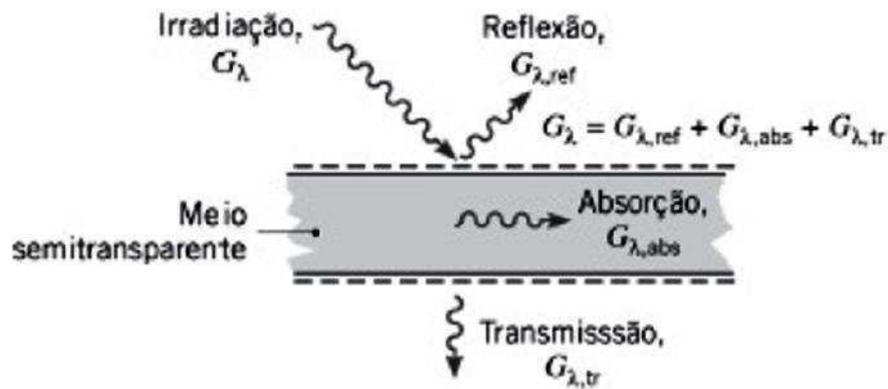
#### **4.5.2 ABSORÇÃO, REFLEXÃO E TRANSMISSÃO EM SUPERFÍCIES REAIS**

Para determinar o fluxo térmico radiante líquido saindo de uma superfície, é também necessário considerar propriedades que determinam a absorção, a reflexão e a transmissão da irradiação.

Segundo Bergman *et al.* (2014), irradiação espectral  $G_\lambda$  ( $W/(m^2 \cdot \mu m)$ ) como a taxa na qual radiação de comprimento de onda  $\lambda$  incide sobre uma superfície por unidade de área da superfície e por unidade de intervalo de comprimento de onda  $d\lambda$  no entorno de  $\lambda$ . Ela pode incidir a partir de todas as direções possíveis e ter sua origem em diversas fontes diferentes.

Na maioria dos materiais, para uma componente espectral da irradiação, porções dessa radiação podem ser refletidas, absorvidas e transmitidas, como mostrado na Figura 19.

Figura 19: Absorção, reflexão e transmissão espectrais associados a um meio semitransparente



Fonte: Bergman *et al.* (2014)

A Figura 19 mostra com exatidão como a irradiação se comporta em um meio semi transparente, sendo parte absorvida, parte refletida e parte transmitida. A partir desta afirmação, tem-se, na Equação 8, a definição matemática de irradiação espectral.

$$G_{\lambda} = G_{\lambda,abs} + G_{\lambda,ref} + G_{\lambda,tr} \quad (8)$$

Onde:  $G_{\lambda}$  é a irradiação espectral (medida em  $(W/(m^2 \cdot \mu m))$ );

$G_{\lambda,abs}$  é a porção de irradiação espectral absorvida pelo corpo (medida em  $(W/(m^2 \cdot \mu m))$ );

$G_{\lambda,ref}$  é a porção de irradiação espectral refletida pelo corpo (medida em  $(W/(m^2 \cdot \mu m))$ );

$G_{\lambda,tr}$  é a porção de irradiação espectral transmitida pelo corpo (medida em  $(W/(m^2 \cdot \mu m))$ ).

A Equação 8 mostra como calcular a Irradiação espectral a partir de uma incidência de radiação num corpo. Em boa parte das situações relacionadas à engenharia, o meio é opaco à radiação incidente, o que acarreta em  $G_{\lambda,tr} = 0$  e os processos remanescentes de absorção e reflexão podem ser tratados como fenômenos de superfície. Portanto, a irradiação é apenas absorvida e refletida pela superfície, com as magnitudes relativas de  $G_{\lambda,abs}$  e  $G_{\lambda,ref}$  dependendo de  $\lambda$  e da natureza do material da superfície.

Se, na Equação 12, todos os valores forem divididos por  $G_{\lambda}$ , obtém-se a Equação 9:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (9)$$

Onde:  $\alpha$  é absorptividade;

$\rho$  é refletividade;

$\tau$  é a transmissividade.

Como exposto na Equação 9, pelo balanço de energia, os valores de absorptividade, refletividade e transmissividade somados têm que ser iguais a 1 (um), para materiais opacos  $\tau = 0$ . Após tal explicação, aborda-se cada propriedade radiativa individualmente.

#### 4.5.2.1 ABSORTIVIDADE

Para Howell, Siegel e Mengüç (2010), a absorptividade é definida como a porção da energia incidente em um corpo que é absorvida pelo corpo. Esta radiação incidente depende das condições radiativas (intensidade espectral) na fonte da energia incidente. A distribuição espectral da radiação incidente é independente da temperatura ou natureza física da superfície absorvente, a menos que a radiação emitida da superfície seja parcialmente refletida da fonte ou arredores de volta à superfície. E é definida como na Equação 10:

$$\alpha_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda, \text{abs}}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} \quad (10)$$

Onde:  $\alpha_{\lambda}(\lambda)$  é absorptividade hemisférica espectral;

$G_{\lambda, \text{abs}}(\lambda)$  é a porção de irradiação absorvida pelo corpo;

$G_{\lambda}(\lambda)$  é a irradiação espectral incidente.

A Equação 10 demonstra como se calcula a absorptividade hemisférica espectral, que dar-se-á através da razão da porção de irradiação absorvida pelo corpo pela irradiação espectral incidente. Para a maior precisão na engenharia, trabalha-se com propriedades superficiais que representam médias direcionais sendo dependentes apenas do

comprimento de onda, como mostrado na Equação 15 (tal entendimento será utilizado analogamente para refletividade e transmissividade).

#### 4.5.2.2 REFLETIVIDADE

A refletividade é a propriedade do material que determina a fração da radiação incidente que é refletida por sua superfície. Contudo, leva-se em consideração que a refletividade depende da direção da radiação incidente e também da direção da radiação refletida. Para mais fácil definição, evitar-se-á, neste trabalho, essa complicação, trabalhando exclusivamente com uma refletividade que representa uma média integrada em todo o hemisfério associado. Analogamente à absortividade, a refletividade possui uma equação que considera as propriedades superficiais que representam médias direcionais sendo dependentes apenas do comprimento de onda como ilustrado na Equação 11.

$$\rho_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda,ref}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} \quad (11)$$

Onde:  $\rho_{\lambda}(\lambda)$  é refletividade hemisférica espectral;

$G_{\lambda,ref}(\lambda)$  é a porção de irradiação refletida pelo corpo;

$G_{\lambda}(\lambda)$  é a irradiação espectral incidente.

A Equação 11, por sua vez, mostra que a refletividade hemisférica espectral se calcula através da razão da porção de irradiação refletida pelo corpo pela irradiação espectral incidente.

#### 4.5.2.3 TRANSMISSIVIDADE

Transmissividade pode ser definida como a propriedade radiativa que o corpo detém de transmitir a radiação incidente que transpassa o próprio corpo. Como mencionado anteriormente, os materiais opacos não apresentam a característica transmissividade, ou seja, para seus cálculos de propriedades radiativas, leva-se em conta apenas absortividade e refletividade. Embora o tratamento de obtenção de resposta para

a transmissividade seja uma complicação devido a sua relação com a refletividade e as formas direcionais e bidirecionais com as quais as radiações podem ser transmitidas após cruzarem o corpo, resultados razoáveis podem ser obtidos com a utilização do uso de transmissividades hemisféricas definidas, como mostrado na Equação 12.

$$\tau_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda, \text{tr}}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} \quad (12)$$

Onde:  $\tau_{\lambda}(\lambda)$  é transmissividade hemisférica espectral;

$G_{\lambda, \text{tr}}(\lambda)$  é a porção de irradiação transmitida pelo corpo;

$G_{\lambda}(\lambda)$  é a irradiação espectral incidente.

Na equação 12, apresenta-se a definição matemática de transmissividade hemisférica espectral como razão da porção de irradiação transmitida pelo corpo pela irradiação espectral incidente. Explicadas todas as propriedades radiativas, pode-se concluir este tópico com a Lei de Kirchhoff.

#### 4.6 LEI DE KIRCHHOFF

Para entender a Lei de Kirchhoff, primeiro, considera-se um volume de controle isotérmico com temperatura superficial  $T_s$ , no interior do qual está confinado um corpo relativamente pequeno se comparado ao volume. Como esse corpo é pequeno, quando comparado ao recinto, sua influência é desprezível no campo de radiação, que é devido ao efeito cumulativo da emissão e da reflexão na superfície do volume de controle. Em regime estacionário, deve existir, segundo a Lei da Termodinâmica, equilíbrio térmico entre o corpo e o volume de controle. Desse modo,  $T_1 = T_s$ , e a taxa líquida de transferência de energia para cada superfície deve ser igual a zero (leva-se em consideração que aconteceria o mesmo se existissem mais de um corpo dentro do volume). Com isso, a emissividade hemisférica total da superfície é igual à sua absorptividade hemisférica total se as condições isotérmicas estão presentes e não há transferência de calor radiante líquida em qualquer das superfícies que nada mais é que a Lei de Kirchhoff, como exibe-se na Equação 13.

$$\varepsilon = \alpha \quad (13)$$

Onde:  $\varepsilon$  é a emissividade hemisférica total;

$\alpha$  é a absorptividade hemisférica total.

Visto que, na Equação 13, tem-se que a emissividade hemisférica total é igual a absorptividade hemisférica total, conclui-se o que se mostra na Equação 14.

$$\varepsilon + \tau + \rho = 1 \quad (14)$$

Onde:  $\varepsilon$  é a emissividade hemisférica total;

$\tau$  é a transmissividade hemisférica total;

$\rho$  é a refletividade hemisférica total.

A Equação 14 mostra que, segundo a Lei de Kirchhoff, o balanço de energia agora possui, em sua composição, a emissividade ao invés da absorptividade. Por fim, para corpos negros, não há transmissividade ou refletividade, então  $\tau = 0$  e  $\rho = 0$ . Portanto, tem-se que  $\varepsilon = 1$ , provando, assim, a definição de um corpo negro.

## CAPÍTULO V

O objetivo deste capítulo é apresentar a Termografia, suas principais influências e aplicações baseadas nas normas brasileiras regulamentadas. Além disso, também serão apresentados alguns trabalhos de pesquisa sobre a Termografia para o estudo de falhas mecânicas.

### 5. TERMOGRAFIA

A termografia sem contato é a técnica de detecção da distribuição de energia térmica emitida pela superfície de um ou vários corpos por radiação térmica. É um método de detecção, visualização e gravação de diferentes níveis de distribuição de temperatura da superfície de um objeto de modo não destrutivo e não invasivo, esteja ele em funcionamento ou não.

Para Caramalho (2012), a termografia é definida como a técnica que permite a medição, à distância e sem contato, das temperaturas superficiais dos objetos contemplados, bem como a visualização da distribuição dessas temperaturas, ou seja, a forma em que elas se manifestam nesse objeto. Todos os corpos acima do zero absoluto (- 273,15 °C ou 0 K) emitem calor, que é constantemente emitido, absorvido e reemitido por todos os corpos dentro de um mesmo recinto e pelo próprio recinto (através de seus limites). De uma forma simplista, podemos dizer que a termografia é a técnica que estende a visão humana através do espectro infravermelho.

Os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios termográficos são chamados termovisores ou câmeras termográficas. Essas ferramentas são responsáveis por gerar as imagens térmicas, conhecidas como termogramas, que evidenciam a radiação infravermelha emitida pelo objeto em análise, resultando em distinções visuais por meio de cores e valores numéricos para definir sua temperatura. Já, para Mendonça (2005), uma câmera de termografia por infravermelhos (ou termovisor) é definida como um aparelho que detecta energia infravermelha (calor), convertendo-a em sinal elétrico e produzindo imagens, determinando, através de cálculos, valores de temperatura. A seguir, nas Figuras 20, exibe-se um exemplo de termovisor.

**Figura 20: Exemplo de Termovisor**



Fonte: <https://exsense.com.br/produtos/camera-infravermelha-com-faixa-de-temperatura-estendida-flir-e8xt>

A Figura 20 apresenta um exemplo de termovisor portátil, ferramenta que produz termogramas. Destaque para o padrão de cores, em A, que indica, no objeto visualizado, os locais de maiores e menores temperaturas.

Ainda sobre a termografia, existem dois tipos de termografia existentes. A termografia qualitativa e a termografia quantitativa. A Figura 22 mostra um exemplo de cada tipo.

**Figura 21: Termografias (a) qualitativa e (b) quantitativa**



(a)

(b)

Fonte: <https://engeteles.com.br/manutencao-preditiva/>

A Figura 21a mostra um exemplo de termograma de um tubo com alta temperatura. Para esse termograma, foi aplicada a termografia qualitativa que visa o perfil térmico e não os valores de temperatura. Contudo, para a Figura 21b, que mostra o termograma de um painel eletrônico, foi aplicada a termografia quantitativa, onde são determinados os valores de temperatura para cada região da imagem. A termografia quantitativa tem a vantagem de definir o nível de gravidade da anomalia gerada pelo aquecimento do material.

Para aplicação da técnica da termografia, utiliza-se um conjunto de normas para padronização e melhor aferição dos termogramas. Essas normas foram desenvolvidas pelo instituto especializado em normatização, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). O quadro 2 apresenta normas para utilização da técnica da termografia.

**Quadro 2: Normas técnicas para ensaios termográficos**

<b>Norma (NBR)</b>	<b>Título</b>	<b>Objetivo</b>
15424:2016	Ensaaios não destrutivos - Termografia – Terminologia	Esta norma define os termos utilizados no método de ensaio não destrutivo de Termografia.
15572:2013	Ensaaios não destrutivos — Termografia — Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos	Esta norma define os termos utilizados no método de ensaio não destrutivo de Termografia.
15718:2009	Ensaaios não destrutivos — Termografia — Guia para verificação de termovisores	Esta Norma fornece diretrizes para garantir a confiabilidade das medições dos termovisores, através de procedimentos seguidos pelo usuário final para a verificação dos termovisores durante o intervalo da validade da calibração definido pelo próprio usuário.
15763:2009	Ensaaios não destrutivos - Termografia - Critérios de definição de periodicidade de inspeção em sistemas elétricos de potência	Esta Norma prescreve os critérios para definição de periodicidade de inspeção por Termografia de sistemas elétricos de potência.
15866:2010	Ensaio não destrutivo — Termografia — Metodologia de avaliação de temperatura de trabalho de equipamentos em sistemas elétricos	Esta Norma se destina a orientar a metodologia de avaliação térmica, qualitativa e/ou quantitativa, a ser realizada pelo responsável da análise termográfica, de acordo com as diversas situações e contextos em que os diferentes equipamentos elétricos estão submetidos.
16292:2014	Ensaaios não destrutivos — Termografia — Medição e compensação da temperatura aparente refletida utilizando câmeras termográficas	Esta Norma descreve os procedimentos para medição e compensação da temperatura aparente refletida quando da medição da temperatura da superfície de um objeto utilizando câmeras termográficas.
16485:2016	Ensaaios não destrutivos - Termografia - Medição e compensação da emissividade utilizando câmeras termográficas ou radiômetros	Esta Norma descreve os métodos para realizar a medição e compensação da emissividade da temperatura da superfície de um objeto utilizando câmeras termográficas ou radiômetros.
16554:2016	Ensaaios não destrutivos - Termografia - Medição e compensação da transmitância de um meio atenuante utilizando câmeras termográficas	Esta Norma estabelece o procedimento para realizar a medição e compensação da transmitância utilizando uma câmera termográfica com a finalidade de medir a temperatura de um objeto por um meio atenuante, como, janela de infravermelho, filtro ou atmosfera.

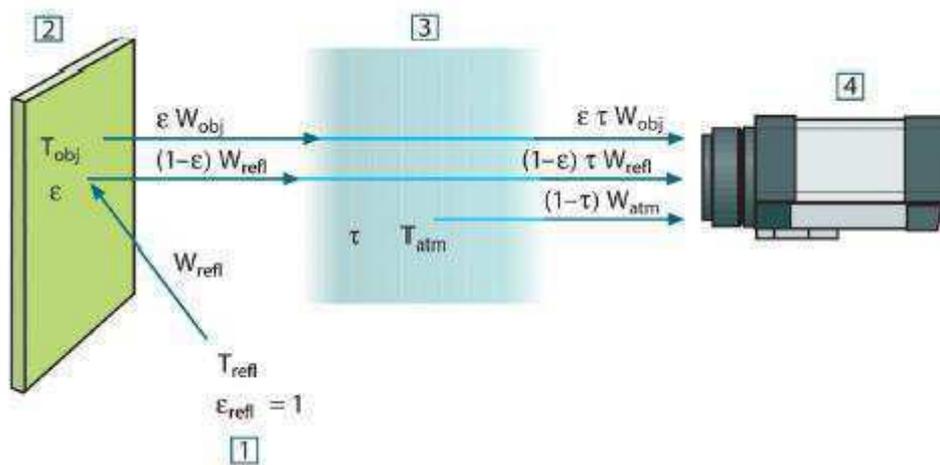
Fonte: Adaptado de Olinda (2018)

O Quadro 2 apresenta as Normas Técnicas Brasileiras (NBR) atualizadas que norteiam a aplicação da técnica da termografia. No quadro, constam os títulos e objetivos de cada NBR.

### 5.1 CÁLCULOS PARA APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA

Segundo Caramalho (2012), no estudo da termografia, o termovisor, ao visualizar um objeto, recebe radiações emitidas não só pelo próprio objeto, mas também pelo meio adjacente, refletidas pela superfície do objeto. As duas radiações são atenuadas em parte pela atmosfera durante o curso da medição. Há, ainda, uma terceira radiação, que se une para a medição do termovisor, sendo essa terceira radiação a contribuição de radiações emitidas pela própria atmosfera. Uma quarta contribuição que pode ser descartada para a maioria dos casos reais é a radiação proveniente de uma fonte externa intensa fora do campo de visão, pois, na maioria dos casos, a sua quantidade é suficientemente reduzida, a ponto de se tornar negligenciável. Para o caso de não ser reduzida, cabe ao operador do aparelho isolar o sistema para evitar tais perturbações às medições. A Figura 22 exibe um modelo de funcionamento da câmera termográfica.

**Figura 22: Funcionamento da câmera termográfica**



Fonte: FLIR (2021)

A Figura 22 apresenta o funcionamento de um termovisor, tendo, em 1, o meio adjacente no qual estão inseridos os objetos e termovisores. Em 2, o objeto estudado. Em 3, a atmosfera que reside no espaço entre o objeto e a câmera termográfica. E em 4, a câmera termográfica recebendo as emissões de radiação para produção do termograma.

A câmara térmica capta a radiação emitida e refletida pelo objeto em foco e a emitida e refletida pela atmosfera gerando um sinal de saída da câmara. Para um corpo negro em estudo, o sinal pode ser medido, como descrito pela Equação 15.

$$U_{\text{fonte}} = CW (T_{\text{fonte}}) \quad (15)$$

Onde:  $U_{\text{fonte}}$  é o sinal de saída da câmara;

$T_{\text{fonte}}$  é a temperatura atual do corpo;

$W$  é a potência de radiação recebida a partir de um corpo negro a uma temperatura;

$C$  é uma constante de proporção.

Para a Equação 15, supõe-se que a potência da radiação recebida  $W$  da fonte de temperatura de um corpo negro  $T_{\text{fonte}}$ , a uma distância curta, gera um sinal de saída da câmara  $U_{\text{fonte}}$  proporcional à entrada da potência, onde  $C$  é uma constante de proporcionalidade. Porém, se o objeto em estudo for um corpo comum, com emitância  $\varepsilon$ , a radiação será  $\varepsilon W_{\text{fonte}}$ .

Para encontrar toda a potência a ser emitida para a câmara  $W_T$  (ou seja, a potência da fonte), leva-se em consideração: a parte emitida pelo objeto em foco  $\varepsilon\tau W_{\text{obj}}$ , a parcela refletida pelo objeto  $(1 - \varepsilon)W_{\text{ref}}$  e a emitida e refletida pela atmosfera  $(1 - \tau)W_{\text{atm}}$ . O somatório do total de radiação recebida pela câmara é calculado como descrito na Equação 16, porém não contempla a radiação emitida pela vizinhança, considerando que a câmara está focada apenas no objeto em estudo.

$$W_T = \varepsilon\tau W_{\text{obj}} + (1 - \varepsilon) W_{\text{ref}} + (1 - \tau) W_{\text{atm}} \quad (16)$$

Onde:  $\varepsilon\tau W_{\text{obj}}$  é a parcela de radiação emitida pelo objeto e transmitida pela atmosfera;

$(1 - \varepsilon)W_{\text{ref}}$  com  $(1 - \varepsilon) = \rho$ , trata-se da parcela refletida pelo objeto e transmitida pela atmosfera;

$(1 - \tau)W_{\text{atm}}$  trata-se da parcela emitida e refletida pela atmosfera.

A Equação 16 apresenta o cálculo da potência de radiação total para um corpo comum, levando em conta as parcelas emitidas e refletidas pelo objeto e as parcelas emitidas e refletidas pela atmosfera. Multiplicando-se cada termo da Equação 22 pela constante C da Equação 21, substituindo-se os produtos CW pela U correspondente, obtém-se o seguinte resultado e fazendo arranjos matemáticos, ao isolarmos  $U_{obj}$ , obtém-se a Equação 24 abaixo:

$$U_{obj} = \frac{1}{\varepsilon\tau} U_T - \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} U_{ref} - \frac{(1 - \tau)}{\varepsilon} U_{atm} \quad (17)$$

Onde:  $U_{obj}$  é a tensão de saída calculada da câmera para um corpo negro de temperatura  $T_{obj}$ , ou seja, uma tensão que pode ser diretamente convertida em temperatura real requerida do objeto;

$U_T$  é a tensão de saída medida da câmera para o caso real;

$U_{ref}$  é a tensão de saída teórica da câmera para um corpo negro de temperatura  $T_{ref}$  de acordo com a calibragem;

$U_{atm}$  é a tensão de saída teórica da câmera para um corpo negro de temperatura  $T_{atm}$  de acordo com a calibragem.

A Equação 17 exprime a fórmula de medição geral utilizada em todos os equipamentos termográficos de uma das marcas mais conhecidas e comercializadas para este tipo de função, a FLIR Systems (que é a marca dos equipamentos utilizados neste trabalho). Outro ponto a se destacar na Equação 17 é a importância da emissividade do corpo, sendo esta variável a de maior influência nas análises termográficas.

Em conjunto com as informações das equações, estudam-se, também, as características de como o procedimento é realizado. Para todos os procedimentos técnicos existentes, deve-se seguir as diretrizes criadas pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

A NBR 15572:2013 explica que não se deve realizar um ensaio termográfico quando a velocidade do ar estiver acima de 6m/s, pois pode haver influência nos resultados.

A NBR 15572:2013 também instrui que, durante as inspeções, evita-se influências de reflexos e do carregamento solar e, em condições de chuva ou neblina, não realiza-se

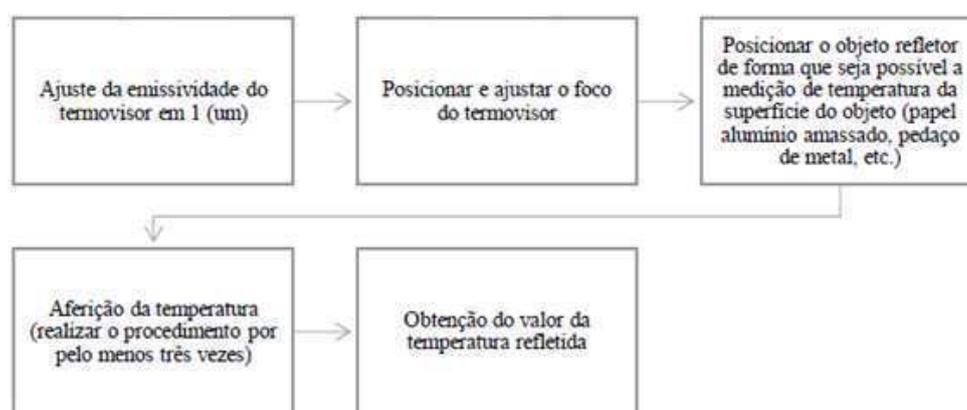
os ensaios, pois o resfriamento gerado e a redução da transmissão da radiação emitida prejudica o ensaio. Além disso, após cessar a chuva, deve-se esperar pelo menos 1 (uma) hora para retomada dos trabalhos. A transmitância radiativa é influenciada pela umidade do ar na atmosfera, pois há uma maior atenuação das ondas eletromagnéticas quanto maior for a presença de água no ar. Por fim, a NBR 15572:2013 elucida que não se deve realizar inspeções quando a umidade estiver acima de 90% e para distâncias curtas, a umidade pode ser predefinida como 50%.

Para o ângulo de observação da câmera, deve-se tomar a angulação mais perpendicular possível à superfície analisada. Isto se deve ao fato de quanto mais perpendicular o termovisor estiver do plano que se deseja analisar, menor será a redução da emissividade.

Para o termovisor, podem ser citadas as características, como: detecção da banda infravermelha, sensibilidade térmica do equipamento, faixa de temperatura, resolução térmica, medição e calibração do sistema, campo de visão do termovisor e taxa de aquisição de dados. Já para as variáveis que devem ser introduzidas no termovisor e que podem afetar o resultado apresentado, são relacionadas: a distância do objeto, umidade do ar, temperatura ambiente atmosférica e a temperatura refletida.

Entendido estes procedimentos, as normas NBR 15572 e a NBR 16292 indicam que, para a medição de temperatura refletida, existem dois métodos de medição. Um deles é o método indireto (ou refletor), que é apresentado abaixo na Figura 23.

**Figura 23: Procedimentos simplificados para o método indireto ou refletor**



Fonte: Oliveira Neto (2019)

Conforme visto na Figura 23, o método indireto segue os seguintes procedimentos: ajuste da emissividade da câmera térmica em 1 (um), posicionamento

ajustado seu foco, da mesma maneira como se realizará a medição da temperatura do objeto desejado. Posteriormente, deve-se posicionar o refletor (que é um material refletor de radiação como papel alumínio amassado ou pedaço de metal) em frente ao objeto e então realizar a aferição da temperatura. Por fim, o procedimento deve ser realizado ao menos 3 (três) vezes para o cálculo de uma média e, assim, obter um resultado mais preciso e satisfatório. A Figura 24 demonstra um exemplo de medição indireta.

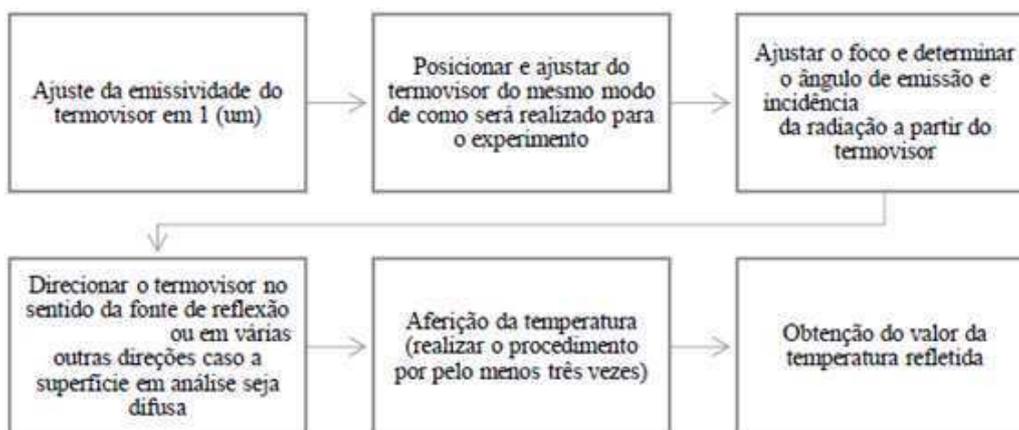
**Figura 24: Exemplo de método indireto para aferir temperatura refletida**



Fonte: NBR 16292 (2014)

A Figura 24 demonstra um exemplo normativo de experimento termográfico realizado com o método indireto. Por sua vez, o método direto segue os seguintes procedimentos listados na Figura 25.

**Figura 25: Procedimentos simplificados para o método direto**

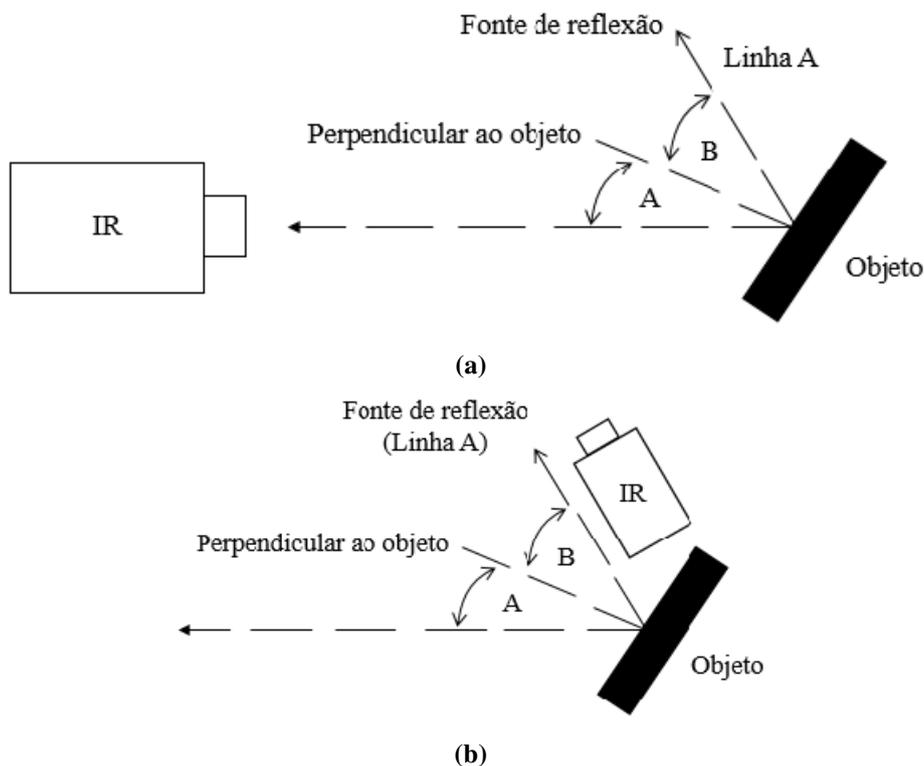


Fonte: Oliveira Neto (2019)

Observando a Figura 25, nota-se que o método direto segue os seguintes procedimentos: ajuste da emissividade da câmera térmica em 1 (um) e posicionamento do termovisor do mesmo modo que será feito o experimento. Após isso, ajusta-se o foco, determinando o ângulo de emissão e incidência da radiação a partir da câmera, como

mostrado na Figura 26a. Então, direciona-se a câmera sentido a fonte de reflexão, conforme Figura 26b, ou em várias direções, caso a superfície do objeto em estudo seja difusa, aferindo, assim, a temperatura do objeto. Como no método indireto, deve-se repetir, no mínimo, 3 (três) vezes a aferição e, para melhor precisão, realizar o cálculo da média.

**Figura 26: Exemplo de método direto para aferir temperatura refletida**



Fonte: NBR 16292 (2014)

A Figura 26 ilustra um exemplo normativo de experimento termográfico realizado com o método direto.

## 5.2 APLICAÇÕES DA TERMOGRAFIA

Medir a temperatura de um corpo e analisar se aquela temperatura corresponde a uma quantidade a qual se aplica a realização de uma tarefa normal é benéfico e, muitas vezes, necessário em qualquer ramo da ciência. Seja numa indústria com equipamentos geradores de calor como motores, fornos, compressores, equipamentos que promovem o arrefecimento e circuitos elétricos ou em local de comércio e serviços com pessoas ou animais fazendo atividades físicas, é possível perceber que há inúmeras fontes de calor,

algumas naturais, outras forçadas, sendo que, dentre essas fontes, algumas prejudicam as mais variadas tarefas devido a temperatura ter forte influência tanto nos seres quanto nos objetos. No entanto, ressalta-se que os seres vivos, equipamentos e processos possuem diferentes características, sendo a avaliação e a captura de anomalias por termografia diferente entre eles. Porém, o método da termografia pode ser aplicado em várias áreas que incluem tais fontes de calor.

Em Ávalo (2014), utilizou-se a termografia infravermelha para estimar a temperatura ambiental de alojamento de frangos de corte e se verificou a diferença entre as médias das temperaturas superficiais em dois aviários similares, mas com fechamento lateral de cortinas com características diferentes. Além disso, comparou-se o conforto ambiental dos aviários, em função do uso de cortinas de fechamento lateral com diferentes características e das estatísticas avaliadas das características ambientais climáticas dos aviários em relação às condições locais externas. Ávalo (2014) chegou à conclusão que a análise termográfica possibilitou a avaliação da temperatura interna nos aviários, em diferentes fases de criação, sendo estas temperaturas adequadas para assegurar o conforto térmico das aves.

Para Garrido, Laguela e Arias (2018), a detecção, classificação e contorno das patologias prediais são necessários para tomar as medidas de manutenção correspondentes em qualquer tipo de projeto na construção civil. Tais patologias de construção estudadas foram: as pontes térmicas, que são cruzamentos em que o isolamento térmico não foi realizado de forma contínua e as zonas úmidas, que são locais da construção afetados por infiltração de líquidos. Utilizando-se da termografia em um prédio, Garrido, Laguela e Arias (2018) destacam que, em todos os testes, foi comprovada a suposição de temperatura em cada termograma em relação ao tipo de patologia, com médias de 71% de precisão nas imagens com pontes térmicas e 82% de precisão nas imagens com umidade. Concluindo-se que, a metodologia da termografia detecta melhor as áreas reais de pontes térmicas, do que áreas reais de umidade, porém com piores resultados de precisão.

### **5.2.1 APLICAÇÕES DA TERMOGRAFIA EM ENGRANGENS DE ROSCA SEM FIM**

Waqar e Demetgul (2016) apresentam uma técnica a ser utilizada para identificar precisamente a condição de trabalho de uma engrenagem rosca sem fim por meio de seus

sinais sonoros, sinais vibratórios e padrões térmicos (através da técnica da termografia). Um Módulo de Aquisição de Dados foi usado para coletar sinais brutos de vibração e som. Esses dados foram, então, pré-processados para tratamento de sinal, tomando a média dos dados brutos e, em seguida, subtraindo-os do sinal bruto original, resultando em um sinal muito mais refinado. Após a conversão para o domínio da frequência, usando a Transformada Rápida de Fourier, os dados foram usados para extração de características. Redes Neurais Artificiais (RNA) com multicamadas foram escolhidas como uma técnica para decifrar as relações complexas destes testes. Um total de 16 níveis de óleo diferentes e condições relacionadas a rotações por minuto (rpm) foram observados para a engrenagem coroa sem fim em condições normais e com falha. Cada experimento foi repetido 10 vezes, resultando em um total de 160 experimentos, para avaliação do desempenho do sistema desenvolvido.

No trabalho de Waqar e Demetgul (2016), os experimentos foram realizados em uma bancada experimental, construída especificamente para o diagnóstico de máquinas rotativas, principalmente engrenagens. Dois sensores medem os sinais que foram conectados diretamente a um módulo de aquisição de dados e analisador de pulso. Um motor CA trifásico fornece uma faixa de velocidade de 100 a 5000 rpm para a configuração experimental usada neste estudo. Um acelerômetro que possui banda de frequência entre 10 Hz a 25,6 kHz e uma sensibilidade de 10 mV/ms<sup>2</sup>, foi utilizado para a detecção de vibrações, sendo colocado, diretamente, na carcaça das engrenagens. Um microfone foi usado para a detecção de sinais de som que tem uma faixa de frequência de 6–20 kHz.

Os sinais dos sensores foram registrados pelo módulo de aquisição e análise pelos *softwares Pulse 10.2* e o MATLAB, que foram usados para fins de processamento de sinal. Uma câmera térmica, Optris PI, que trabalha na faixa de temperatura de 20 °C a 900 °C com uma resolução óptica de 640\*480 pixels, foi usada para capturar imagens térmicas da caixa de engrenagens de teste. Essas imagens foram posteriormente examinadas para estudar o padrão de aquecimento para as diferentes condições de trabalho da caixa de câmbio. No sistema, foram introduzidas uma engrenagem normal e uma com defeito. Uma falha na caixa de engrenagens foi criada artificialmente removendo uma parte de um dente da engrenagem. A Figura 27 mostra a configuração do experimento.

**Figura 27: Configuração do experimento de Waqar e Demetgul (2016)**

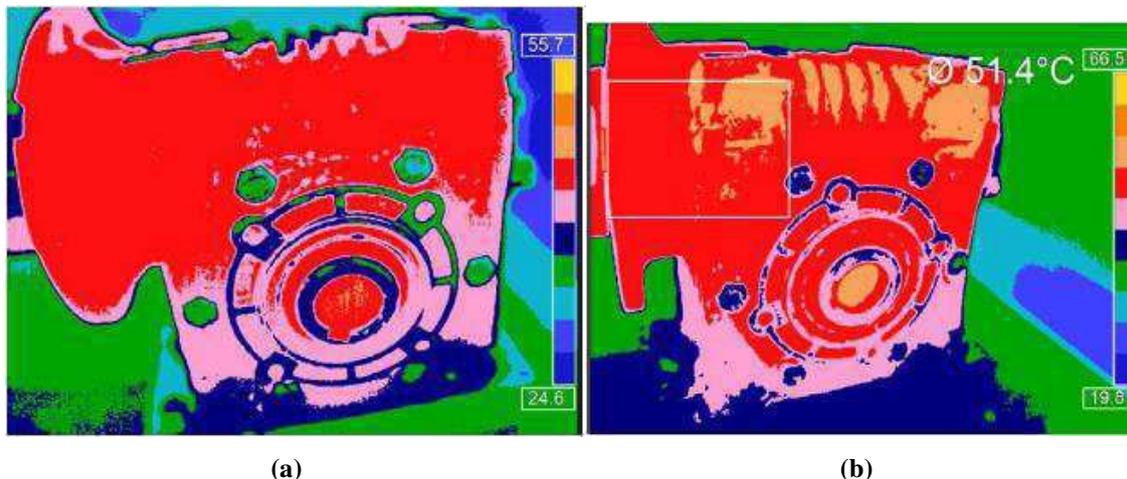


**Fonte: Waqar e Demetgul (2016)**

Na Figura 27, tem-se a configuração da bancada utilizada por Waqar e Demetgul (2016). Em cima desta bancada, tem-se, da esquerda para a direita, microfone, motor, acelerômetro, redutor, câmera térmica e módulo de aquisição de dados.

Dados brutos foram coletados para 6 diferentes condições de operação para as duas engrenagens (com e sem defeito). Dados de vibração e som, bem como padrão de fluxo de calor em uma engrenagem sem-fim normal e com defeito, foram coletados e examinados. Além disso, dados de vibração e som foram coletados em 2 velocidades de operação diferentes (1440 rpm e 1920 rpm) e 4 níveis de óleo diferentes (0 ml, 20 ml, 50 ml e 100 ml). Além disso, imagens térmicas, da engrenagem normal e defeituosa, também foram capturadas para examinar as diferenças em seu padrão de fluxo de calor. Por fim, um modelo de rede neural, com base em 16 parâmetros de entrada entre amplitude e frequência dos sinais sonoros e vibratórios, foi projetado para fins de classificação e cálculo da condição do redutor. A imagem 28 mostra termogramas do redutor utilizado neste experimento.

**Figura 28: Termogramas do redutor (a) sem defeito e (b) com defeito do trabalho de Waqar e Demetgul (2016)**



Fonte: Waqar e Demetgul (2016)

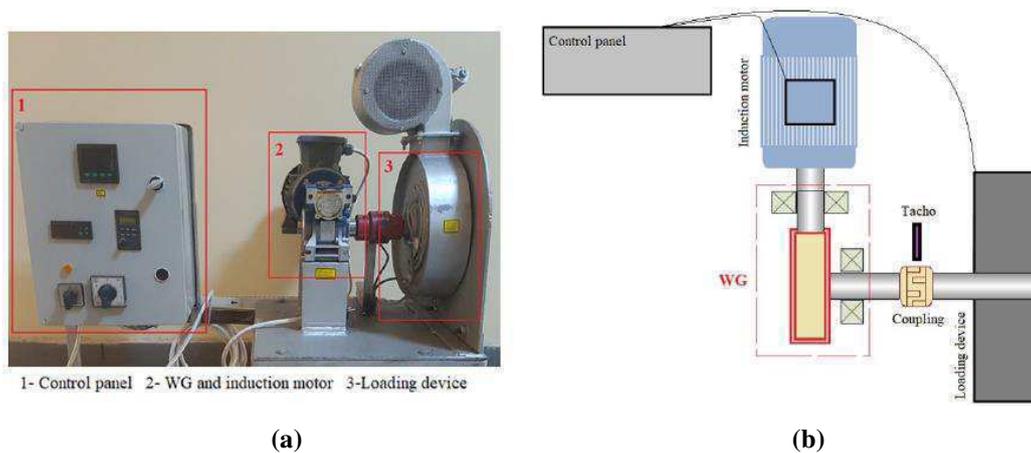
A Figura 28 apresenta termogramas do redutor de rosca sem fim do trabalho de Waqar e Demetgul (2016). Em 28a, o redutor está trabalhando em condições normais, porém, em 28b, o redutor está funcionando com um defeito localizado e isso gera a diferença de temperatura notada nas duas figuras. A temperatura geral de uma caixa de câmbio normal (28a) após 8 h de funcionamento a 1920 rpm com 50 ml de óleo era 46,7 °C, enquanto, para a caixa de câmbio com defeito (28b), a temperatura observada era de 51,4 C.

Por fim, Waqar e Demetgul (2016) detectaram que os diferentes sinais de vibração e som produzidos durante as operações normais e relacionadas a erros das engrenagens foram coletados por diferentes sensores e aplicados na rede neural estabelecida. A rede neural, por sua vez, atingiu uma taxa de sucesso de 99,88% de aprendizado com esses dados. Além disso, a análise da imagem térmica também foi realizada nas engrenagens sem-fim. Os resultados mostram que houve um aumento na temperatura da engrenagem defeituosa quando comparada a uma engrenagem sem-fim normal. Isso mostra que as técnicas de pesquisa utilizadas neste estudo foram eficientes o suficiente para extrair informações úteis de dados brutos para análise e diagnóstico de falhas de engrenagens sem-fim.

O estudo de Karabacak, Ozmen e Gumusel (2020) apresenta um aplicativo de monitoramento de condições com rede neural convolucional (CNN do inglês Convolutional Neural network), baseado em imagens térmicas de uma bancada de teste de redutor de rosca sem fim (WG do inglês Worm Gearbox) que simula diferentes

cargas e velocidades operacionais. A novidade deste estudo está na aplicação do CNN para detecção de falhas em WGs a partir de dados de imagens térmicas. Esse estudo termográfico apresenta vantagem em relação aos estudos de medição vibracional ou sonora por serem mais acessíveis financeiramente e poderem examinar toda a superfície do redutor. A velocidade de operação e a taxa de carregamento têm um grande impacto na temperatura da caixa de engrenagens, som e comportamento de vibração. A fim de distinguir a falha e o efeito das condições de trabalho, as medições devem ser feitas para todas as condições de operação, já que a velocidade de operação e a taxa de carregamento têm grande impacto no comportamento térmico, sonoro e vibracional da caixa de engrenagens. Por esse motivo, neste estudo, uma bancada de teste que pode trabalhar em diferentes velocidades e taxas de carregamento foi usada para coletar imagens térmicas, vibração e sinais sonoros de engrenagens de rosca sem fim saudáveis e com defeito, pois, em indústrias, o carregamento é produzido em taxas diferentes e operado em velocidades diferentes no ambiente de trabalho real. Para fins de comparação, dados de vibração e acústicos também foram coletados para todas as condições de trabalho. Os efeitos da variação da resolução no desempenho da CNN também são descritos. A Figura 29 apresenta a bancada de teste utilizada.

**Figura 29: Bancada experimental do trabalho de Karabacak, Ozmen e Gumusel (2020)**



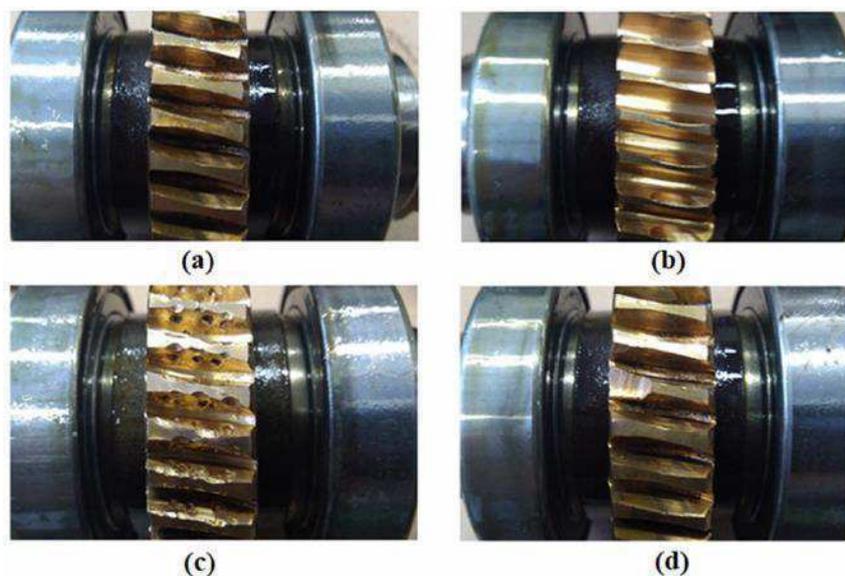
**Fonte: Karabacak, Ozmen e Gumusel (2020)**

Figura 29, tem-se, em 29a, a bancada de teste que consiste em três unidades principais: (1) painel de controle, (2) redutor de rosca sem fim de estágio único conectado a um motor de indução e (3) o dispositivo de carregamento. O motor de indução é acionado por inversor e acoplado ao WG. Um acoplamento elástico é usado entre o eixo de saída do WG e um freio de pó eletromagnético é o dispositivo de carregamento. Um

ventilador radial protege o dispositivo de carregamento do calor excessivo. Em 29b, nota-se que o inversor é ajustado por um painel digital localizado no painel de controle. O dispositivo de carregamento de corrente contínua é alimentado por um transformador que possui 5 saídas diferentes para que o sistema possa ser carregado em taxas diferentes como 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. A velocidade de saída da caixa de engrenagens é medida com um tacômetro e a tensão de entrada do dispositivo de carregamento com um voltímetro CA/CC. Por fim, para as medições, foram acoplados ao sistema: uma câmera térmica com imagem de frequência de 9 Hz, com sensibilidade inferior a 0,1 °C e foco manual distância de até 10 cm, a câmera possui detector 160x120 pixels e lente de 32° x 24°; um acelerômetro de sensibilidade 1,02 mV/(m/s<sup>2</sup>) de taxa de frequência de 0,5 a 10000 Hz; e um microfone condensador com resistência de 600 ohms e sensibilidade -60 dB na faixa de frequência de 15 Hz a 20 kHz. Além disso, um analisador de sinal dinâmico com 4 saídas analógicas foi usado para coletar e monitorar dados com acelerômetro e microfone.

No experimento realizado por Karabacak, Ozmen e Gumusel (2020), foram introduzidos defeitos em algumas engrenagens para verificar se a temperatura do redutor seria influenciada. A Figura 30 e 31 mostram, respectivamente, os defeitos e os termogramas produzidos nos testes.

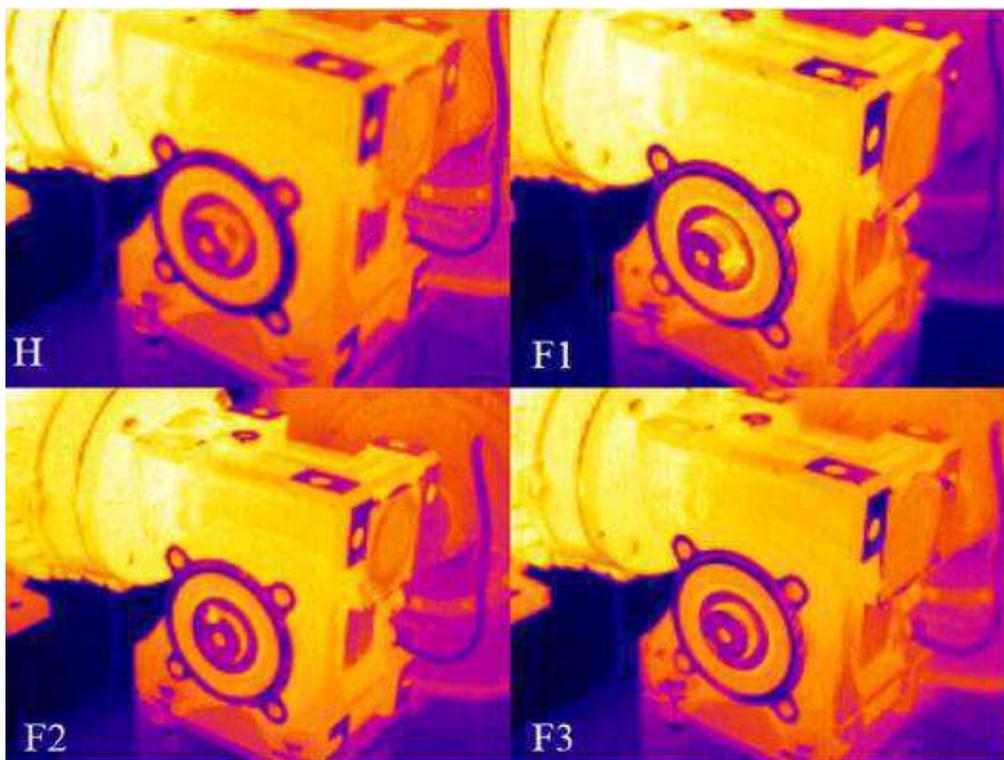
**Figura 30: Defeitos das engrenagens do trabalho de Karabacak, Ozmen e Gumusel (2020)**



**Fonte: Karabacak, Ozmen e Gumusel (2020)**

A Figura 30 exibe, em 30a, a engrenagem em perfeito estado, em 30b, a engrenagem com desgaste, em 30c, a engrenagem com corrosão e, em 30d, a engrenagem com quebra de dente. Os defeitos aplicados nas engrenagens foram produzidos por técnicas de usinagem.

**Figura 31: Termogramas do redutor com as engrenagens no trabalho de Karabacak, Ozmen e Gumusel (2020)**



Fonte: Karabacak, Ozmen e Gumusel (2020)

Na Figura 31, tem-se os termogramas dos redutores classificados, de acordo com os autores em: redutor com a engrenagem em bom estado H, redutor com a engrenagem com desgaste F1, redutor com a engrenagem com corrosão F2 e redutor com a engrenagem com quebra do dente F3. Segundo de Karabacak, Ozmen e Gumusel (2020), foram coletadas um total de 120 imagens térmicas com diferentes taxas de carregamento e velocidades de saída da caixa de engrenagens para cada redutor. Um total de 480 imagens térmicas foram obtidas de todas as caixas de engrenagens para treinamento, validação e teste do modelo IRT-CNN.

Karabacak, Ozmen e Gumusel (2020) explicam que a diferença entre as distribuições de temperatura nas superfícies de caixas de engrenagens saudáveis e defeituosas aumenta gradualmente com o aumento de taxa de carregamento e velocidade

de saída do redutor. Os termogramas de H, F1, F2 e F3 para velocidade de saída do redutor igual a 50 rpm e taxa de carregamento igual a 50% são fornecidas na Figura 31. Com todos os termogramas em mãos, percebeu-se que a temperatura máxima para F1 é 105 °C e a temperatura média da superfície é 75 °C, este redutor apresentou as maiores temperaturas durante os experimentos. O valor máximo da temperatura para F2 é 93 °C e a temperatura média da superfície é 66 °C. F2 é mais quente do que F3 nas mesmas condições. O valor máximo da temperatura para F3 é 88 °C e a temperatura média da superfície é 64 °C. A caixa de engrenagens menos aquecida é observada como H. O valor máximo da temperatura para H é 83 °C e a temperatura média da superfície é 60 °C. Para caixas de engrenagens F1, F2, F3 e H, os valores mínimos de temperatura de superfície medidos sob essas condições foram de 18,4 °C; 16,7 °C; 16,1 °C; 15,7 °C, respectivamente. Percebeu-se que o redutor mais gasto é o redutor mais quente, a falha na corrosão gera mais calor do que o dente quebrado e a caixa de engrenagens saudável é a que produz menor calor durante os experimentos.

Por fim, Karabacak, Ozmen e Gumusel (2020) realizam testes de medição sonora para o CNN, medição vibratória para o CNN e medição mista de som e vibração para o CNN nos mesmos redutores utilizados nos testes térmicos. Os autores concluem que, em condições reais simuladas de trabalho com um equipamento de teste, que pode operar em diferentes velocidades e taxas de carregamento, o modelo CNN baseado em imagens térmicas produziu os resultados mais bem-sucedidos do que outros modelos. As condições de operação afetam diretamente a temperatura de cada redutor e o padrão da imagem térmica. Além disso, diferentes tipos de falhas tendem a mostrar diferentes distribuições de temperatura sob diferentes condições de operação. Os resultados mostraram que, para os redutores com e sem defeito, o modelo térmico CNN pode ser classificado corretamente 100%, enquanto que, para o modelo vibratório CNN, teve-se uma precisão de 83,3%; o modelo sonoro CNN 81,7% e o modelo misto CNN obteve precisão de 65%. Com as câmeras térmicas de detector de alta resolução, a detecção de falhas pode ser feita com pequenos conjuntos de dados, considerando diferentes condições de operação, permitindo o diagnóstico remoto de falhas. Conclui-se, então, que pode ser útil trabalhar com câmeras térmicas, que são relativamente mais baratas do que outros dispositivos de processamento de sinal. As falhas do redutor de rosca sem fim podem ser detectadas com precisão com menor perda de custo, tempo e dinheiro.

## CAPÍTULO VI

Neste capítulo apresenta-se a metodologia utilizada neste trabalho para a realização da pesquisa. Este desenvolvimento se deu a partir de uma série de atividades divididas em etapas, como mostrado nos fluxogramas metodológicos.

### 6. METODOLOGIA

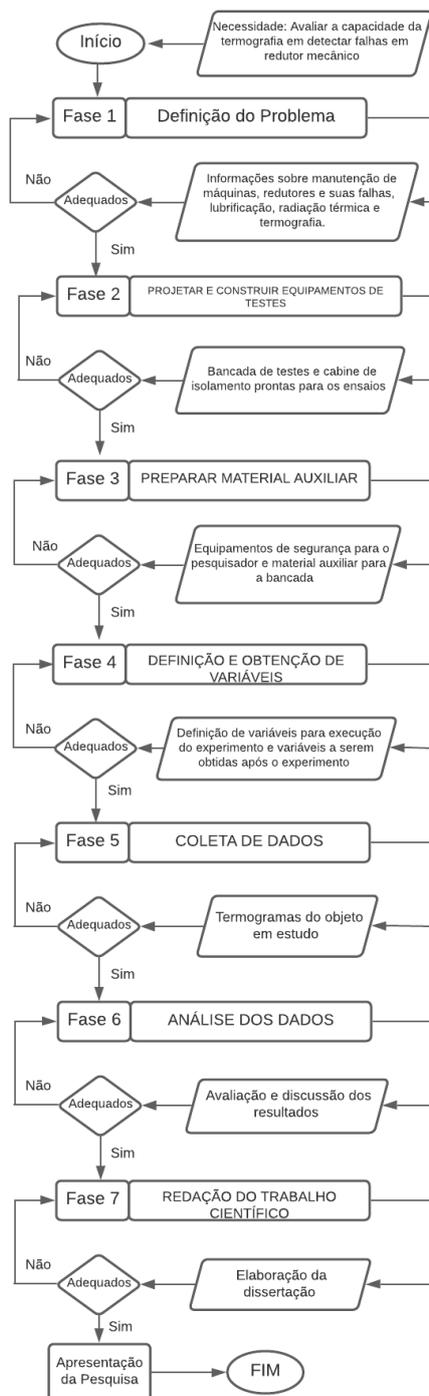
Neste capítulo, é apresentada a metodologia utilizada para a realização da pesquisa. Para Silva e Menezes (2005), a pesquisa científica pode ser classificada conforme a sua natureza, forma de abordagem, seus objetivos e procedimentos técnicos. A pesquisa apresentada, neste trabalho, classifica-se, de acordo com a natureza, como do tipo aplicada em função de ter como objetivo gerar conhecimento para uma aplicação prática e buscar a solução de problema específico. Neste caso, trata-se da avaliação da capacidade da técnica da termografia detectar a presença de problemas em redutor de rosca sem fim devido à alteração de lubrificação. Quanto à forma de abordagem do problema, trata-se de uma pesquisa quantitativa, o que significa traduzir as informações expressas em valores numéricos, classificando-as e analisando-as para a obtenção dos resultados. Para este trabalho, são obtidos valores de temperatura que variam de acordo com a quantidade de lubrificante e que podem indicar a presença de problemas no redutor.

Ainda, segundo Silva e Menezes (2005), com relação ao ponto de vista dos objetivos da pesquisa, trata-se de uma pesquisa explicativa devido à identificação dos fatores definitivos que constata a ocorrência de um determinado fenômeno. Neste caso, trata-se do aquecimento do redutor devido às alterações de lubrificante. Por fim, em relação aos procedimentos técnicos, este estudo se classifica com uma pesquisa experimental, pois é visto que, a partir da determinação de um objeto de estudo, como a detecção do aquecimento da caixa de engrenagem, são selecionadas as variáveis que as influenciam, suas formas de controle e observados seus efeitos gerados. Além disso, trata-se também de uma pesquisa bibliográfica, na qual há a apuração de material já publicado, na forma de livros, artigos e dissertações.

## 6.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos adotados neste trabalho seguem o fluxograma apresentado na Figura 32.

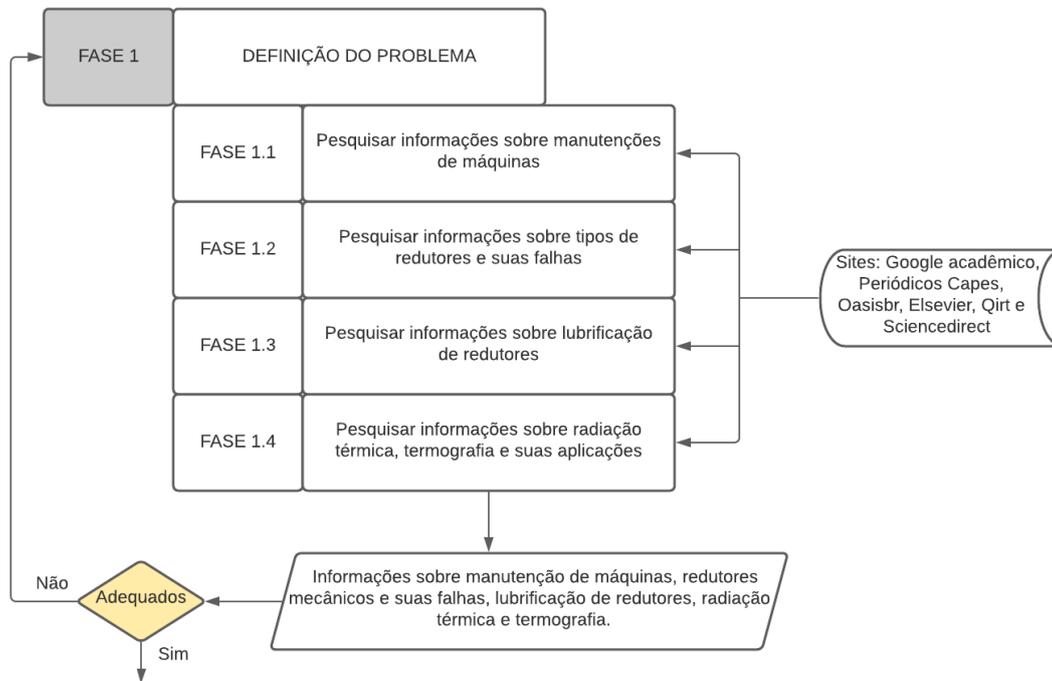
**Figura 32: Fluxograma metodológico da pesquisa**



**Fonte: Autoria própria**

A Figura 32 apresenta em detalhes todo o procedimento metodológico utilizado para produção desta pesquisa, iniciando da necessidade e finalizando na apresentação. A seguir, tem-se a Figura 33 apresentando detalhadamente a FASE 1 da pesquisa.

**Figura 33: FASE 1 da pesquisa**



**Fonte: Autoria própria**

Na Figura 33, detalha-se a FASE 1 da pesquisa. Nesta fase se esclarece os primeiros passos para execução do trabalho após entendimento da necessidade que levou a realização da pesquisa. Para tanto, aprofunda-se os conhecimentos sobre informações relacionadas ao tema em estudo, a saber: manutenção de máquinas, ETAPA 1.1, tipos de redutor e suas falhas, ETAPA 1.2, lubrificação de redutores, ETAPA 1.3, e a radiação térmica, termografia e suas aplicações, ETAPA 1.4. Todas essas informações foram pesquisadas através de livros e trabalhos científicos encontrados em sites como Google acadêmico, periódicos Capes, Oasisbr, Elsevier, Qirt e Sciencedirect. No Quadro 3, são apresentados os resultados da pesquisa para este trabalho.

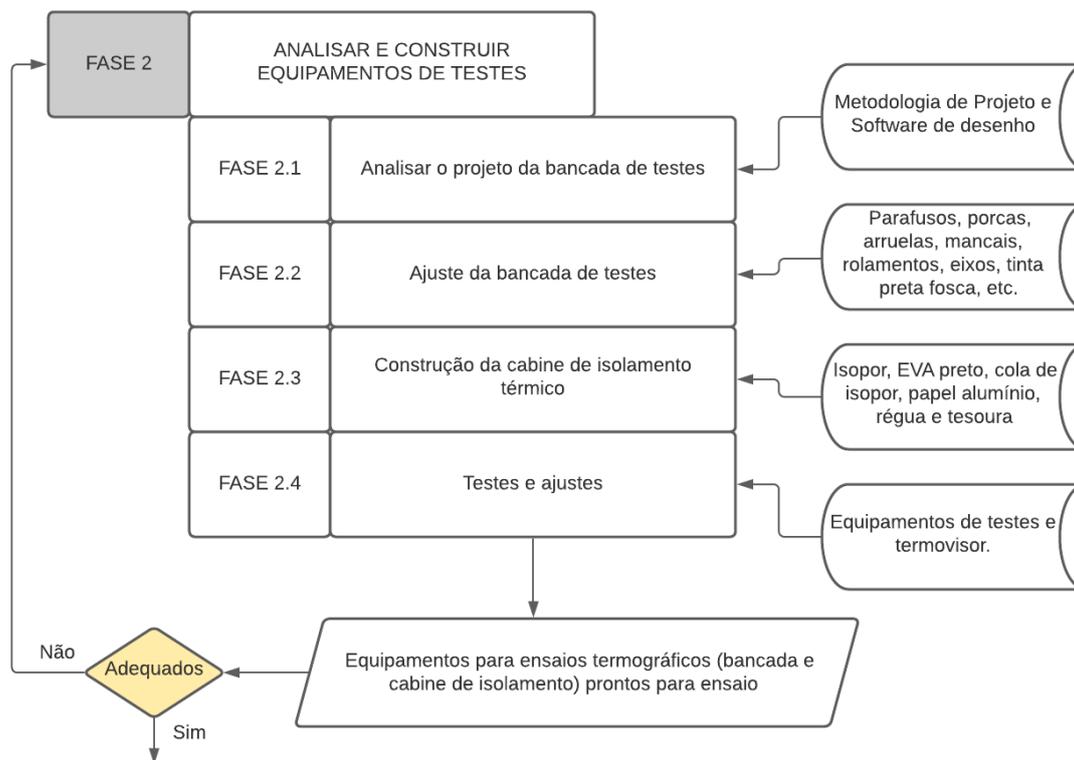
**Quadro 3: Informações obtidas sobre engrenagens de rosca sem fim e termografia.**

<b>SÍTIOS CONSULTADOS</b>	<b>PALAVRAS CHAVE</b>	<b>NÚMERO DE RESPOSTAS OBTIDAS</b>	<b>PRINCIPAIS AUTORES CONSULTADOS</b>
OASISBR, PERÍODICOS CAPES, GOOGLE ACADÊMICO e SCIENCE DIRECT	Engrenagens, engrenagens rosca sem fim, rosca sem fim, tribologia, termotribologia, lubrificação, redutor mecânico e atrito	90	Alves e Taniguti (2011); Niemann (1971); Quartezeni, Silva e Silva (2013); Sousa (2011); Budynas e Nisbett (2016); Jeyaprakash e Yang (2020); Johnson (1996); Barber e Ciavarella (2000); Radi et al. (2007); Sinatora (2005); Bogdanovich e Tkachuk (2009); Bauer et. al. (2018); Koda (2009); Norton (2013); Chernets (2019); Nezamabadi, Soury e Houshmand (2014); Jeyaprakash e Yang (2020).
OASISBR, PERÍODICOS CAPES, GOOGLE ACADÊMICO, QIRT e SCIENCE DIRECT	Engrenagem, engrenagens rosca sem fim, infravermelho, radiação térmica, termografia e calor	79	Caramalho (2012); Bergman et al. (2014); Modest (2003); Çengel e Ghajar (2015); Howell, Siegel e Menguç (2010); Waqar e Demetgul (2016); Karabacak, Ozmen e Gumusel (2020).

**Autoria: Própria**

A partir destas consultas, mostradas no Quadro 3, obteve-se conhecimento sobre as variáveis que precisam ser manipuladas quanto ao funcionamento e desenvolvimento das engrenagens de rosca sem fim e a utilização do método da termografia para detecção de falhas. Após essa coleta de material didático, seguiu-se para a FASE 2, como mostrada na Figura 34.

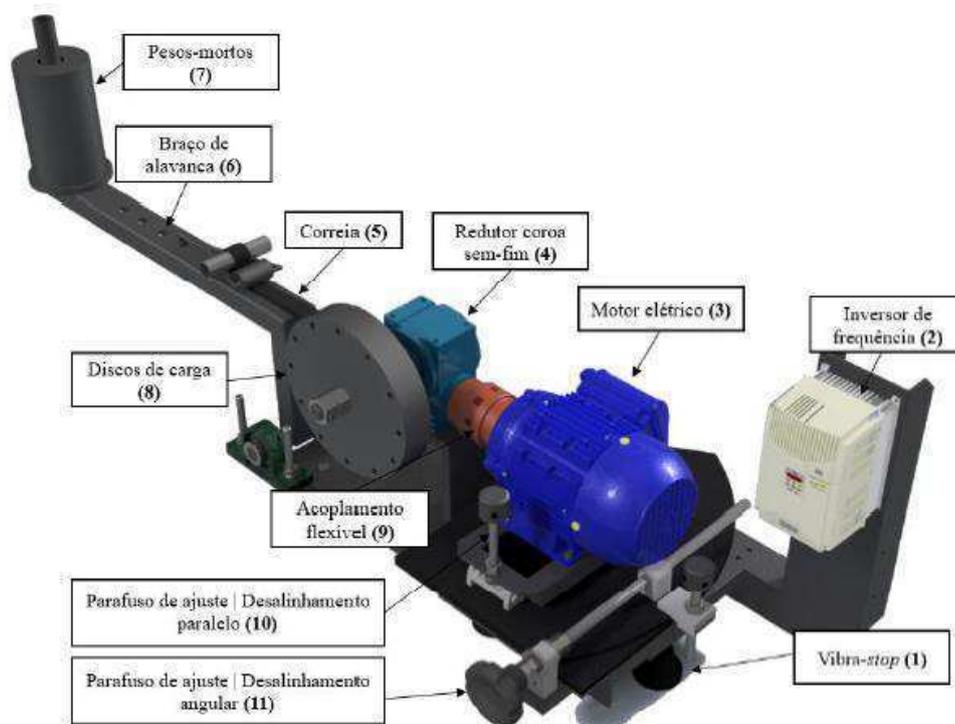
**Figura 34: FASE 2 da pesquisa**



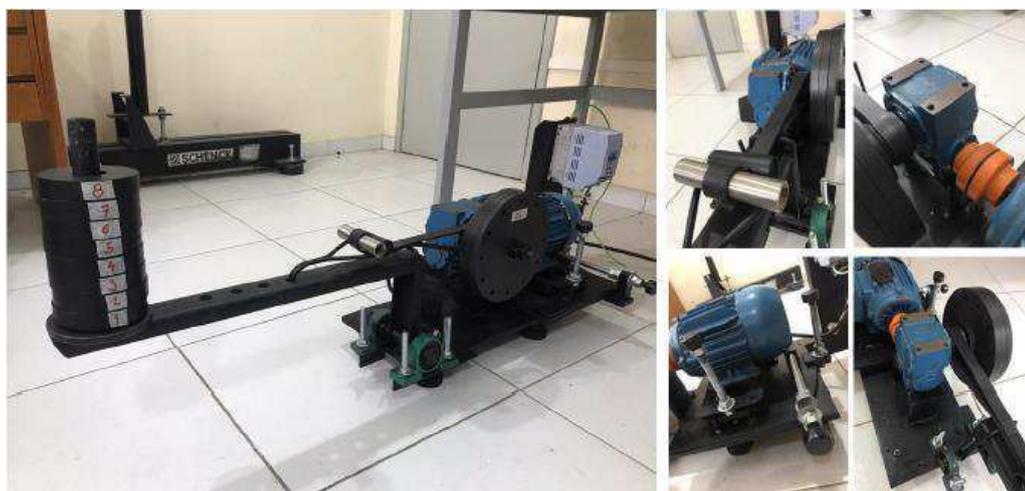
**Fonte: Autoria própria**

Na Figura 34, tem-se a FASE 2, durante esta fase, o desenho da bancada é analisado para realização de ajustes necessários (FASE 2.1), o desenho foi produzido utilizando um *software* de desenho Autodesk Inventor 2017. A seguir, a Figura 35 ilustra a bancada experimental utilizada neste trabalho.

**Figura 35: Perspectiva 3D do projeto da bancada experimental e indicação de seus principais componentes**



(a)



(b)

**Fonte: Adaptado de Oliveira Neto (2019)**

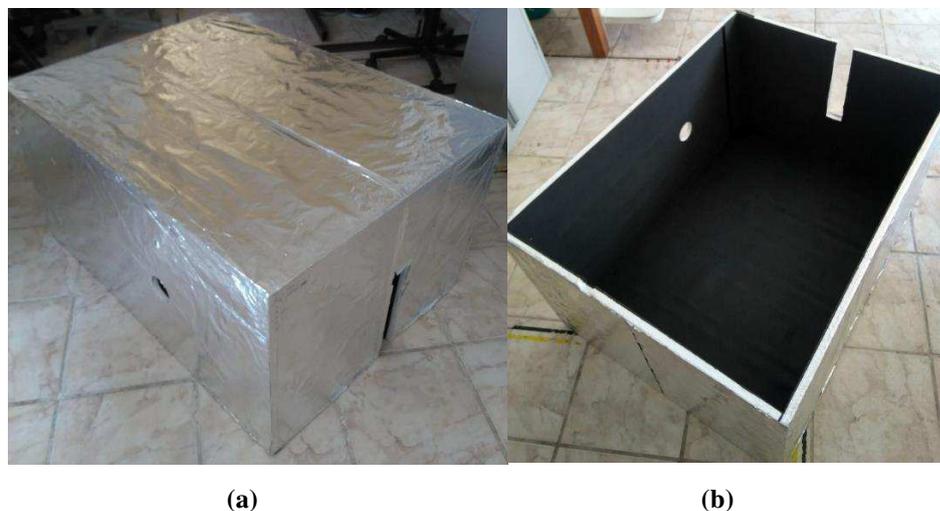
A Figura 35a ilustra o projeto 3D da bancada experimental desenvolvida pelo Engenheiro Mecânico e Mestre em Engenharia Mecânica João Manoel de Oliveira Neto, em 2019, na UFCG, destacando cada componente da bancada com nome e número. No Quadro 4, detalha-se cada componente da bancada. Em 35b, tem-se a bancada experimental construída no laboratório LVI da UFCG vista de vários ângulos.

**Quadro 4: Detalhamento técnico dos itens utilizados na construção da bancada de testes**

Numeração do componente	Descrição
1	Vibra-stops em material elastômero (350 kg de capacidade cada)
2	Inversor de frequência WEG CFW 08
3	Motor elétrico trifásico WEG W22, potência de 0,5 cv
4	Redutor do tipo coroa sem-fim
5	Correia flexível em V modelo 6PK0745
6	Braço de alavanca em aço SAE 1020 com comprimento total de 557 mm
7	Peso morto (arruela industrial, peso unitário ~ 1kg)
8	Discos de carga em aço carbono (peso unitário ~ 3kg)
9	Acoplamento flexível ( $\phi = 70$ mm)
10	Parafuso de ajuste em aço SAE 1020 ( $\phi = 11$ mm)
11	Parafuso de ajuste em aço carbono SAE 1020 ( $\phi = 12,7$ mm)

Fonte: Adaptado de Oliveira Neto (2019)

O Quadro 4 apresenta, com detalhes, cada componente marcado na Figura 36. Durante a FASE 2.2 são analisados os componentes que possivelmente estariam fragilizados na bancada devido a seu uso anterior e compradas peças reposição em caso de qualquer defeito, como o suporte, eixos, engrenagens, parafusos, porcas e etc, assim como, ocorre a pintura do redutor mecânico com tinta preta fosca de emissividade alta, para melhor captação dos termogramas. Na FASE 2.3, a cabine de isolamento é produzida para garantir maior exatidão nos resultados da termografia. Como ilustrado na Figura 36.

**Figura 36: Cabine de isolamento térmica**

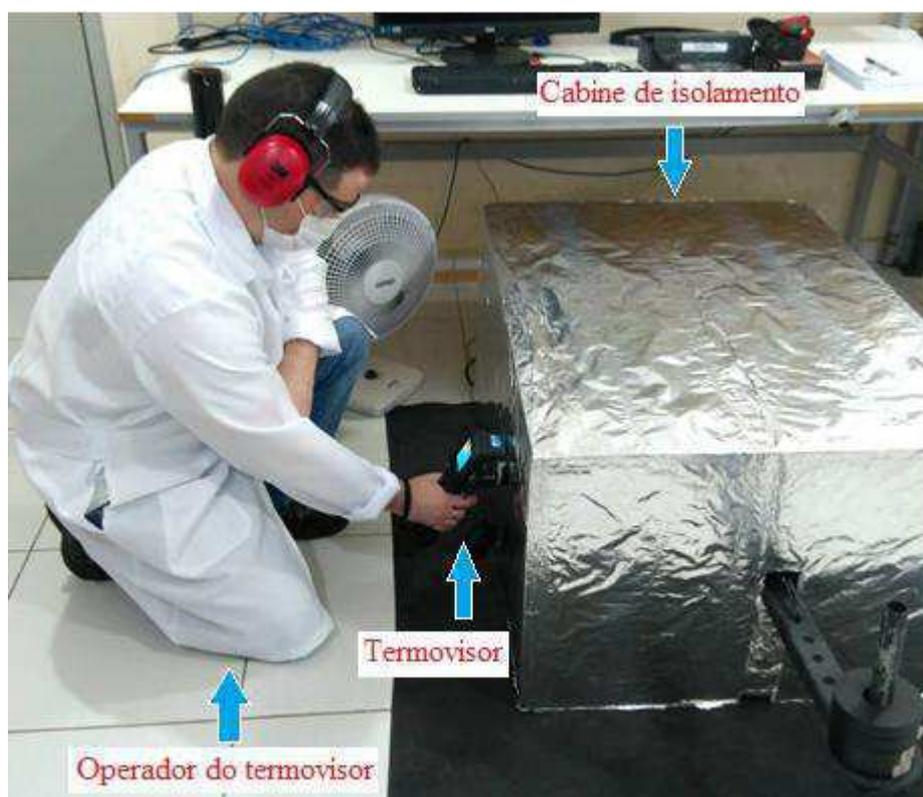
(a)

(b)

Fonte: Autoria própria

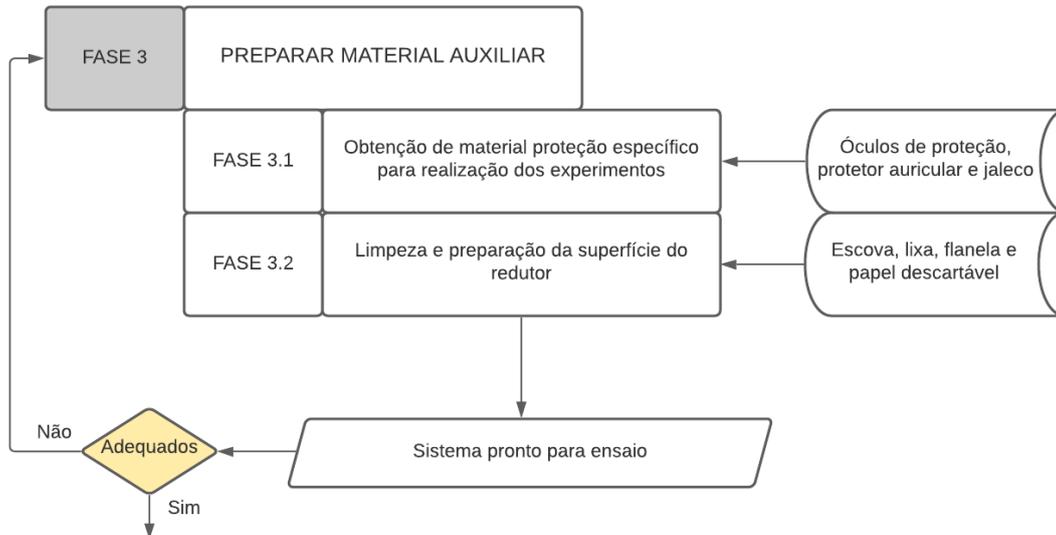
Na Figura 36 tem-se a cabine de isolamento térmico construída em 3 camadas, uma interna de EVA, uma intermediária de Isopor e uma externa de papel alumínio, em 36a, a visão externa da cabine e, em 36b, a visão interna. Por fim, na FASE 2.4, a bancada é monitorada durante funcionamento para comprovação que está em conformidade para uso futuro com a termografia e para garantir a saúde e segurança do pesquisador durante os experimentos. Como ilustrado na Figura 37, a seguir.

**Figura 37: Testes de funcionalidade dos equipamentos para ensaios termográficos**



**Fonte: Autoria própria**

Com a realização dos testes de funcionalidade dos equipamentos, como ilustrado na Figura 37, verificou-se que a bancada estava apta a realização dos ensaios destinados para a pesquisa. Porém, em caso de não conformidade durante os experimentos, repetia-se o processo da FASE 2.2 com substituição de itens defeituosos por itens em estado perfeito. Com esta FASE concluída, dá-se início a FASE 3, como mostrada na Figura 38, a seguir:

**Figura 38: FASE 3 da pesquisa****Fonte: Autoria própria**

Na Figura 38, exibe-se a FASE 3 da pesquisa, que é a preparação do material auxiliar para iniciar os experimentos termográficos. Nesta fase, na ETAPA 3.1, o pesquisador prepara-se com material de segurança e para fins de iniciar os testes térmicos utilizando equipamentos que o ajudem a não transmitir calor e não sofrer com a irradiação de calor, além de preservar sua própria saúde, como ilustrado na Figura 39.

**Figura 39: Equipamento de Proteção Individual utilizado pelo operador do termovisor****Fonte: Autoria própria**

Como ilustrado na Figura 39, utilizou-se, durante todo o desenvolvimento do trabalho, protetor auditivo do tipo concha, luvas de pano com saliência de borracha antiderrapante e jaleco de cor branca. Já, na ETAPA 3.2, a superfície do redutor é limpa durante todo início de experimento para facilitar os registros das emissões de calor, como é apresentada na Figura 40.

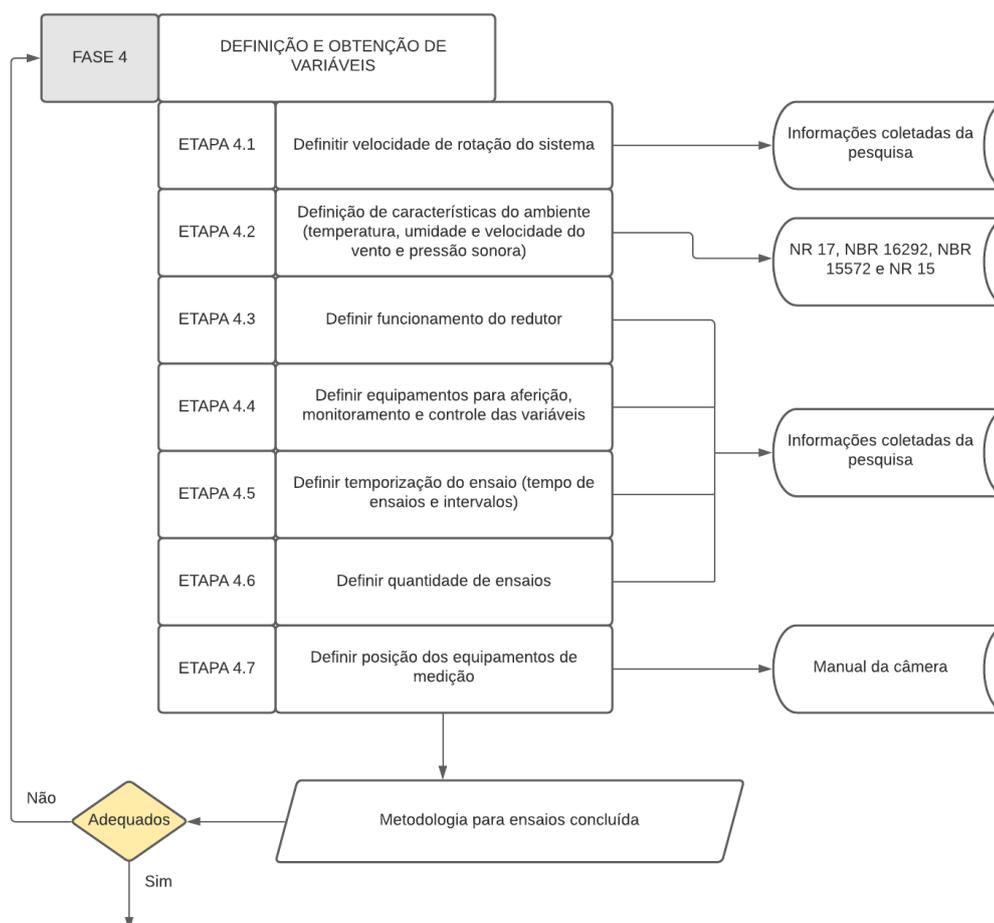
**Figura 40: Limpeza do redutor para execução da termografia**



**Fonte: Autoria própria**

Como ilustrado na Figura 40, utilizou-se escova, flanelas, papel toalha e pá para retirada e recolha de sujeiras e excesso de óleo no redutor para não prejudicar a captação do termovisor. Com a FASE 3 concluída, inicia-se a FASE 4, como ilustrada na Figura 41.

**Figura 41: FASE 4 da pesquisa**



**Fonte: Autoria própria**

Na Figura 41, exibe-se, na FASE 4, as atividades para obtenção de uma metodologia concisa para obtenção dos termogramas. Na ETAPA 4.1 realiza-se a definição da velocidade de rotação oferecida pelo motor, que deve ser estipulada mediante o tipo de redutor de rosca sem fim. Foi definido que para obtenção de melhores resultados com o motor, que apresenta potência de 1 CV e chega até 1900 rpm, utilizou-se uma rotação de 1800 rpm como padrão e 1200 rpm em um único experimento. Para a ETAPA 4.2 propõe-se valores de características do ambiente. Primeiro, estabelece-se um valor para a temperatura ambiente na faixa citada na Norma Regulamentadora nº 17 (NR 17), de 20 a 23°C. Posteriormente, define-se o método de medição da temperatura refletida, estabelecido através da NBR 16292. Neste tipo de ensaio, precisa-se aferir o valor da umidade relativa do ar, Estes valores devem ser bem monitorados como relata a NBR 15572, pois se estiverem acima de 90%, as medições termográficas não devem ocorrer. Para controle destas variáveis utilizou-se os equipamentos ilustrados na Figura 42.

Figura 42: Equipamentos auxiliares para medição de rotações, temperatura e umidade.



(a)



(b)

(c)



(d)

(e)

Fonte: Autoria própria

Como ilustrado na Figura 42, tem-se, em 42a, tem-se câmera térmica FLIR E60, que é responsável pelas medições de temperatura superficial do redutor através dos termogramas. Em 42b, o termômetro Dual laser ICEL para medição da temperatura do redutor antes do início do experimento. Em 42c, o tacômetro Eltron MDT-2238a para medição das rotações de saída do redutor, o termohigrômetro ICEL HT-208 para medição da temperatura e umidade ambientes. Em 42d e o termômetro digital de máxima e mínima AUTOM para medições também da temperatura ambiente e melhor controle desta característica em 42e. Outra característica que se define é a condição limite para o valor de velocidade do vento próximo ao local de medição. A NBR 15572 estabelece que para velocidades de vento maiores que 6 m/s as medições não dispõem de uma boa confiabilidade. Neste caso, por semelhança de experimentos, dentro de um laboratório fechado e com a cabine de isolamento sobre a bancada, a velocidade de vento atinge valores inferiores a 1 m/s, de acordo com Silva Júnior (2017), Cabral (2017), Olinda (2018), Batista (2019) e Oliveira Neto (2019). Por fim, na ETAPA 4.2, consulta-se a Norma Regulamentadora nº15 (NR 15) para medição do nível de ruído, para proteção do pesquisador e para abafar qualquer nível de ruído excessivo, foi utilizado o protetor auditivo tipo concha 3M Muffler (como mostrado Figura 39). Na ETAPA 4.3, define-se as condições de funcionamento do redutor de rosca sem fim, quanto a lubrificação e quanto a carga extra, introduzindo as arruelas industriais, como demonstrado na Figura 43.

**Figura 43: Arruelas industriais utilizadas no trabalho para simulação de carga extra**



**Fonte: Autoria própria**

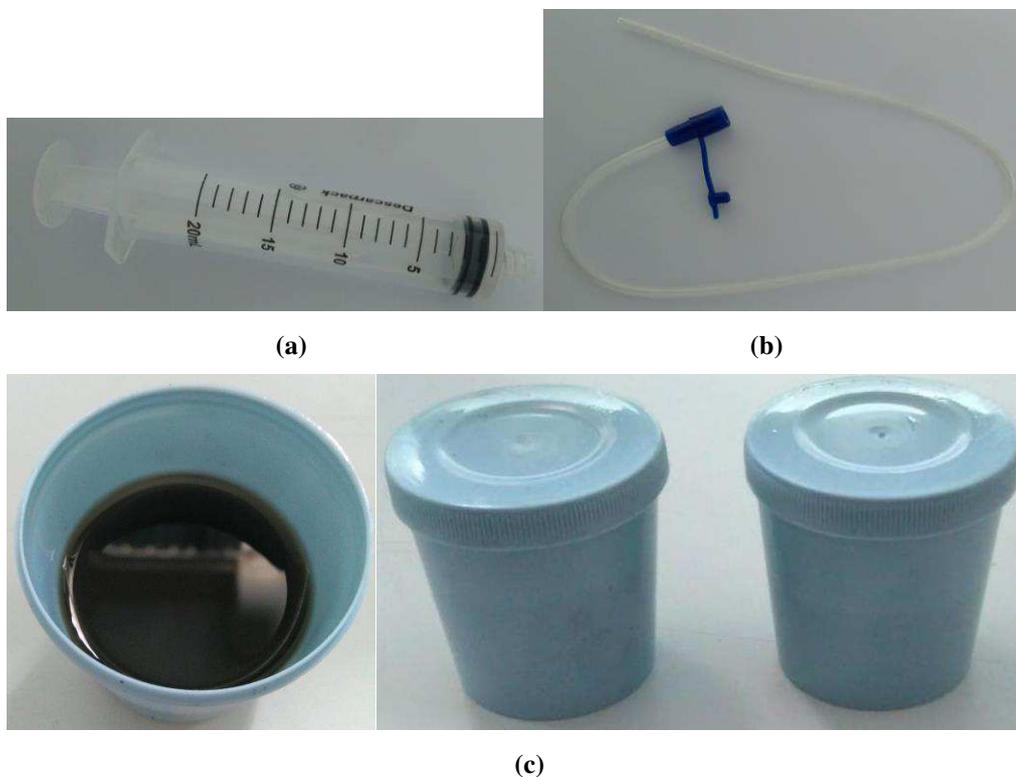
Como ilustrado na Figura 43, as arruelas industriais (ou pesos) foram utilizadas no braço mecânico da bancada para conceber carga extra durante a utilização do sistema

por intermédio do acoplamento dos pesos ao braço, do braço a correia e da correia ao redutor. Os pesos possuem as seguintes massas: arruela 1 - 1080 g; arruela 2 - 1095 g; arruela 3 - 1084 g e arruela 4 - 1084 g. Com isso, ficou definido que os experimentos seriam produzidos para as seguintes condições:

- Sistema sem carga e com 150 ml de lubrificante;
- Sistema sem carga e com 100 ml de lubrificante;
- Sistema sem carga e com 50 ml de lubrificante;
- Sistema com carga e com 150 ml de lubrificante;
- Sistema com carga e com 100 ml de lubrificante;
- Sistema com carga e com 50 ml de lubrificante.

A coleta, armazenamento e reintrodução do óleo lubrificante no redutor mecânico foi estabelecida por meio dos equipamentos mostrados na Figura 44.

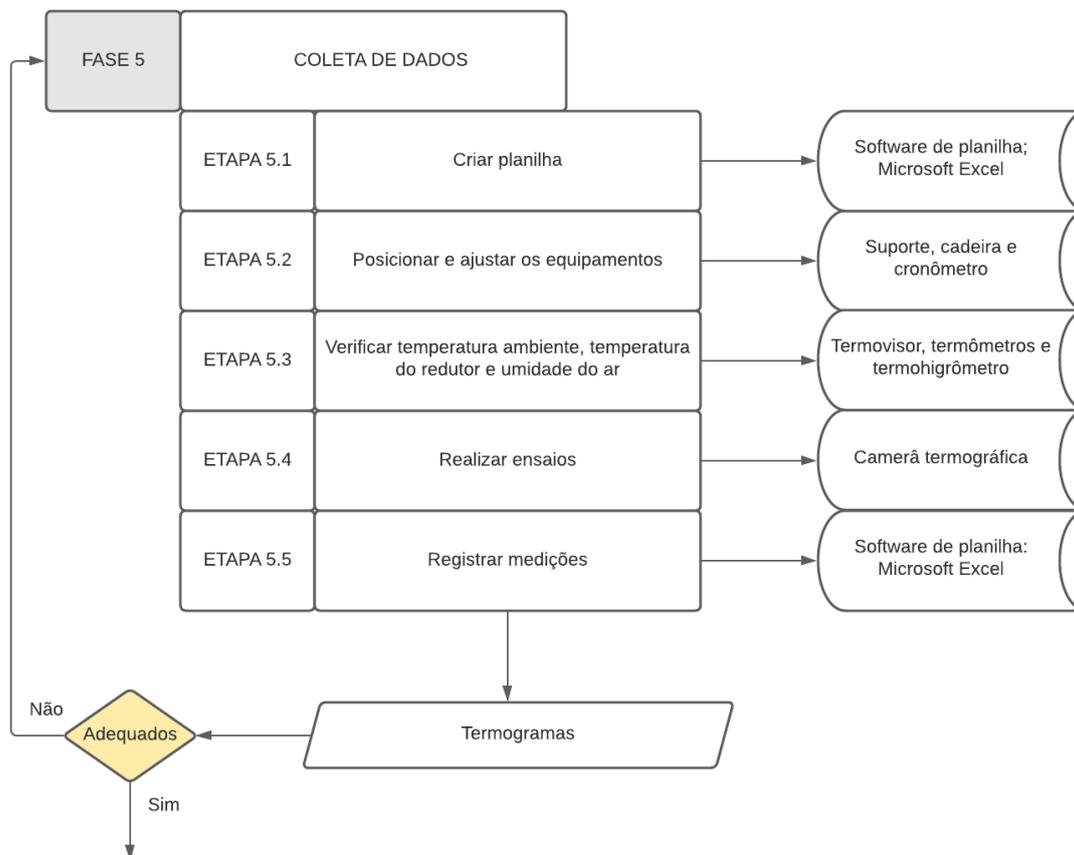
**Figura 44: Equipamentos para coleta e armazenamento do óleo lubrificante do redutor**



Fonte: Autoria própria

Como mostrado na Figura 44, utilizou-se, seringa graduada de 20 ml, 44a, sonda vesical de 10 mm de diâmetro, 44b, e coletores universais de 100 ml, 44c. A utilização destes equipamentos se deu nos intervalos de ensaios, quando necessitava-se de mudança de condição de 150 ml para 100 ml, de 100 ml para 50 ml e de 50 ml para 150 ml. A sonda vesical era introduzida em um dos furos roscados dos parafusos da tampa lateral do redutor e com isso, era retirado o óleo pela diferença de pressão que o êmbolo causava na seringa. Após isso, o óleo era armazenado nos coletores universais até ser utilizado novamente na reintrodução para o redutor.

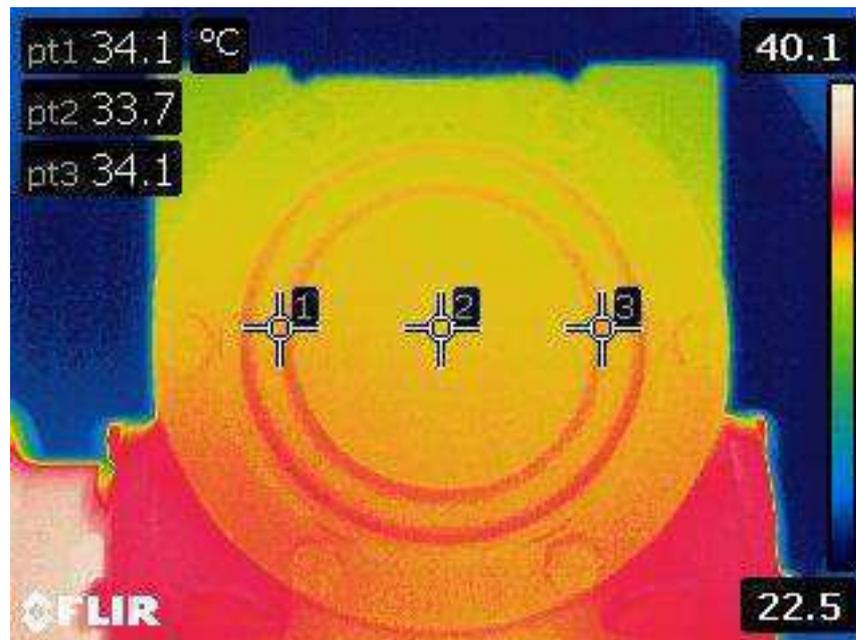
Ainda, na Figura 41, na ETAPA 4.4, define-se a técnica termográfica a ser empregada nesta pesquisa, baseando-se nos ensaios pesquisados durante a FASE 1, os quais foram realizados por termografia ativa ou passiva. Nesta etapa, também seleciona-se os equipamentos a serem utilizados para a aferição, monitoramento e controle das variáveis estabelecidas tomando como referência os utilizados por Silva Júnior (2017), Cabral (2017), Ferreira da Silva (2017), Olinda (2018), Batista (2019) e Oliveira Neto (2019). Para a ETAPA 4.5 segue-se o padrão determinado em Olinda (2018) e Oliveira Neto (2019) devido à similaridade dos trabalhos. Isso inclui os horários nos quais serão realizados os trabalhos, que acontecem nos períodos diurnos, afim de evitar o excesso e umidade durante os períodos noturnos, o tempo de duração de cada ensaio, definido em 50 minutos e o tempo de intervalo entre cada ensaio que teve auxílio de um ventilador residencial para resfriamento do sistema por convecção, garantindo mais ensaios num único dia de trabalho. Na ETAPA 4.6, determina-se uma quantidade de ensaios para cada condição de funcionamento do redutor, que foi definida como seis ensaios para cada condição apresentada anteriormente, sendo um excluído e cinco aproveitados, tomando-se como base os trabalhos de Olinda (2018) e Oliveira Neto (2019). Por último, na ETAPA 4.7, concebe-se as posições dos equipamentos de medição para a aferição das variáveis de interesse na pesquisa, tomando por base distâncias estipuladas no manual da câmera e tentando aproximar ao máximo possível os instrumentos de medição ao conjunto de transmissão. Com estas etapas concluídas, tem-se metodologia para execução dos ensaios concretizada. A seguir, na Figura 45, mostra-se a FASE 5, que é a fase de coleta de dados.

**Figura 45: FASE 5 da pesquisa**

**Fonte: Autoria própria**

Na Figura 45, tem-se a FASE 5 do trabalho que representa a parte de coleta de dados por meio de termogramas. Esta fase se divide em 5 etapas. A ETAPA 5.1 é a criação de uma planilha em software de planilhas, neste caso, o Microsoft Excel, para organização e comparação dos dados. Na ETAPA 5.2, tem-se o ajuste de suporte para a bancada permanecer nivelada, cadeira para o pesquisador se manter firme em posição adequada com a câmera termográfica e cronômetro para controlar os tempos de medição e intervalos. O cronômetro utilizado foi o do celular Motorola Moto G Play e cada marcação entre os termogramas tinha um intervalo de 10 minutos, até um máximo de 50 minutos. Durante a ETAPA 5.3 mede-se temperatura ambiente, temperatura do redutor e umidade do ar de acordo com os métodos adotados na ETAPA 4.2. Para essa medição fez-se uso dos instrumentos: termovisor, termômetros e termohigrômetro. Na ETAPA 5.4, realiza-se os ensaios com a câmera termográfica focada no objeto em estudo (redutor de rosca sem fim). A Figura 46 demonstra um exemplo de termograma do redutor de rosca sem fim estudado.

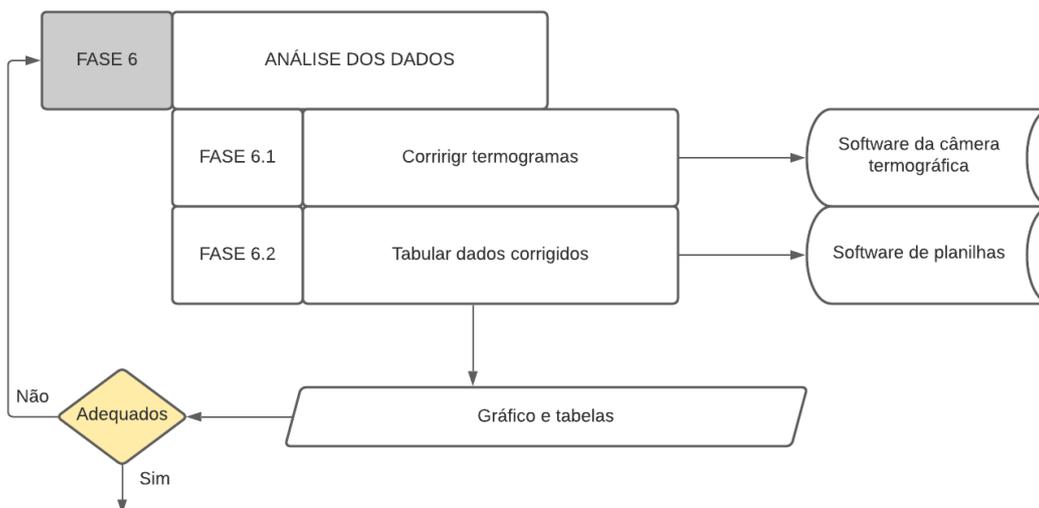
**Figura 46: Exemplo de termograma do redutor mecânico**



**Fonte: Autoria própria**

A Figura 46 mostra um termograma do redutor mecânico de rosca sem fim estudado neste trabalho. Na ETAPA 5.5, registra-se estes dados na planilha desenvolvida na ETAPA 5.1, tais registros levam em consideração a média de temperatura obtida nos três pontos fixados pelo termovisor. Após a produção de seis ensaios completos para cada condição do redutor de rosca sem fim citada anteriormente, eram feitos os ajustes de carga e lubrificante para a próxima condição. Após concluída a FASE 5, obtém-se os termogramas e inicia-se as suas análises na FASE 6, mostrada a seguir na Figura 47.

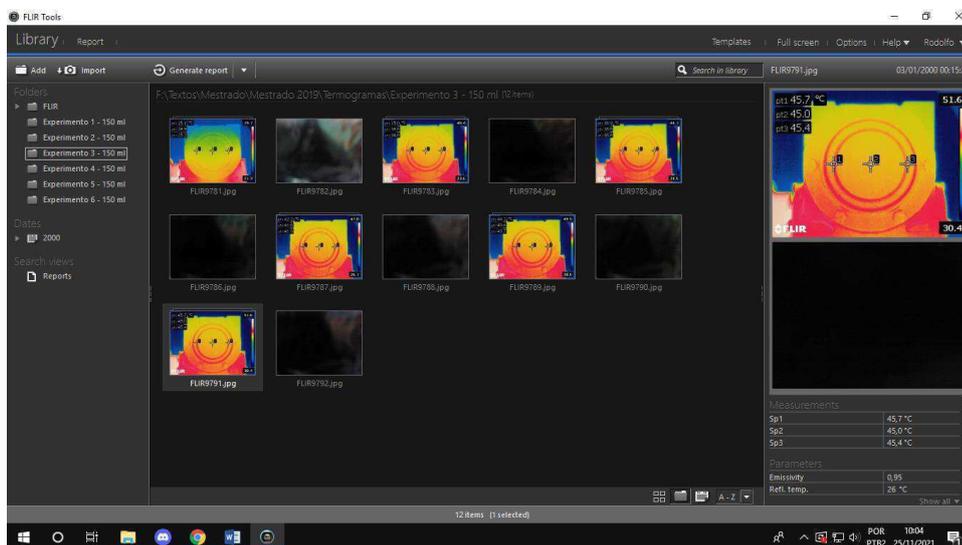
**Figura 47: FASE 6 da pesquisa**



**Fonte: Autoria própria**

Na Figura 47, tem-se a FASE 6. Esta fase aborda a análise dos dados coletados na FASE 5. Na ETAPA 6.1, efetiva-se a correção dos termogramas com o auxílio do *software FLIR tools* (software especializado em termografia), de acordo com os dados e informações obtidas nos ensaios, como mostra a Figura 48, a seguir.

**Figura 48: Software especializado em tratamento de termogramas FLIR tools**



**Fonte: Autoria própria**

A Figura 48 exibe a tela inicial do software FLIT tools durante o tratamento de alguns termogramas. Este programa foi utilizado para pequenas revisões nas imagens, afim de melhorar a qualidade dos resultados.

Na ETAPA 6.2, tabula-se os dados corrigidos, e como resultado desta FASE, gera-se tabelas e gráficos com os valores de temperatura do redutor, a partir do *software* Excel (software especializado em planilhas).

Por fim, na FASE 7, tem-se a redação do trabalho científico de acordo com os resultados obtidos em todas as fases anteriores a essa com os objetivos de produção científica, futura apresentação da pesquisa como rege o sistema do Programa de Pós Graduação de Engenharia Mecânica - PPGEM da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG e obtenção do título de mestre.

## CAPÍTULO VII

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos pela ETAPA 6.2 proposta no capítulo IV para discussões acerca dos fenômenos que ocorreram no objeto estudado.

### 7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Efetivadas as correções dos termogramas no software *FLIR tools*, foram obtidos os valores de temperaturas para cada experimento e as médias em cada uma das seis situações, que variam de acordo com a carga (possuindo ou não os 4 pesos de 1 kg acoplado ao redutor) e o lubrificante (150 ml, 100 ml e 50 ml). Quantificou-se a umidade relativa do ar, a temperatura do ambiente e a temperatura do redutor no início e no final do experimento a fim de manter os ensaios padronizados e seguir as normas sobre termografia. Cada condição é apresentada por intermédio de três quadros e um gráfico expondo os resultados obtidos.

Ao todo, foram produzidos 39 ensaios, sendo, destes, seis experimentos para cada condição, totalizando 36 experimentos, os quais eram escolhidos 5 ensaios e descartado o que exibisse a pior coleta de dados ou coleta de dados defeituosa. Um ensaio teste (o experimento 7) foi produzido para compreensão do método termográfico com as seguintes condições: redutor sem carga, 150 ml de lubrificante e 1200 rpm no eixo de entrada do redutor, advindo do motor. Todos os demais ensaios foram produzidos com rotações de 1800 rpm de entrada no eixo do redutor. Por fim, mais 2 ensaios (os experimentos 38 e 39), os quais foram produzidos, respectivamente com as condições de redutor sem carga e com 150 ml de lubrificante e redutor com carga e com 150 ml de lubrificante para obtenção das equações de aquecimento do redutor. A diferença nestes últimos dois experimentos aconteceu por intermédio de possuírem 11 termogramas, ou seja, um termograma a cada intervalo de 5 minutos. Todos os demais experimentos possuem 6 termogramas, sendo produzidos a cada intervalo de 10 minutos.

Na primeira condição, redutor sem carga e com 150 ml de lubrificante, constatou-se a temperatura média inicial do redutor de 21°C para o termômetro Dual Laser (devido ao controle de temperatura ambiente com climatização artificial). Após isso, o sistema é ligado e as medições do termovisor começam sempre após 30 segundos de funcionamento do sistema. A seguir, nos Quadro 5, Quadro 6, Quadro 7 e na Figura 49 tem-se os resultados dos experimentos nesta condição.

Quadro 5: Temperaturas obtidas pela termografia no redutor sem carga e com 150 ml de lubrificante

		Tempo (min)					
		0	10	20	30	40	50
Ensaio Termográfico (°C)	Experimento 38 (equação)	24,3	34,5	38,6	41,8	43,8	45,4
	Experimento 1	24,5	35,6	40,2	43,3	44,7	46,3
	Experimento 3	25,0	34,8	38,7	41,9	43,7	45,3
	Experimento 4	24,6	34,2	38,9	42,0	43,8	45,4
	Experimento 5	24,2	34,9	39,3	42,3	44,2	46,2
	Experimento 6	23,6	33,9	38,2	41,2	43,5	45,0
	Média	24,4	34,7	39,0	42,1	44,0	45,6

Fonte: Autoria própria

Quadro 6: Dados do ambiente para termografia no redutor sem carga e com 150 ml de lubrificante

Dados do ambiente				
Ensaio	Temperatura Ambiente Inicial (termômetro digital) °C	Temperatura Ambiente Final (termômetro digital) °C	Temperatura Ambiente Inicial (termohigrômetro) °C	Temperatura Ambiente Final (termohigrômetro) °C
Experimento 38 (equação)	22,9	23,0	23,5	23,5
Experimento 1	22,5	22,8	23,4	23,5
Experimento 3	22,3	22,7	23,5	23,6
Experimento 4	23,0	22,4	23,4	23,1
Experimento 5	23,4	22,1	23,5	23,0
Experimento 6	21,9	22,1	23,0	22,5
Média	22,7	22,5	23,4	23,2

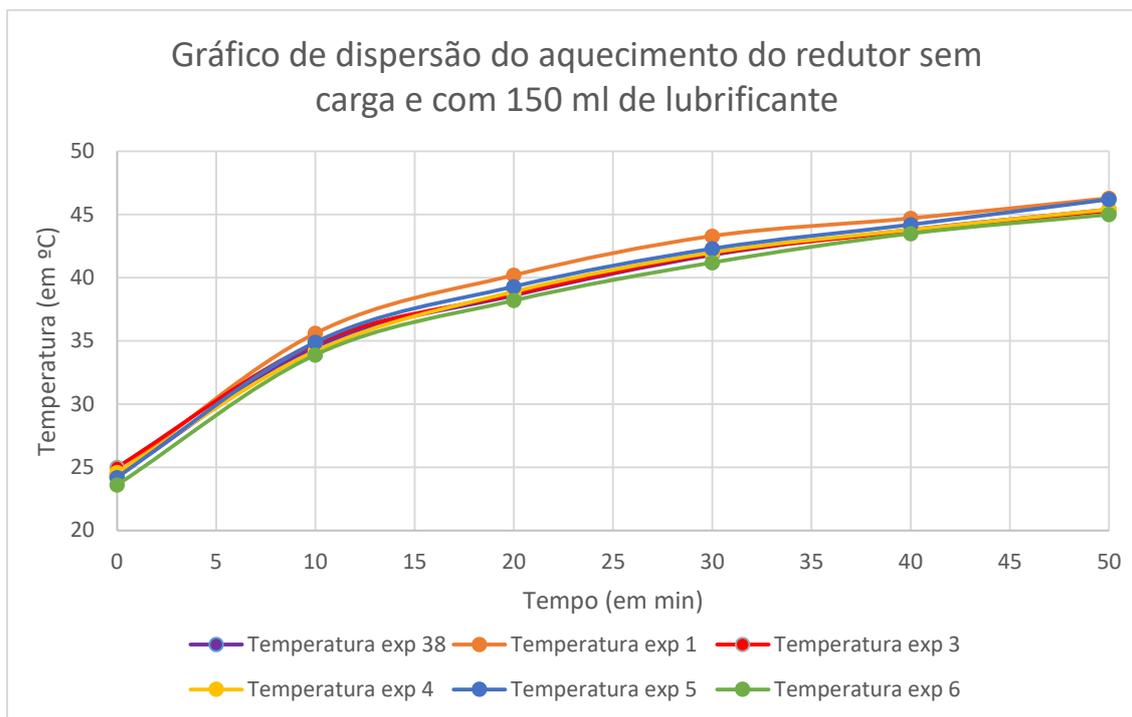
Fonte: Autoria própria

Quadro 7: Dados adicionais para termografia no redutor sem carga e com 150 ml de lubrificante

Dados adicionais				
Ensaio	Umidade Inicial (%)	Umidade Final (%)	Temperatura Redutor Inicial. (Termômetro Dual Laser) °C	Temperatura Redutor Final (Termômetro Dual Laser) °C
Experimento 38 (equação)	45	45	22,0	41,5
Experimento 1	38	45	21,0	41,0
Experimento 3	39	41	20,5	41,4
Experimento 4	61	44	20,0	42,6
Experimento 5	58	39	22,0	41,6
Experimento 6	53	61	21,0	41,0
Média	49,0	45,8	21,1	41,5

Fonte: Autoria própria

**Figura 49: Gráfico de dispersão do aquecimento do redutor sem carga e com 150 ml de lubrificante**



**Fonte: Autoria própria**

De acordo com os Quadro 5, Quadro 6 e Quadro 7, percebe-se que o aquecimento inicial (nos primeiros 10 minutos) é o maior durante todo o processo, com a temperatura média saindo de um valor de 24,4°C em média e chegando até uma média de 34,7°C, um acréscimo de 10,3°C que não ocorre nos outros intervalos. Outra constatação é que, a partir do minuto 30, o aumento de temperatura é pequeno se comparado aos demais intervalos, chegando a estabilizar após os 50 minutos de funcionamento do sistema. Portanto, não há necessidade de se prolongar mais os testes em relação à duração de tempo. O experimento 2 foi o excluído dentre os seis produzidos nesta condição.

Um dado extra a se notar nos quadros apresentados é que, em todos os quadros sem peso extra, são visualizados também, os dados e a curva do experimento 38, o qual é responsável pela equação de aquecimento do redutor que será mostrada ainda neste capítulo. Para as condições com carga extra, o experimento 39 será utilizado da mesma forma, para efeito de comparação, já que esse experimento é utilizado para conceber a equação de aquecimento do redutor com a carga extra de 4 kg.

A temperatura ambiente, regulada por aparelho ar condicionado, estava sempre sendo aferida para permanecer na faixa entre 21°C a 23°C, sendo revisada com dois aparelhos durante todos os intervalos de medição, um termômetro digital e um

termohigrômetro. Estas temperaturas foram determinadas pela utilização da NR 17, que considera faixa de conforto térmico ideal para trabalho entre 20°C e 23°C. O Quadro 6 mostra que as temperaturas ambiente, para os experimentos com a condição de redutor sem carga extra e com 150 ml de lubrificante, apresentaram valores, em média, de 22,7°C e 23,4°C iniciais e valores, em média, de 22,5°C e 23,2°C de temperatura finais, o que atende à norma regulamentadora.

O termohigrômetro também afere a umidade do ar para controle durante o tempo decorrido dos experimentos. O intervalo de umidade relativa do ar para realização dos ensaios foi determinada com os valores entre 40% a 60% para todos os experimentos em todas as condições. Esta definição atende a NBR 15572, que determina que a umidade deve estar abaixo de 90% para não interferir nos resultados. O Quadro 7 mostra que a umidade média inicial foi aferida com valor de 49,0% e a umidade média final de 45,8%, mostrando o controle rígido para o intervalo determinado.

Ainda no Quadro 7, exibe-se os valores de temperatura para o redutor durante o início e término de cada experimento medidos com um termômetro laser na superfície superior do redutor. Nota-se uma média de temperatura inicial de 21,1°C, o que condiz com a condição da temperatura ambiente inicial, mostrando que o sistema permanecia estável com a temperatura do ambiente durante o início de cada experimento. Dado esse muito relevante, pois foram necessários intervalos dentre duas a três horas de espera para resfriamento e nova estabilidade térmica do sistema para reinício de outro ensaio. Para média de temperatura final, o valor foi de 41,5°C, o que condiz com as temperaturas obtidas pelo termovisor. A temperatura geralmente está mais baixa que a máxima obtida pelo termovisor, pois, para aferição dessa temperatura final com o termômetro laser, era necessária a retirada da cabine de isolamento. Logo, o redutor trocava calor com o restante da sala onde os experimentos eram produzidos.

Já, pelo gráfico de dispersão da Figura 49, nota-se que o aquecimento do redutor sem carga e com total lubrificação (150 ml) segue um padrão iniciando numa média de 25°C e terminando numa média de 45°C, com desvios de até o máximo de 2°C (caso do experimento 1), o que representa 5% de desvio máximo da temperatura média.

A seguir, são mostrados os Quadro 8, Quadro 9, Quadro 10 e Figura 50 com os resultados da condição sem carga e com 100 ml de lubrificante.

Quadro 8: Temperaturas obtidas pela termografia no redutor sem carga e com 100 ml de lubrificante

Ensaio Termográfico (°C)	Ensaio	Tempo (min)					
		0	10	20	30	40	50
	Experimento 38 (equação)	24,3	34,5	38,6	41,8	43,8	45,4
	Experimento 8	23,4	33,1	38,2	41,0	43,2	44,8
	Experimento 10	23,9	33,5	37,9	40,5	42,7	44,2
	Experimento 11	24,3	33,0	38,4	40,5	42,8	44,9
	Experimento 12	24,9	33,8	38,2	41,0	43,4	44,5
	Experimento 13	23,6	33,1	37,8	40,5	42,9	44,6
	Média	24,1	33,5	38,2	40,9	43,1	44,7

Fonte: Autoria própria

Quadro 9: Dados do ambiente para termografia no redutor sem carga e com 100 ml de lubrificante

Ensaio	Dados do ambiente			
	Temperatura Ambiente Inicial (termômetro digital) °C	Temperatura Ambiente Final (termômetro digital) °C	Temperatura Ambiente Inicial (termohigrômetro) °C	Temperatura Ambiente Final (termohigrômetro) °C
Experimento 38 (equação)	22,9	23,0	23,5	23,5
Experimento 8	22,8	22,3	23,0	23,0
Experimento 10	22,1	22,9	23,1	23,5
Experimento 11	22,4	21,9	23,4	22,8
Experimento 12	23,1	22,8	23,3	23,5
Experimento 13	22,0	21,9	23,1	22,5
Média	22,6	22,5	23,2	23,1

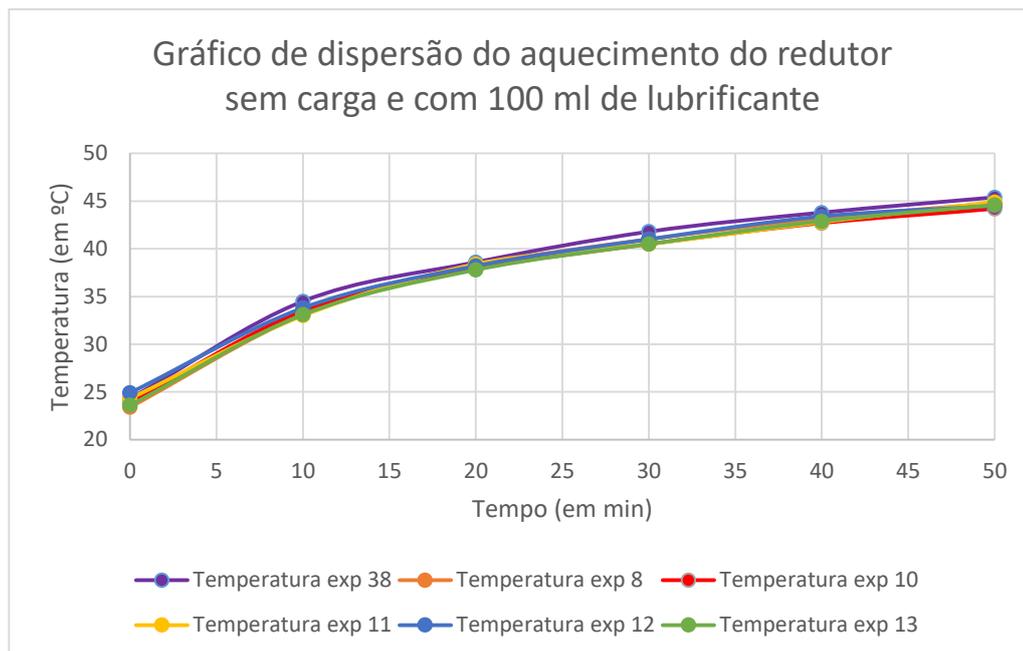
Fonte: Autoria própria

Quadro 10: Dados adicionais para termografia no redutor sem carga e com 100 ml de lubrificante

Ensaio	Dados adicionais			
	Umidade Inicial (%)	Umidade Final (%)	Temperatura Redutor Inicial (Termômetro Dual Laser) °C	Temperatura Redutor Final (Termômetro Dual Laser) °C
Experimento 38 (equação)	45	45	22,0	41,5
Experimento 8	41	52	21,5	42,7
Experimento 10	44	60	20,4	40,7
Experimento 11	46	41	22,5	40,5
Experimento 12	47	48	22,6	41,2
Experimento 13	44	44	21,0	40,2
Média	44,5	48,3	21,7	41,1

Fonte: Autoria própria

**Figura 50: Gráfico de dispersão do aquecimento do redutor sem carga e com 100 ml de lubrificante**



**Fonte: Autoria própria**

Os quadros 8, 9 e 10 exibem os dados obtidos para os experimentos na condição sem carga extra e com lubrificação de 100 ml. Com isso, pode-se começar a análise do uso da termografia em conjunto com a ciência Termotribologia. A termotribologia nos informa que quanto menor for o filme de lubrificante para amenizar o atrito entre as peças (neste caso, uma engrenagem de rosca sem fim e uma engrenagem de dentes helicoidais), maior será o calor produzido pelo atrito entre as mesmas. Porém, os dados apresentados no Quadro 8 mostram que o redutor mecânico continua com a média de temperatura semelhante aos experimentos do Quadro 5, variando de uma média inicial de 24,1 °C até a temperatura média final de 44,7°C, o que significa uma diferença de 2% para menos se comparada com a temperatura máxima média dos experimentos com 150 ml de lubrificante. Os Quadro 9 e Quadro 10 apresentam características semelhantes aos Quadro 6 e Quadro 7, respectivamente. Incluindo a temperatura média final do redutor medida com o termômetro laser (41,5°C na condição com 150 ml e 41,1°C na condição com 100 ml). O experimento excluído dessa vez foi o experimento 9.

As curvas de aquecimento destes experimentos estão apresentadas na Figura 50 e são semelhantes à curva do experimento 38, mesmo com condição de lubrificação diferente. A seguir, são exibidos o Quadro 11, o Quadro 12, o Quadro 13 e a Figura 51 dos experimentos com a condição sem peso extra e com 50 ml de lubrificante.

Quadro 11: Temperaturas obtidas pela termografia no redutor sem carga e com 50 ml de lubrificante

Ensaio Termográfico (°C)	Ensaio	Tempo (min)					
		0	10	20	30	40	50
	Experimento 38 (equação)	24,3	34,5	38,6	41,8	43,8	45,4
	Experimento 14	23,6	32,9	37,4	40,2	42,3	44,2
	Experimento 15	25,0	34,0	38,0	40,3	42,7	44,6
	Experimento 17	25,1	33,6	38,0	41,0	42,8	44,4
	Experimento 18	25,1	33,6	38,1	40,9	43,0	45,1
	Experimento 19	24,8	33,6	37,8	40,5	42,7	44,2
	Média	24,7	33,7	38,0	40,8	42,9	44,7

Fonte: Autoria própria

Quadro 12: Dados do ambiente para termografia no redutor sem carga e com 50 ml de lubrificante

Ensaio	Dados do ambiente			
	Temperatura Ambiente Inicial (termômetro digital) °C	Temperatura Ambiente Final (termômetro digital) °C	Temperatura Ambiente Inicial (termohigrômetro) °C	Temperatura Ambiente Final (termohigrômetro) °C
Experimento 38 (equação)	22,9	23,0	23,5	23,5
Experimento 14	22,1	22,9	23,5	23,9
Experimento 15	22,8	22,4	23,1	22,8
Experimento 17	23,0	22,3	23,3	23,3
Experimento 18	22,4	22,5	23,3	22,9
Experimento 19	23,2	23,2	23,4	23,8
Média	22,7	22,7	23,4	23,4

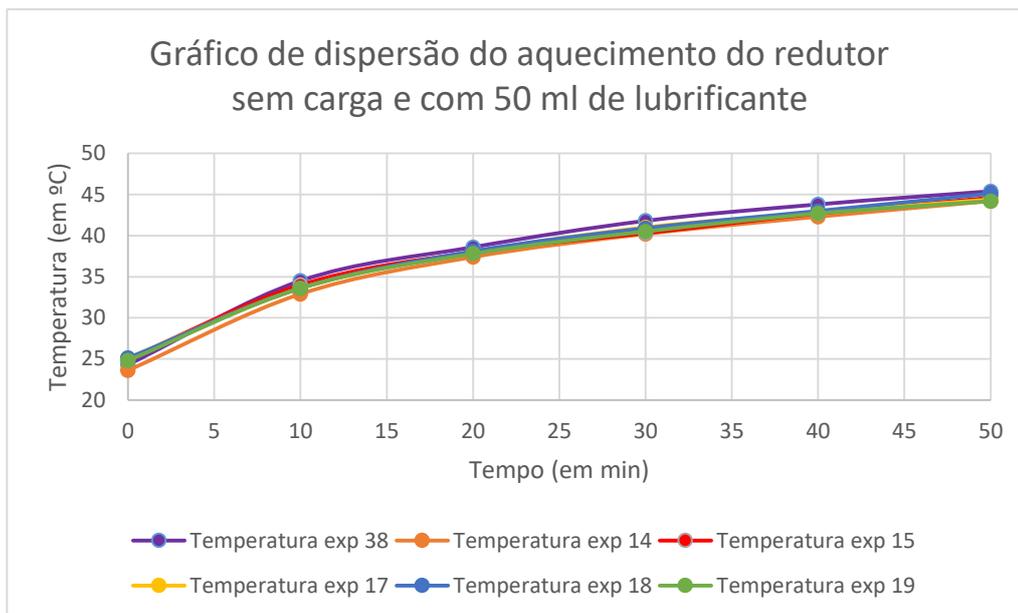
Fonte: Autoria própria

Quadro 13: Dados adicionais para termografia no redutor sem carga e com 50 ml de lubrificante

Ensaio	Dados adicionais			
	Umidade Inicial (%)	Umidade Final (%)	Temperatura Redutor Inicial. (Termômetro Dual Laser) °C	Temperatura Redutor Final (Termômetro Dual Laser) °C
Experimento 38 (equação)	45	45	22,0	41,5
Experimento 14	40	46	21,5	40,7
Experimento 15	50	54	21,6	40,5
Experimento 17	47	39	22,3	40,7
Experimento 18	44	54	21,9	42,5
Experimento 19	53	54	22,6	40,5
Média	46,5	48,7	22,0	41,1

Fonte: Autoria própria

**Figura 51: Gráfico de dispersão do aquecimento do redutor sem carga e com 50 ml de lubrificante**



**Fonte: Autoria própria**

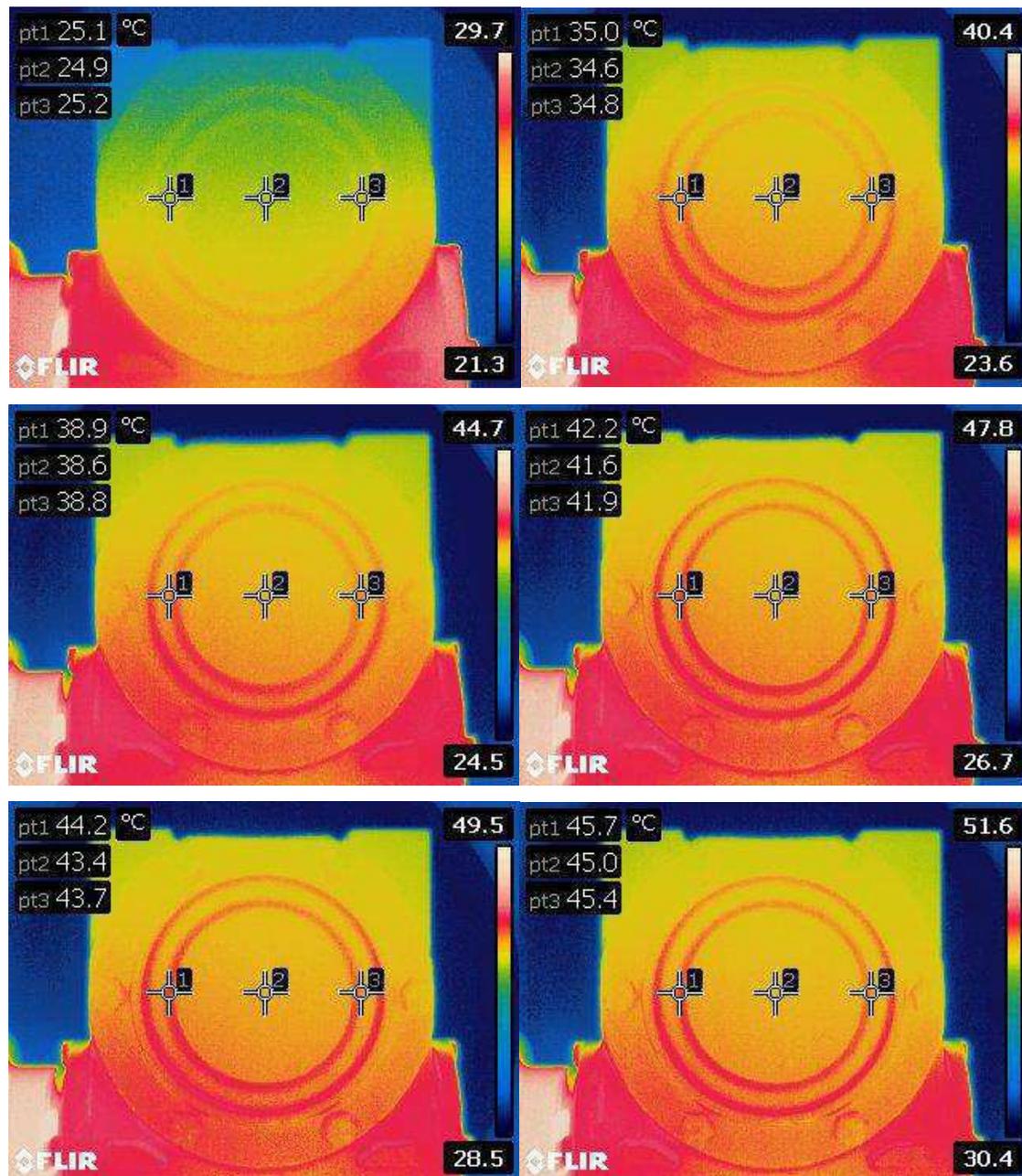
De acordo com os resultados apresentados no Quadro 11, o aquecimento do redutor sem carga e com 50 ml de lubrificante apresenta valores idênticos ao da condição sem carga e com 100 ml, provando que a quantidade de lubrificante não interfere na percepção de temperatura superficial do redutor na condição sem carga. A média de temperatura inicial obtida (ao 0 minuto) é muito próxima, sendo o valor do Quadro 11 de 24,7°C e o valor do Quadro 8 de 24,1°C, mostrando que o sistema está sendo ensaiado com as condições padrões, enquanto que a média de temperatura final obtida (aos 50 minutos) nos dois quadros é igual. Outro dado que prova esta hipótese é o valor obtido de temperatura média do redutor ao final do experimento com o termômetro laser. Nos dois casos, a média foi de 41,1°C, variando entre no máximo 40,2°C e 42,7°C.

Sobre as informações exibidas nos quadros 12 e 13, mantém-se o padrão dos experimentos anteriores com mais exatidão devido à experiência adquirida nos ensaios anteriores. O experimento 16 foi o excluído nesta condição.

Na Figura 51, percebe-se que a equação obtida no experimento 38 tem uma leve tendência para valores mais altos, em média 1°C, o que representa aproximadamente 2,5% de diferença com o valor médio e com os demais valores dos outros experimentos.

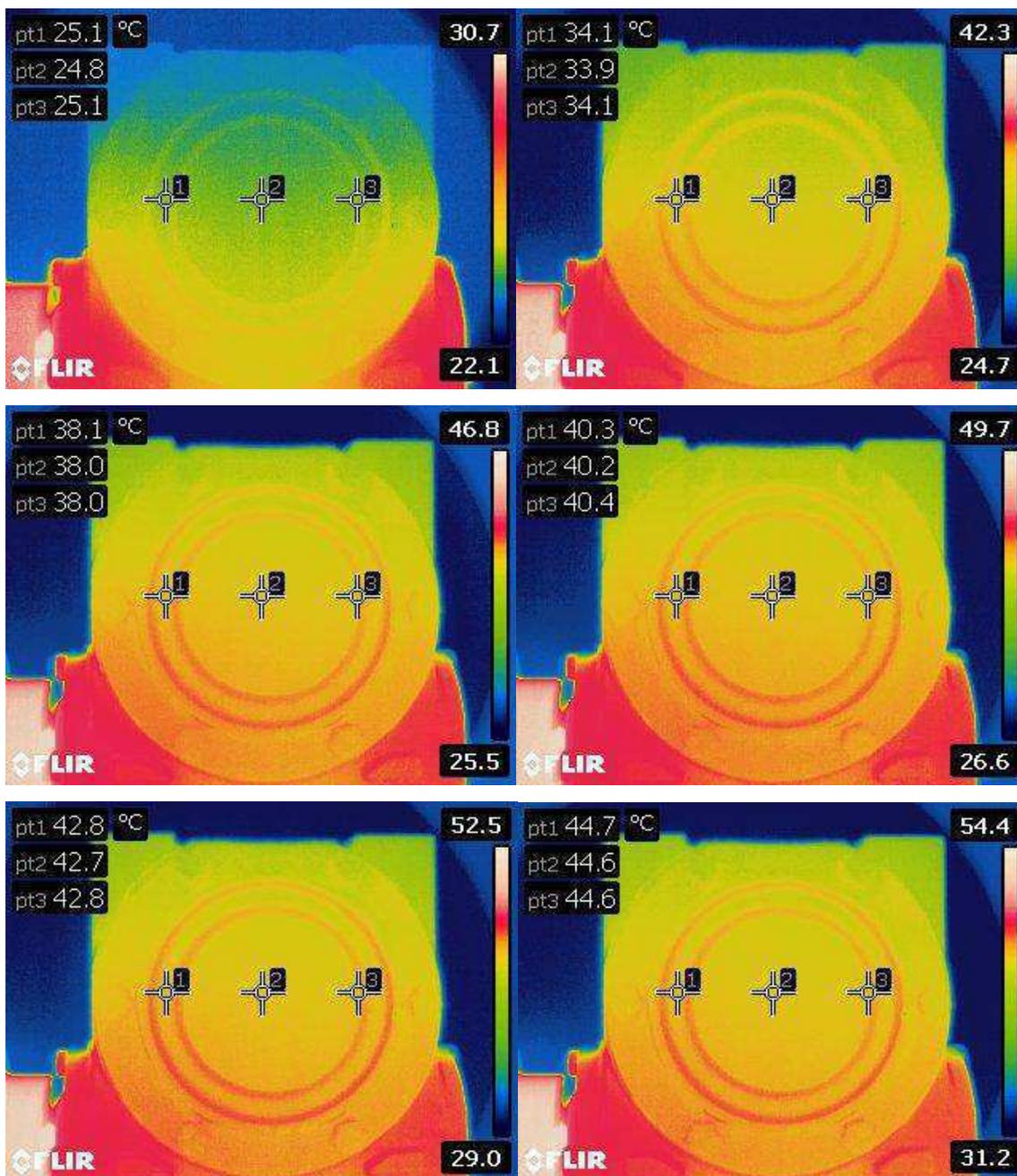
A seguir, nas figuras 52 e 53, são apresentados alguns termogramas das condições sem carga com 150 ml e 50 ml de lubrificante para análise do fenômeno de aquecimento.

**Figura 52: Termogramas do experimento 3 (sem carga e com 150 ml) ao longo dos 50 minutos**



Fonte: Autoria própria

**Figura 53: Termogramas do experimento 15 (sem carga e com 50 ml) ao longo dos 50 minutos**



Fonte: Autoria própria

Nas figuras 52 e 53, são apresentados os termogramas dos experimentos 3 e 15, respectivamente, ao longo de um período de 50 minutos. O experimento 3 foi realizado na condição sem carga e com 150 ml, enquanto o experimento 15 foi produzido na condição sem carga e com 50 ml. Notou-se que, conforme a lubrificação ia sendo diminuída, a temperatura do redutor não aumentava em relação ao aumento de atrito gerado como esperado pelos estudos feitos em Mobley (2002) e Sinatora (2005) acerca da tribologia.

Ao invés do aumento de temperatura esperado, observou-se uma diminuição de temperatura média da ordem de 2°C, o que representou, aproximadamente, 5% da temperatura média. Pela termotribologia, de acordo com Bogdanovich e Tkachuk (2009), entende-se que o lubrificante, no ato de diminuir o atrito entre a engrenagem helicoidal e a rosca sem fim, reduz a temperatura do sistema. Porém, neste estudo, ao retirar parcialmente o lubrificante, ocorreu um efeito inverso, a temperatura do sistema diminuiu, ao invés de aumentar. Acredita-se que tal efeito ocorreu pela hipótese de o lubrificante acumular uma quantidade de calor e repassar para a estrutura externa do redutor. Em outras palavras, com a retirada do lubrificante, o calor provavelmente se acumulou nas engrenagens, não sendo repassado para a estrutura externa, o que dificultou a percepção da condição térmica do redutor pela termografia, que é uma medição de temperatura superficial do corpo, como afirma Caramalho (2012).

O uso excessivo do redutor com tais condições de lubrificação deficiente pode gerar danos irreparáveis para o sistema de engrenagens, como dito por Nezamabadi, Soury e Houshmand (2014). Por este motivo e pela dificuldade na retirada do lubrificante de dentro do redutor, não foi possível realizar experimentos sem lubrificante.

Para compreender melhor esse fenômeno de aquecimento no redutor, foram efetuados novos experimentos, porém com uma carga extra no sistema equivalente a 4 kg. Esta ideia foi possível de acordo com a análise de Karabacak, Ozmen e Gumusel (2020), os quais mostraram que um sistema com carga maior na saída do redutor tende a aquecê-lo mais e demonstrar maiores diferenças de temperatura nos termogramas, de acordo com a anomalia que o redutor possui. Com estes experimentos, será realizada a mesma discussão para análise do aquecimento do redutor de rosca sem fim.

A partir de agora, acompanha-se os ensaios com a introdução da carga de 4 kg no sistema, iniciando pelos quadros 14, 15 e 16 e a Figura 52, que exibem os dados dos ensaios com carga e 150 ml de lubrificante.

Quadro 14: Temperaturas obtidas pela termografia no redutor com carga e com 150 ml de lubrificante

Ensaio Termográfico (°C)	Ensaio	Tempo (min)					
		0	10	20	30	40	50
	Experimento 39 (equação)	24,3	38,6	46,4	52,0	55,7	58,9
	Experimento 20	25,8	39,2	47,3	52,3	55,5	58,6
	Experimento 21	25,0	40,1	47,2	52,0	55,5	58,0
	Experimento 23	24,5	39,3	46,9	52,1	55,7	58,4
	Experimento 24	24,4	39,7	48,0	53,4	57,0	59,8
	Experimento 25	25,2	39,9	47,1	51,9	55,9	58,6
	Média	24,9	39,5	47,2	52,3	55,9	58,7

Fonte: Autoria própria

Quadro 15: Dados do ambiente para termografia no redutor com carga e com 150 ml de lubrificante

Ensaio	Dados do ambiente			
	Temperatura Ambiente Inicial (termômetro digital) °C	Temperatura Ambiente Final (termômetro digital) °C	Temperatura Ambiente Inicial (termohigrômetro) °C	Temperatura Ambiente Final (termohigrômetro) °C
Experimento 39 (equação)	23,0	23,5	23,5	23,5
Experimento 20	22,5	22,3	23,1	22,9
Experimento 21	22,3	22,5	23,1	23,3
Experimento 23	22,2	22,9	23,1	23,4
Experimento 24	23,0	23,3	23,3	23,6
Experimento 25	21,8	22,8	23,4	23,1
Média	22,5	22,9	23,3	23,3

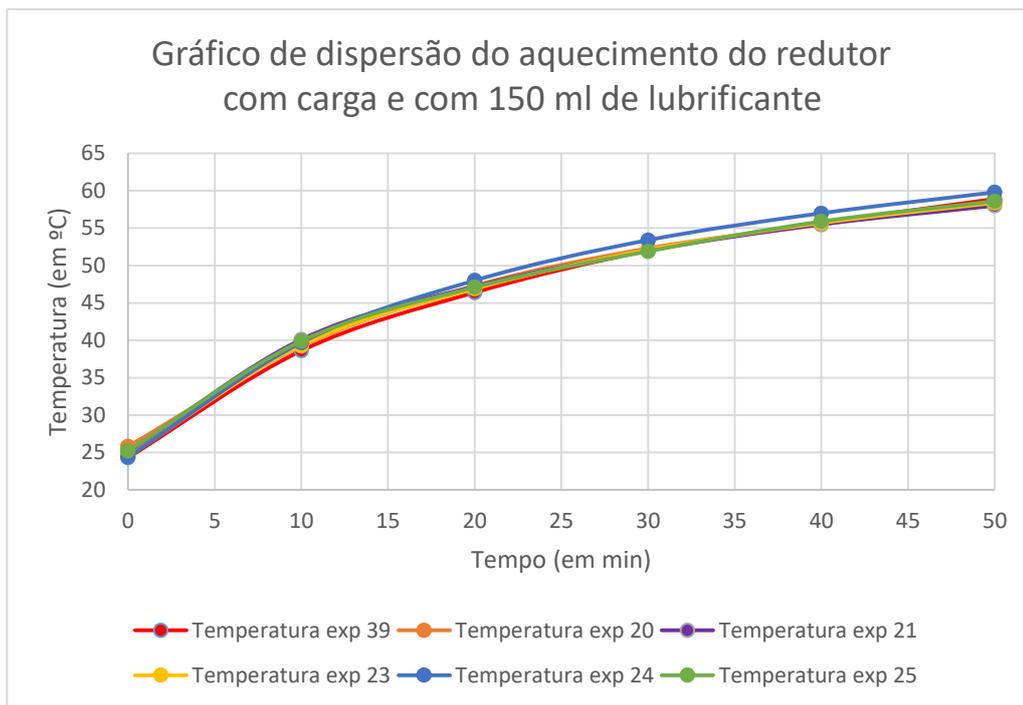
Fonte: Autoria própria

Quadro 16: Dados adicionais para termografia no redutor com carga e com 150 ml de lubrificante

Ensaio	Dados adicionais			
	Umidade Inicial (%)	Umidade Final (%)	Temperatura Redutor Inicial (Termômetro Dual Laser) °C	Temperatura Redutor Final (Termômetro Dual Laser) °C
Experimento 39 (equação)	45	45	22,4	55,0
Experimento 20	44	50	22,3	54,2
Experimento 21	43	47	22,6	54,5
Experimento 23	45	56	22,7	54,9
Experimento 24	52	44	22,4	55,2
Experimento 25	46	59	21,6	54,5
Média	45,8	50,2	22,3	54,7

Fonte: Autoria própria

**Figura 54: Gráfico de dispersão do aquecimento do redutor com carga e com 150 ml de lubrificante**



**Fonte: Autoria própria**

Os dados exibidos nos ensaios a partir de agora possuem uma diferença relacionada ao sistema. Após a verificação, por termografia, das temperaturas do redutor com valores de lubrificação variando entre 150 ml, 100 ml e 50 ml não apresentarem diferenças perceptíveis, decidiu-se introduzir uma carga ao eixo de saída do redutor equivalente a 4 kg anexados através de um braço preso por um gancho com uma correia acoplada ao eixo de saída do redutor. Assim sendo, estes valores demonstrarão se, com uma carga, o que é comum na utilização de um redutor, os valores de temperatura obtidos poderão demonstrar variação, pela termografia, de acordo com a quantidade de lubrificante. Nesta bateria de testes, o experimento 22 foi o excluído.

Pelo Quadro 14, percebe-se que os valores de temperaturas são mais altos, se comparados com os valores obtidos até então nos ensaios sem carga, exceto pelo valor inicial, que deve estar num mesmo intervalo para todos os experimentos. O valor inicial médio de temperatura, por ser um padrão para início de ensaio, é de 24,9°C, 0,5°C acima da média dos experimentos sem carga e com valor de lubrificação com 150 ml, variação essa que está de acordo com o intervalo da temperatura ambiente padrão. Um dado a se notar é que o maior incremento de temperatura ocorreu também nos 10 primeiros minutos de experimento, porém, ao invés de 10,3°C como no experimento sem carga e mesma

lubrificação, ocorreu um acréscimo de 14,6°C, demonstrando, desde o início dos ensaios, que a introdução da carga extra iria influenciar nos valores obtidos pela termografia. A partir do minuto 10, os acréscimos de temperatura detectados são menores, entretanto, superiores aos acréscimos que foram detectados nos mesmos intervalos de tempo dos ensaios sem carga.

Os dados do Quadro 15 expõem valores de temperaturas semelhantes aos quadros anteriores de dados do ambiente. Isso se deve ao fato de que os valores de dados do ambiente permanecem numa mesma faixa de intervalo, já que essas informações são padrões exigidos pelas normas NR 17 e NBR 15572. As variações, nestes quadros, tornam-se cada vez menores devido às experiências anteriores do condutor dos testes, como apresentadas pelas médias: para o termômetro digital, temperatura inicial de 22,5°C e temperatura final de 22,9°C, já para o termohigrômetro, temperatura inicial e final de 23,3°C.

O mesmo se aplica aos valores de umidade detectados pelo termohigrômetro. Os valores apresentados no Quadro 16 são semelhantes aos números obtidos em quadros anteriores, pois são monitorados pelo condutor dos testes e exigidos pela NR 17. Já, a temperatura do redutor, aferida pelo termômetro laser, possui grandes mudanças nos valores finais. Os valores iniciais permanecem na faixa dos 21 °C aos 23 °C, porém as temperaturas finais apresentam um aumento considerável, passando de uma média de 41,5°C para uma média de 54,7°C, o que representa um aumento de aproximadamente 32%. Isto se deve ao fato de a carga extra causar uma frenagem no eixo de saída do redutor. Então, para continuar com a mesma rotação de saída, que, em tese, é de 150 rpm, já que a máquina possui uma redução de 1:12 e, em todos os ensaios das condições citadas, foi utilizado o valor de rotação de entrada de 1800 rpm advindo do motor, o equipamento aumenta o seu trabalho realizado e, por consequência, sua temperatura.

Na Figura 52, tem-se o gráfico de dispersão aquecimento do redutor com carga e com 150 ml de lubrificante. As curvas são comparadas com a curva do experimento 39, que é o experimento que servirá de base para concepção da equação de aquecimento do redutor com carga. A variação de temperatura máxima ocorre nos valores finais, chegando ao valor de 1°C de diferença, o que representa uma variação máxima de 2% com os valores obtidos pela curva do experimento 39, o que mostra uma grande exatidão desse experimento e sua curva. A seguir, exibe-se os quadros 17, 18, 19 e a Figura 53, que representam os dados obtidos pelos testes com carga e com 100 ml de lubrificante no redutor mecânico.

Quadro 17: Temperaturas obtidas pela termografia no redutor com carga e com 100 ml de lubrificante

Ensaio Termográfico (°C)	Ensaio	Tempo (min)					
		0	10	20	30	40	50
	Experimento 39 (equação)	24,3	38,6	46,4	52,0	55,7	58,9
	Experimento 26	23,9	38,3	45,6	50,1	53,5	56,8
	Experimento 27	24,5	38,5	45,9	50,2	54,5	57,1
	Experimento 28	24,4	38,8	46,3	51,2	54,8	57,7
	Experimento 29	24,8	39,0	46,6	51,2	54,7	57,2
	Experimento 31	24,9	38,9	46,2	50,8	54,7	58,0
	Média	24,5	38,7	46,2	50,9	54,7	57,6

Fonte: Autoria própria

Quadro 18: Dados do ambiente para termografia no redutor com carga e com 100 ml de lubrificante

Ensaio	Dados do ambiente			
	Temperatura Ambiente Inicial (termômetro digital) °C	Temperatura Ambiente Final (termômetro digital) °C	Temperatura Ambiente Inicial (termohigrômetro) °C	Temperatura Ambiente Final (termohigrômetro) °C
Experimento 39 (equação)	23,0	23,5	23,5	23,5
Experimento 26	22,5	22,8	23,0	23,3
Experimento 27	22,3	22,7	23,5	23,6
Experimento 28	22,3	23,1	23,1	23,5
Experimento 29	22,5	23,0	23,1	23,5
Experimento 31	22,3	22,5	23,0	22,9
Média	22,5	22,9	23,2	23,4

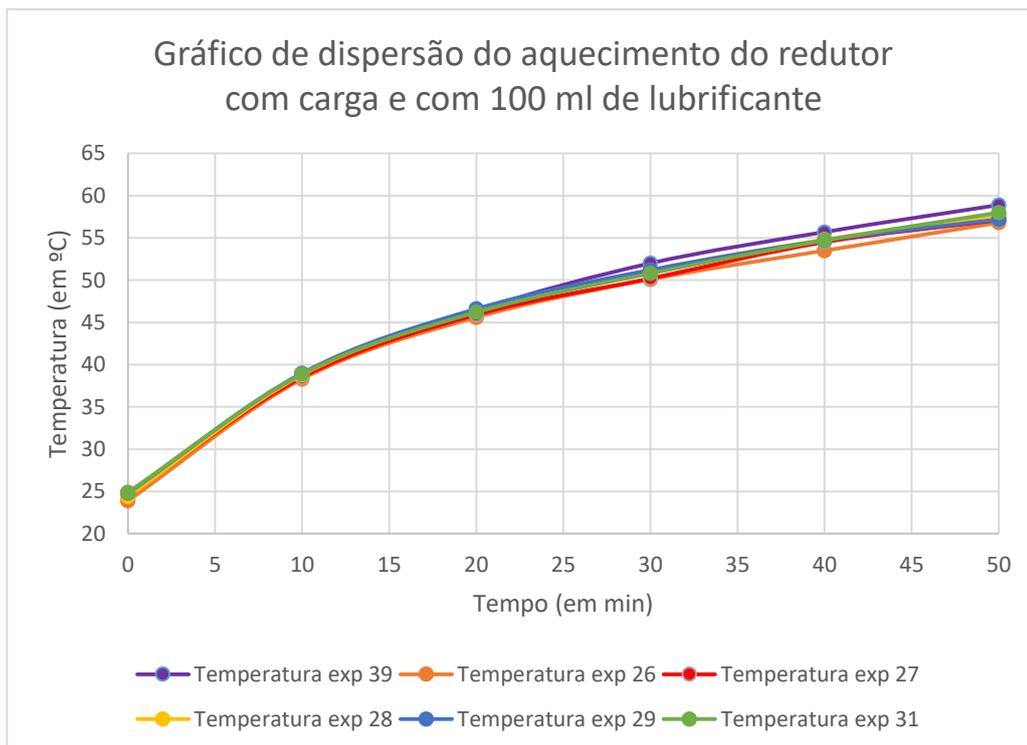
Fonte: Autoria própria

Quadro 19: Dados adicionais para termografia no redutor com carga e com 100 ml de lubrificante

Ensaio	Dados adicionais			
	Umidade Inicial (%)	Umidade Final (%)	Temperatura Redutor Inicial (Termômetro Dual Laser) °C	Temperatura Redutor Final (Termômetro Dual Laser) °C
Experimento 39 (equação)	45	45	22,4	55,0
Experimento 26	49	45	21,1	53,5
Experimento 27	41	53	21,5	54,0
Experimento 28	44	54	22,0	54,5
Experimento 29	42	49	22,1	54,0
Experimento 31	45	47	22,5	54,4
Média	44,3	48,8	21,9	54,2

Fonte: Autoria própria

**Figura 55: Gráfico de dispersão do aquecimento do redutor com carga e com 100 ml de lubrificante**



**Fonte: Autoria própria**

No Quadro 17, tem-se os valores da termografia obtidos do redutor com carga e com 100 ml de lubrificante. Inesperadamente, os valores são muito semelhantes àqueles obtidos no Quadro 14, chegando até a uma diferença mínima no valor médio final de 1,1°C, sendo o valor de 57,6°C o valor médio de temperatura dos experimentos com 100 ml e 58,7°C o valor médio de temperatura dos com 150 ml. Isso mostra que o calor gerado devido à diminuição de lubrificante não é suficiente para modificar a percepção de temperatura por termografia. O experimento 30 foi o excluído nesta condição.

Os quadros 18 e 19 apresentam resultados similares, com variações mínimas nos números apresentados, se comparados com os resultados dos quadros 15 e 16.

Na Figura 55, tem-se o gráfico de dispersão do aquecimento do redutor com carga e com 100 ml de lubrificante. Neste gráfico, observa-se que os cinco experimentos apresentam valores muito próximos entre si e com os experimentos da condição anterior. Porém, nota-se que a curva do experimento 39 (o experimento da equação de aquecimento com carga), é levemente maior nos intervalos finais do experimento, apresentando 2°C de diferença ou 3% dos valores. A seguir, apresenta-se os quadros 20, 21 e 22 e a Figura 54 com as informações dos testes com carga e 50 ml de lubrificante.

Quadro 20: Temperaturas obtidas pela termografia no redutor com carga e com 50 ml de lubrificante

Ensaio Termográfico (°C)	Ensaio	Tempo (min)					
		0	10	20	30	40	50
	Experimento 39 (equação)	24,3	38,6	46,4	52,0	55,7	58,9
	Experimento 32	24,4	38,2	45,4	50,1	53,5	56,8
	Experimento 33	24,0	37,7	45,4	50,0	53,5	56,2
	Experimento 34	23,9	37,6	45,3	49,9	53,8	56,8
	Experimento 36	24,1	37,7	44,8	50,1	53,5	56,3
	Experimento 37	24,9	37,6	44,8	50,2	53,1	56,1
	Média	24,3	37,9	45,4	50,4	53,9	56,9

Fonte: Autoria própria

Quadro 21: Dados do ambiente para termografia no redutor com carga e com 50 ml de lubrificante

Ensaio	Dados do ambiente			
	Temperatura Ambiente Inicial (termômetro digital) °C	Temperatura Ambiente Final (termômetro digital) °C	Temperatura Ambiente Inicial (termohigrômetro) °C	Temperatura Ambiente Final (termohigrômetro) °C
Experimento 39 (equação)	23,0	23,5	23,5	23,5
Experimento 32	22,8	23,3	23,4	23,9
Experimento 33	22,3	22,1	23,6	23,0
Experimento 34	22,9	23,2	23,3	23,6
Experimento 36	22,3	22,8	23,1	22,9
Experimento 37	22,8	22,3	23,5	23,1
Média	22,7	22,9	23,4	23,3

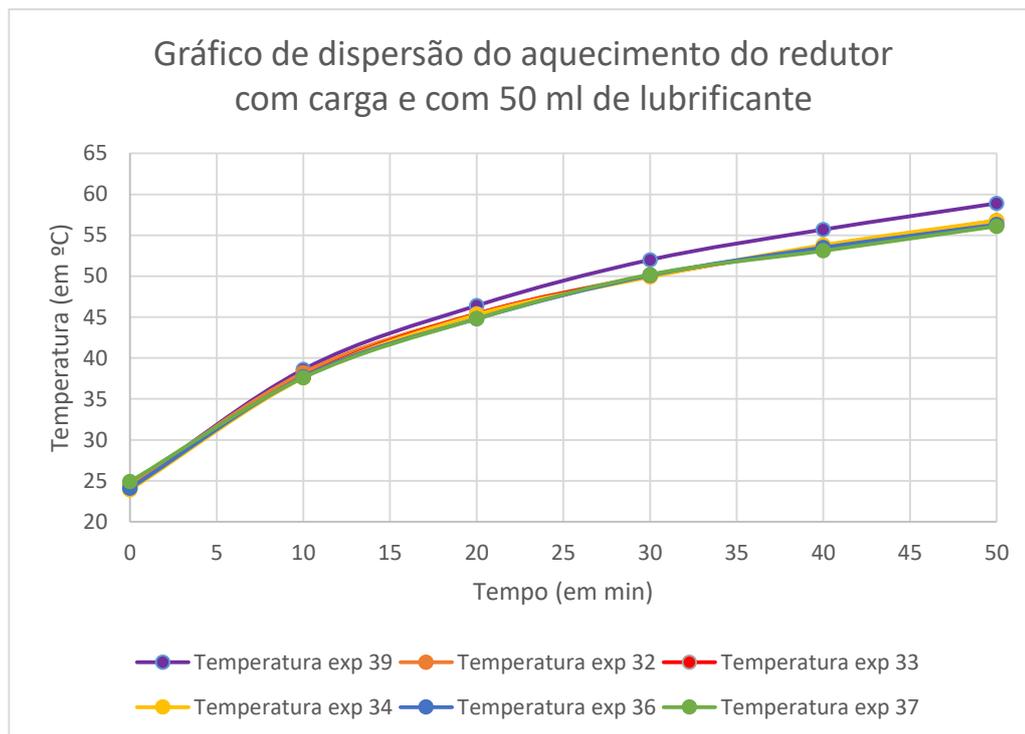
Fonte: Autoria própria

Quadro 22: Dados adicionais para termografia no redutor com carga e com 50 ml de lubrificante

Ensaio	Dados adicionais			
	Umidade Inicial (%)	Umidade Final (%)	Temperatura Redutor Inicial (Termômetro Dual Laser) °C	Temperatura Redutor Final (Termômetro Dual Laser) °C
Experimento 39 (equação)	45	45	22,4	55,0
Experimento 32	42	52	21,7	53,4
Experimento 33	49	44	21,3	52,7
Experimento 34	51	57	22,7	53,2
Experimento 36	48	60	21,5	52,9
Experimento 37	43	41	22,3	52,5
Média	46,3	49,8	22,0	53,3

Fonte: Autoria própria

**Figura 56: Gráfico de dispersão do aquecimento do redutor com carga e com 50 ml de lubrificante**



**Fonte: Autoria própria**

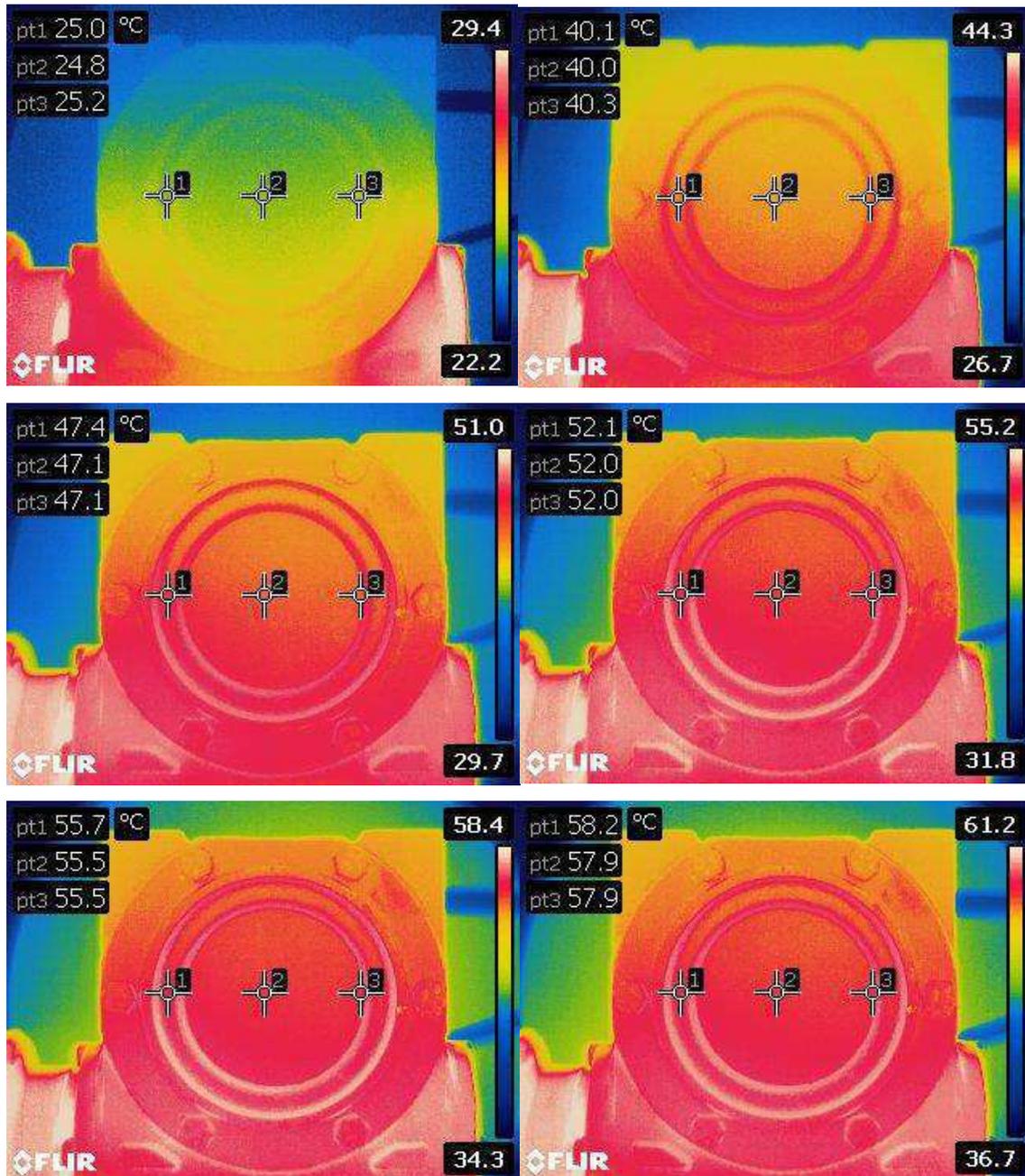
O Quadro 20 exibe temperaturas obtidas pela termografia no redutor com carga e com 50 ml de lubrificante. Novamente, os valores estão muito próximos dos valores com lubrificação completa (150 ml), chegando a possuir uma diferença máxima de 2°C se comparados com os resultados do Quadro 14 e com o experimento 39, o que reflete que o calor gerado pela deficiência de lubrificação neste tipo de redutor é de aproximadamente 3% menor se comparado com os valores de lubrificação completa.

O Quadro 21 apresenta valores similares aos quadros 18 e 15, que são valores referentes às temperaturas iniciais do ambiente para cada ensaio. Já, o Quadro 22 demonstra um valor médio de temperatura final do redutor de 53,3°C, um valor ainda menor que os valores exibidos pelos experimentos com carga e com 150 ml e 100 ml de lubrificante. Esse dado mostra que o lubrificante apresenta importância na quantidade de calor gerado e passado para a carcaça do redutor e que, ao retirá-lo, temos um baixa e não um aumento de temperatura.

A Figura 54 reforça o que se percebeu nos quadros 20 e 22 exibindo que a curva do experimento 39 está acima das curvas dos demais experimentos apresentando uma diferença máxima de 3% nos valores em relação aos valores das demais curvas.

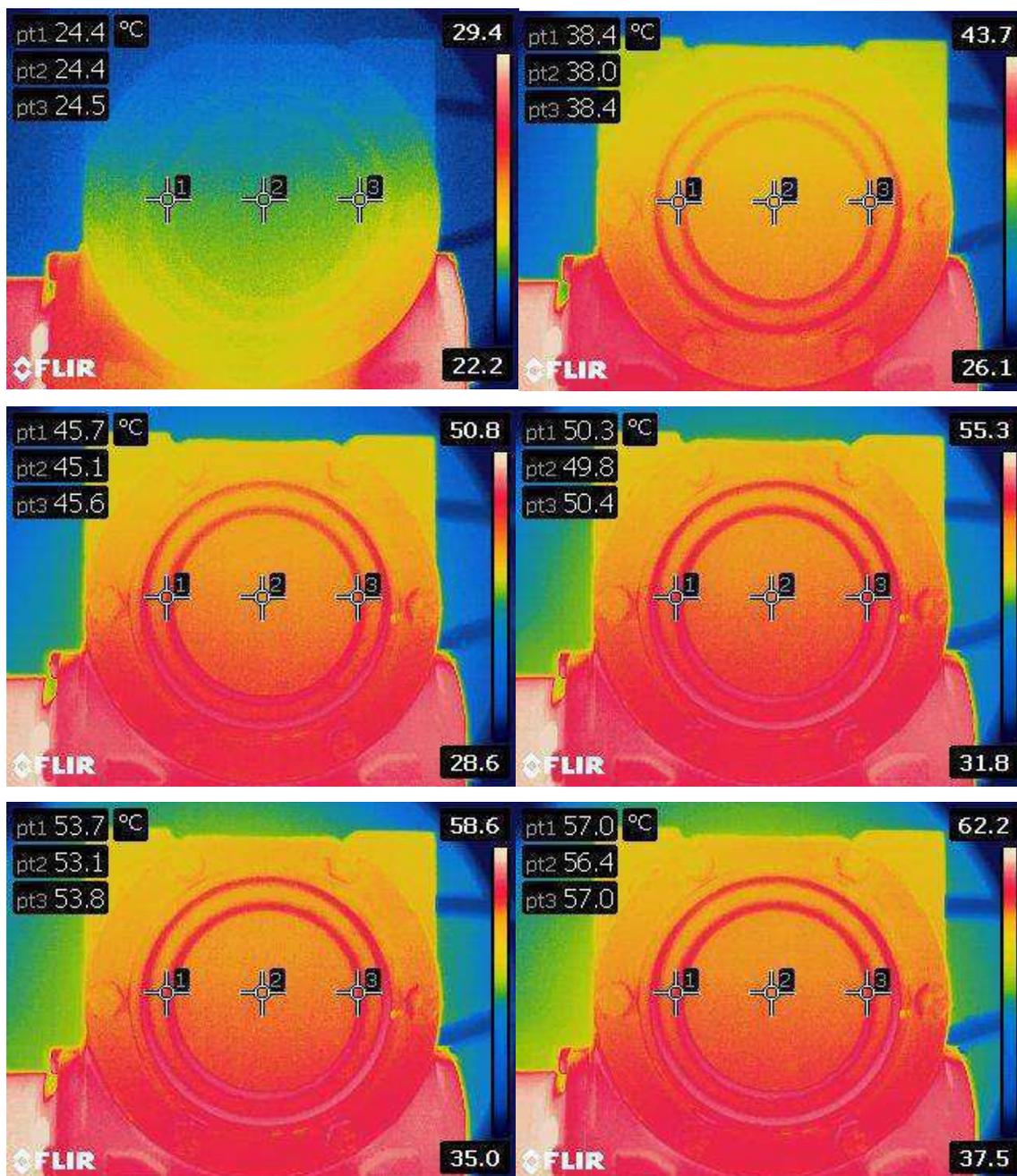
Após todos os dados serem levantados, analisa-se o aquecimento como feito nas condições sem carga. Para melhor compreensão, as figuras 57 e 58 demonstram termogramas dos experimentos nas condições carga.

**Figura 57: Termogramas do experimento 21 (com carga e com 150 ml) ao longo dos 50 minutos**



Fonte: Autoria própria

**Figura 58: Termogramas do experimento 32 (com carga e com 50 ml) ao longo dos 50 minutos**



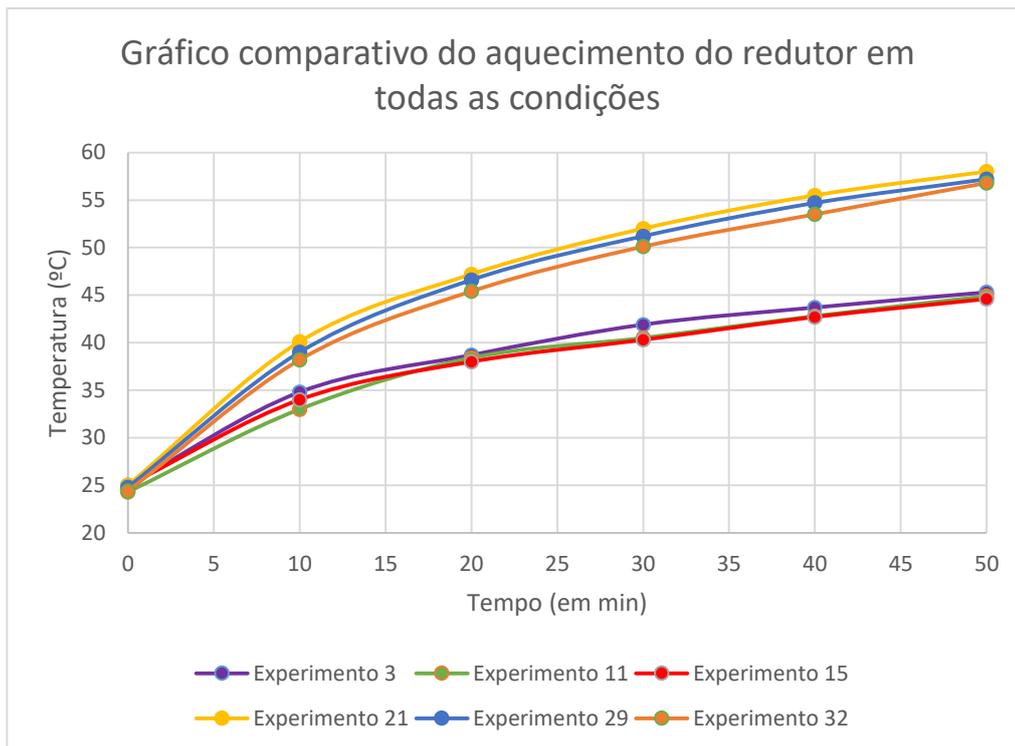
Fonte: Autoria própria

A Figura 57 apresenta os termogramas do experimento 21, que foi realizado com a condição com carga e com 150 ml de óleo lubrificante no redutor. Já, a Figura 58 apresenta os termogramas do experimento 32, que foi realizado com a condição de possuir a carga extra e com apenas 50 ml de óleo lubrificante. Assim como os demais experimentos, o primeiro termograma foi retirado após 30 segundos do sistema ligado e

os demais a cada 10 minutos, até o pico máximo de 50 minutos, totalizando 6 termogramas por experimento.

A análise da condição do redutor com carga é semelhante a análise do redutor sem carga extra. A grande diferença nesta situação ocorreu porque o redutor aqueceu até um pico de temperatura por volta dos 58°C. Porém, semelhante a situação anterior de sistema sem carga, conforme foi sendo diminuída a quantidade de lubrificante, as temperaturas médias em cada ponto (10, 20, 30, 40 e 50 minutos) foram menores no sistema com menor lubrificação (50 ml). Isso reforça a hipótese criada na primeira análise, segundo a qual o lubrificante é responsável pela diminuição do atrito e dissipação da quantidade de energia térmica excessiva, repassando essa energia térmica para a estrutura externa do redutor (carcaça). Então, conforme é realizada a retirada do lubrificante, as engrenagens continuam a gerar calor numa proporção ainda maior, devido ao aumento do nível de atrito sem o lubrificante para reduzir esse atrito e ceder o calor extra gerado para a estrutura externa do componente. Esse calor gerado se acumula nas engrenagens, não sendo repassado para estrutura e, portanto, não sendo aferido pelo termovisor.

Diferente da análise de Karabacak, Ozmen e Gumusel (2020) que trabalharam com falhas nas engrenagens (desgaste, corrosão e quebra de dente), entende-se que a deficiência do lubrificante não aumenta o calor gerado na parte externa do redutor e sim o diminui, porém, essa deficiência dificulta a liberação de calor gerada pelas engrenagens, o que causa maior atrito entre elas e aumenta a probabilidade das mesmas apresentarem defeitos conforme o redutor é utilizado. Portanto, pode-se afirmar, com base nos dados deste trabalho e os dados de Karabacak, Ozmen e Gumusel (2020) que, os defeitos como desgaste, corrosão e quebra de dente nas engrenagens de um redutor de rosca sem fim são mais perceptíveis por termografia do que a deficiência de lubrificação no redutor. A Figura 59, expõe uma comparação entre curvas de cada uma das 6 condições estudadas.

**Figura 59: Gráfico comparativo do aquecimento do redutor em todas condições**

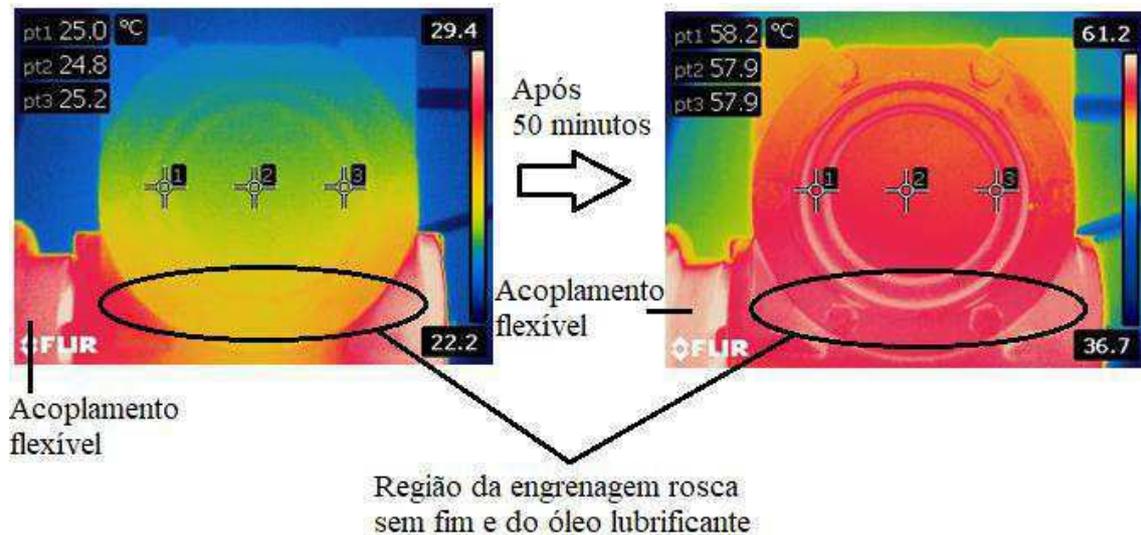
**Fonte: Autoria própria**

A Figura 59 exibe uma comparação entre as curvas de aquecimento do redutor nas seis condições estudadas sendo, o experimento 3, na cor roxa, o exemplo da condição sem carga e com 150 ml, o experimento 11, na cor verde, o exemplo da condição sem carga e com 100 ml, o experimento 15, na cor vermelha, o exemplo da condição sem carga e com 50 ml, o experimento 21, na cor amarela, o exemplo da condição com carga e com 150 ml, o experimento 29, na cor azul, o exemplo da condição com carga e com 100 ml e o experimento 32, na cor laranja, o exemplo da condição com carga e com 50 ml. Esse gráfico reforça o que já foi mencionado acima, exibindo as diferenças mínimas entre as temperaturas de acordo com a variação de lubrificante, chegando a, no máximo, 2°C de um experimento com 150 ml lubrificante para um experimento com 50 ml de lubrificante.

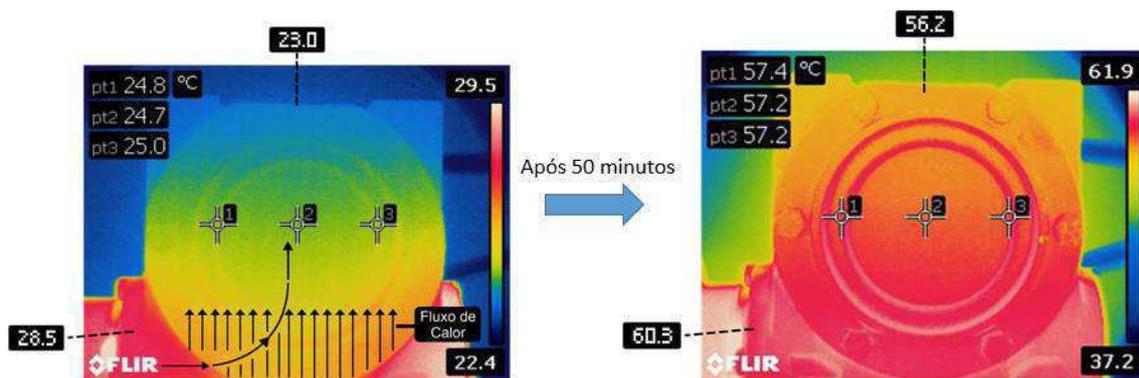
Percebe-se também, na Figura 59, que o maior fator para influência da variação de temperatura não foi a variação de lubrificação, mas sim a introdução da carga, pois as curvas que possuem a carga extra apresentam valores maiores de temperatura a partir do minuto 10 com uma variação de 5°C (indo de uma média de 34°C até uma média de 39°C) e finalizando com uma variação de 11°C (partindo de uma média de 45°C até uma média de 56°C).

Uma análise detalhada de um termograma foi elaborada na Figura 60 e exibe mais detalhes que propiciaram as discussões anteriores:

**Figura 60: Análise de termogramas de redutor LILO ERV-042-n2**



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria

A Figura 60 apresenta, em 60a, termogramas do redutor do sistema estudado no início do experimento e ao final do mesmo, após 50 minutos de trabalho. As temperaturas marcadas nos pontos 1, 2 e 3 são as temperaturas na região mediana da face do redutor, registradas pela câmera termográfica, e correspondem a valores um pouco menores que a região inferior do redutor, demarcada pelo círculo preto nas imagens. Em 60b, mostra-se como o fluxo da energia térmica que é cedido pela região interna do redutor, vai se espalhando na região externa do mesmo mostrando, por exemplo, que a região inferior do redutor está sempre mais quente (28,5°C e 60,3°C) e a região superior da carcaça do

reductor, mais fria (23°C e 56,2°C). A região inferior exhibe temperaturas maiores por dois motivos:

Primeiro, por ter o acoplamento flexível (no canto inferior esquerdo) exercendo a rotação no eixo de entrada do motor. Esse componente do sistema apresentou as maiores temperaturas em todos os termogramas, devido a função de interligar o motor ao reductor e repassar o movimento, inicialmente de 1800 rpm, ao eixo de entrada do reductor.

Segundo, a região inferior do reductor exhibe temperaturas mais altas por possuir, naquela região, no interior do reductor, a engrenagem de rosca sem fim, que está acoplada ao eixo de entrada do reductor e o armazenamento de óleo lubrificante. Nesta região ocorre o contato entre a rosca sem fim e a engrenagem helicoidal, ocasionando o atrito e a geração de calor, com isso, o lubrificante recebe esse calor e repassa inicialmente essa energia para a região inferior do reductor, a qual tem contato direto, com o tempo, as regiões superiores da carcaça vão recebendo esse calor e estabilizando a temperatura como um todo, como mostrado no termograma da direita.

Com isso, encerra-se a análise das condições de carga e quantidade de lubrificante e parte-se para a concepção das equações com as condições de reductor sem carga e com 150 ml de lubrificante e reductor com carga e com 150 ml de lubrificante, que são respectivamente obtidas pelos experimentos 38 e 39.

Antes dos experimentos 38 e 39, foram feitas medições com tacômetro para quantificar as rotações do eixo de saída do reductor. Para reductor sobre a condição sem carga e com 150 ml de lubrificante, o mesmo possuía no seu eixo de saída 149 rpm, já com carga e 150 ml de lubrificante, o reductor possuía 147 rpm no seu eixo de saída. Assim sendo, valores muito próximos do ideal, que seria de 150 rpm devido à redução 1:12 e compreensivos devido a máquina já possuir várias horas de trabalho.

A seguir, os dados do experimento 38 nos Quadros 23, 24 e 25 e na Figura 61:

**Quadro 23: Temperaturas obtidas pela termografia no redutor sem carga e com 150 ml de lubrificante para geração da equação de aquecimento do redutor**

	Tempo (min)										
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
<b>Experimento 38 (°C)</b>	24,3	30,6	34,5	36,8	38,6	40,3	41,8	42,8	43,8	44,8	45,4

Fonte: Autoria própria

**Quadro 24: Dados do ambiente para termografia no redutor sem carga e com 150 ml de lubrificante para geração da equação de aquecimento do redutor**

Ensaio	Dados do ambiente			
	Temperatura Ambiente Inicial (termômetro digital) °C	Temperatura Ambiente Final (termômetro digital) °C	Temperatura Ambiente Inicial (termohigrômetro) °C	Temperatura Ambiente Final (termohigrômetro) °C
<b>Experimento 38</b>	22,9	23,0	23,5	23,5

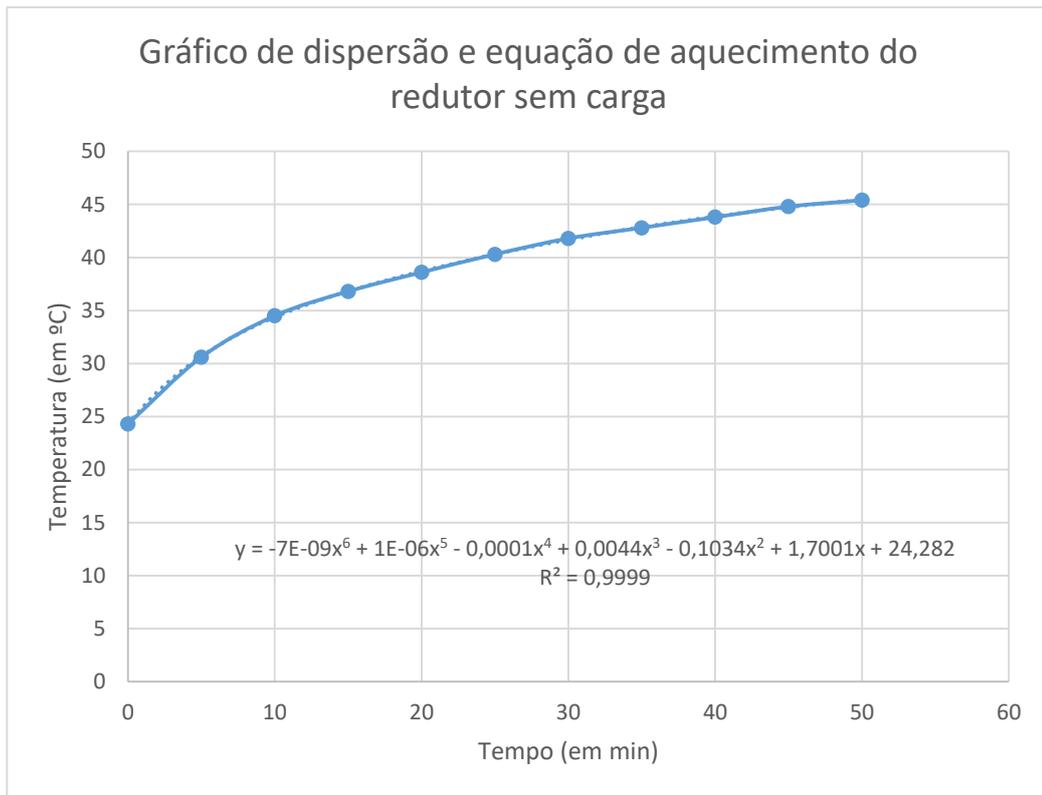
Fonte: Autoria própria

**Quadro 25: Dados adicionais para termografia no redutor sem carga e com 150 ml de lubrificante para geração da equação de aquecimento do redutor**

Ensaio	Dados adicionais			
	Umidade Inicial (%)	Umidade Final (%)	Temperatura Redutor Inicial (Termômetro Dual Laser) °C	Temperatura Redutor Final (Termômetro Dual Laser) °C
<b>Experimento 38</b>	45	45	22,0	41,5

Fonte: Autoria própria

**Figura 61: Gráfico de dispersão e equação do aquecimento do redutor sem carga e com 150 ml de lubrificante**



**Fonte: Autoria própria**

Após a utilização da termografia nas condições de variação de carga e lubrificante apresentarem valores muito próximos, despertou-se a intenção de criar equações para visualizar o aquecimento do redutor durante sua operação sem carga e com carga de 4 kg, utilizando o valor total de lubrificante (que é de 150 ml). Assim, a equação pode ser utilizada para futura comparação com outros valores a fim de obter resultados que demonstrem falhas no redutor de rosca sem fim.

Os quadros 23, 24 e 25 expõem os dados do experimento 38, que foi o experimento produzido para criação da equação de aquecimento do redutor de rosca sem fim sem carga e com 150 ml de lubrificante.

A Figura 55 exibe a curva do experimento 38 e sua equação, dada por:

$$Y = (-7 * 10^{-9})x^6 + (10^{-6})x^5 - (10^{-4})x^4 + (4,4 * 10^{-3})x^3 - (1,034 * 10^{-1})x^2 + 1,7001x + 24,282 \quad (18)$$

A Equação 18 é a fórmula para obter a temperatura de um redutor de rosca sem fim LILO ERV-042-n2 na condição sem carga e com lubrificação de 150 ml, onde x é o tempo decorrido e Y é o valor da temperatura obtida naquele momento. Essa equação apresenta um valor de 99,99% de exatidão, de acordo com o software Microsoft Excel.

A seguir, os dados do experimento 39, que apresenta a condição do redutor trabalhando com carga e com a lubrificação de 150 ml, nos Quadros 26, 27 e 28 e na Figura 62.

**Quadro 26: Temperaturas obtidas pela termografia no redutor com carga e com 150 ml de lubrificante para geração da equação de aquecimento do redutor**

	Tempo (min)										
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
<b>Experimento 39 (°C)</b>	24,8	32,6	38,6	43,1	46,4	49,4	52,0	54,0	55,7	57,3	58,9

Fonte: Autoria própria

**Quadro 27: Dados do ambiente para termografia no redutor com carga e com 150 ml de lubrificante para geração da equação de aquecimento do redutor**

Ensaio	Dados do ambiente			
	Temperatura Ambiente Inicial (termômetro digital) °C	Temperatura Ambiente Final (termômetro digital) °C	Temperatura Ambiente Inicial (termohigrômetro) °C	Temperatura Ambiente Final (termohigrômetro) °C
<b>Experimento 39</b>	23,0	23,5	23,5	23,5

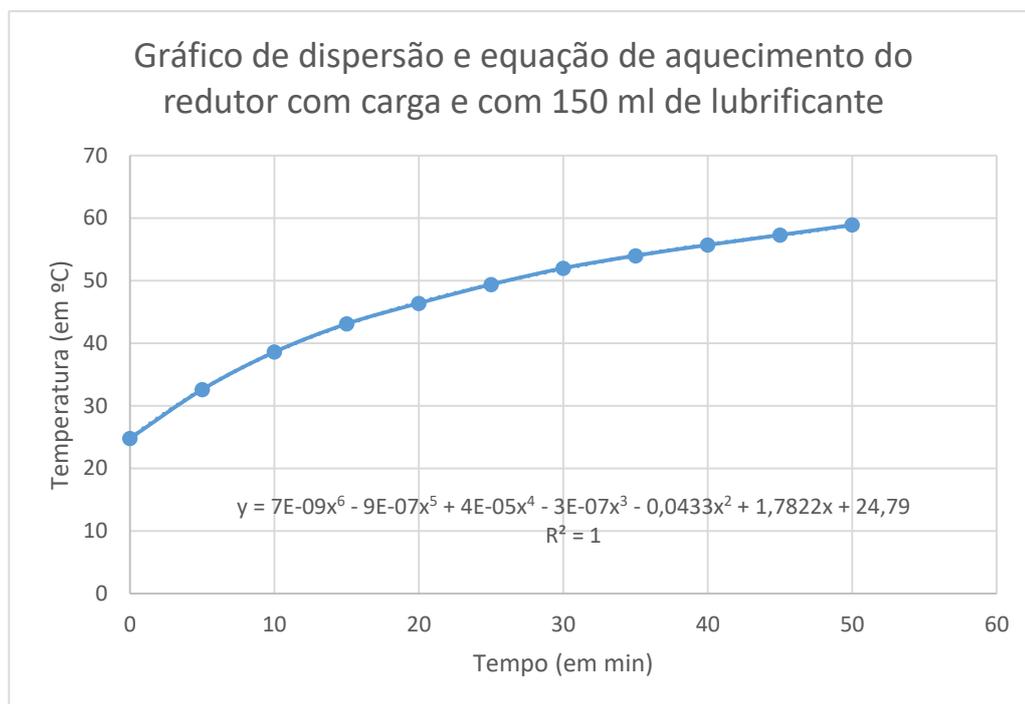
Fonte: Autoria própria

**Quadro 28: Dados adicionais para termografia no redutor com carga e com 150 ml de lubrificante para geração da equação de aquecimento do redutor**

Ensaio	Dados adicionais			
	Umidade Inicial (%)	Umidade Final (%)	Temperatura Redutor Inicial (Termômetro Dual Laser) °C	Temperatura Redutor Final (Termômetro Dual Laser) °C
<b>Experimento 39</b>	45	45	22,4	55,0

Fonte: Autoria própria

**Figura 62: Gráfico de dispersão e equação do aquecimento do redutor com carga e com 150 ml de lubrificante**



**Fonte: Autoria própria**

Analogamente ao processo para criação da equação anterior, a nova equação utiliza os dados fornecidos pelos quadros 26, 27 e 28, que são os dados para o experimento 39, o qual tem a condição de carga extra e 150 ml de lubrificante.

A Figura 62 exibe a curva e a equação do experimento 39, sendo este experimento diferente do anterior por possuir a carga de 4 kg acoplado ao eixo de saída do redutor. A equação é expressa por.

$$Y = (7 * 10^{-9})x^6 - (-9 * 10^{-7})x^5 + (4 * 10^{-5})x^4 + (3 * 10^{-7})x^3 - (4,33 * 10^{-2})x^2 + 1,7822x + 24,79 \quad (19)$$

A Equação 19 apresenta a fórmula para calcular a temperatura de um redutor de rosca sem fim LILO ERV-042-n2 com carga de 4 kg acoplados ao seu eixo de saída e 150 ml de lubrificante. Comparado aos outros experimentos, esse experimento gerou uma equação com precisão acima de 99,99%.

As equações 18 e 19 foram criadas com a ajuda do Microsoft Excel e foram escolhidas como equações polinomiais de grau 6, pois as demais opções apresentavam

valores inferiores a 99% de precisão (ou  $R^2$  como definido no software). Dentre as outras opções possíveis, a que possuía melhor exatidão era a equação linear, por apresentar uma precisão de 92%. As opções de equação potencial e logarítmica não estavam disponíveis devido a utilização do ponto inicial 0 (zero) no eixo x, que representa o tempo inicial dos ensaios nos gráficos. Porém, por questões de testes, foram retirados esses pontos e as precisões desses dois tipos de equação foram de 99,96% e de 99,17% respectivamente para as duas condições de ensaio.

Devido aos resultados obtidos nos experimentos 1 a 19 (sem carga) e dos experimentos 20 a 37 (com carga), pode-se analisar que o redutor apresenta um comportamento de aquecimento semelhante independentemente da quantidade de lubrificante. Com isso, a criação das equações complementa esse estudo no sentido de dar um direcionamento quanto à manutenção deste equipamento. Diferentemente do mostrado e analisado por Waqar e Demetgul (2016) e por Karabacak, Ozmen e Gumusel (2020), em que foram detectadas grandes variações de temperatura com a inserção de defeitos nas engrenagens de redutores de rosca sem fim, da ordem de até 15 °C (ou seja, 25%) de diferença da temperatura superficial do sistema trabalhando com e sem defeitos, este trabalho demonstra que o redutor modelo LILO ERV-042-n2 não apresenta grandes discrepâncias térmicas na sua estrutura exterior, conforme produz-se simulações de lubrificação deficiente visualizadas pela técnica da termografia. Com isso, pode-se afirmar que, se for obtido um valor de temperatura externo ao experimento e comparado com valores obtidos por uma das equações 18 ou 19 no mesmo período de tempo e esse valor externo estiver acima ou abaixo de 5% dos valores obtidos nas equações 18 e 19, significa que esse mesmo redutor apresenta alguma anomalia.

Por fim, analisando os dados do ambiente e dados adicionais, verificou-se, assim como em Oliveira Neto (2019), que os mínimos aumentos de temperatura ambiente detectados nos experimentos 5, 24, 32 e 34 também incrementaram as temperaturas finais detectadas pela termografia. Por sua vez, as maiores variações umidade detectadas durante os ensaios, cerca de 10% de variação, tendem a influenciar nos resultados dos valores finais da medição de temperatura com termômetro a laser. Os experimentos 6, 10, 25, 27 e 36 apresentam variações de umidade iguais ou superior a 10% e também os menores valores de temperatura final do redutor com termômetro laser dentre os experimentos de suas condições. Com estes dados, comprova-se a utilização das NR 17 e NBR 16292 para padronização das características do ambiente antes da realização dos ensaios.

## CAPÍTULO VIII

Neste capítulo são apresentadas as conclusões, mediante os resultados obtidos e discutidos no CAPÍTULO VII.

### 8. CONCLUSÕES

Após realizados todos os experimentos termográficos e análises dos resultados obtidos no redutor mecânico LILO ERV-042-n2, obteve-se as seguintes conclusões.

O redutor estava funcionando perfeitamente e com velocidades do eixo de saída semelhante a ideal sendo, 149 rpm para o sistema sem carga e 147 para o sistema com carga.

O redutor sem carga não apresentou grandes gradientes de temperatura superficial com as variações no volume de lubrificante, pois apresentou temperatura média máxima, detectada no termovisor, de 45,6°C com 150 ml de lubrificante e de 44,7°C com 50 ml de lubrificante.

O redutor durante os ensaios com carga também não apresentou grandes variações de temperatura média superficial quando se compararam as temperaturas superficiais de acordo com a quantidade de lubrificante, apresentando uma diferença de temperatura média máxima, detectada pelo termovisor, de 2°C. Porém, um gradiente notório de temperatura foi detectado de acordo com a introdução da carga de 4 kg, chegando a uma variação de até 10°C entre os sistemas com e sem carga em todas as medidas de lubrificação.

Portanto, para a falha de deficiência na lubrificação, a técnica da termografia não é indicada, pois devido a carcaça do redutor não estar em contato com as engrenagens internas diretamente, não absorve todo o calor gerado por elas. Inesperadamente, a temperatura da carcaça diminuiu com a retirada de óleo, pois o óleo absorve o calor gerado pelo atrito das engrenagens e transmite para a carcaça. Já para variação de carga, a termografia detecta diferenças relevantes de temperatura, sendo indicada para verificar tal situação.

Outro fator evidenciado, é que, mesmo em ambiente controlado, as características externas ao sistema têm grande influência na captação de resultados nos ensaios termográficos, como interferência térmica de origem natural ou superficial, variação da umidade e alta carga solar dependendo do período anual.

Com isso, tem-se por sugestão os seguintes trabalhos futuros:

- Refazer testes com a introdução de desalinhamento no redutor mecânico;
- Refazer testes com a introdução de desbalanceamento no redutor mecânico;
- Refazer testes em ambiente com características externas não controladas;
- Refazer testes com a introdução de detritos no óleo lubrificante.
- Obtenção de equações de aquecimento no redutor em outras condições de uso diferente das utilizadas neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

ALVES, Claudemir Claudino; TANIGUTI, Jorge. **Mecânica: projetos e ensaios mecânicos**. São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011 (Coleção Técnica Interativa. Série Mecânica, v.1)

**American Gear Manufacturers Association**. Disponível em: <<https://www.agma.org/>>. Acesso em: 19 de junho. 2021.

ARCHARD, J.F., **The Temperature of Rubbing Surfaces**, *Wear*, 1959, vol. 2, no. 6, pp. 438–455.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 15424**: 2006 – Ensaios não destrutivos – Termografia – Terminologia. Rio de Janeiro, 2006. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15572**: 2013 – Ensaios não destrutivos – Termografia – Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos. Rio de Janeiro, 2013. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15718**: 2009 – Ensaios não destrutivos – Termografia – Guia para verificação de termovisores. Rio de Janeiro, 2009. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16292**: 2014 – Ensaios não destrutivos – Termografia – Medição e compensação da temperatura aparente refletida utilizando câmeras termográficas. Rio de Janeiro, 2014. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16485**: 2016 – Ensaios não destrutivos – Termografia – Medição e compensação da emissividade utilizando câmeras termográficas ou radiômetros. Rio de Janeiro, 2016. 10 p.

ÁVALO, Hélio. **Estimativa do conforto térmico em aviário de frango de corte usando termografia infravermelha**. 2014. 57 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, Mato Grosso do Sul, 2014.

BATISTA, Kaline Ventura. **Estudo termográfico de danos por impacto e por indentação quase estática em materiais compósitos tipo sanduíche de uso**

**aeronáutico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2019.

BARBER, J. R.; CIAVARELLA, M. Contact mechanics. **International Journal of Solids and Structures**, n. 37, 2000, p.29-43.

BARCELOS, David Jonhson. **Caracterização tribológica do revestimento ta-C/DLC (Carbono tipo Diamante/ Amorfo tetraédrico não hidrogenado) sobre aço ABNT 52100 em contato e movimento relativo com esfera de Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>**. 2019. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S.; INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Tradução de Eduardo Mach Queiroz e Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. 7. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2014.

BLOK, H., **Theoretical Study of Temperature Rise at Surfaces of Actual Contact under Oiliness Lubricating Conditions**, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 1937, vol. 2, p. 222–235.

BOWDEN, F.P.; RIDLER, K.E.W., **The Surface Temperature of Sliding Metals**, *Proc. Roy. Soc. Ser. A*, 1936, vol. 154, no. 883, p. 640–647.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley**. Tradução de João Batista de Aguiar, José Manoel de Aguiar e José Benaque Rubert. 10 ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

BURTON R. A.; BURTON R. G., “**Experiments and analysis of the thermoelastic behavior of a brush on a slipring**,” in *Proc. Thirty Fifth IEEE Holm Conf. on Electrical Contacts*, 1989, p. 25 – 30.

CABRAL, A. DE S. **Estudo termográfico de auxílio à detecção de falhas por desgaste mecânico em rolamento autocompensador de esferas**. 2017. 112p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2017.

CARAMALHO, Alberto. **25 anos em Termografia**. Portugal: Bubok, 2012.

CHERNETS, M. A Method for Predicting Contact Strength and Life of Archimedes and Involute Worm Gears, Considering the Effect of Wear and Teeth Correction. **Revista**

**Tribology in Industry**, v. 41, n.1, 2019, p. 134-141.: Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/332557856\\_A\\_Method\\_for\\_Predicting\\_Contact\\_Strength\\_and\\_Life\\_of\\_Archimedes\\_and\\_Involute\\_Worm\\_Gears\\_Considering\\_the\\_Effect\\_of\\_Wear\\_and\\_Teeth\\_Correction](https://www.researchgate.net/publication/332557856_A_Method_for_Predicting_Contact_Strength_and_Life_of_Archimedes_and_Involute_Worm_Gears_Considering_the_Effect_of_Wear_and_Teeth_Correction)>. Acesso em: 15 de junho. 2021

CORTIZO, Eduardo Cabaleiro. **Avaliação da técnica de termografia infravermelha para identificação de estruturas ocultas e diagnóstico de anomalias em edificações: ênfase em Edificações do Patrimônio Histórico**. 2007. 178 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Escola de Engenharia da UFMG, 2007.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Heat and Mass Transfer: fundamentals and applications**. New York: McGraw-Hill Education, 2015.

DESAI, M.R.; BHAT, J.S.; SONAWANE, B.U. **Review on Tribological Modeling of Worm Gear**. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, v.6, n.6, jun. 2019, p. 535-539.

FLIR. **Flir E-Series Data Sheet**. Disponível em: <<https://www.flir.com.br/>>. Acesso em: 01 de junho. 2021.

GARRIDO, I; LAGUELA, S; ARIAS, P. **Autonomous thermography: towards the automatic detection and classification of building pathologies**. Quantitative infrared thermography conference, Berlin, Germany, 2018. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/326112389\\_Autonomous\\_thermography\\_towards\\_the\\_automatic\\_detection\\_and\\_classification\\_of\\_building\\_pathologies](https://www.researchgate.net/publication/326112389_Autonomous_thermography_towards_the_automatic_detection_and_classification_of_building_pathologies)>. Acesso em: 20 de junho. 2021.

GHODAKE1, Sagar B; MISHRA, A. K.; DEOKAR, A. V. **A Review Paper on Fault Detection of Worm Gearbox**. In.: *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology 2<sup>nd</sup>*, International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME-2016), Amrutvahini College of Engineering, Sangamner, v. 3, Special Issue 1, March 2016, p. 161-164.

HOWELL, John R.; SIEGEL, Robert; MENGÜÇ, M. Pinar. **Thermal Radiation Heat Transfer**. Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor e Francis Group, 2010.

JAEGER, J.C., **Moving Heat Sources and Friction Temperature**, *Proc. Roy. Soc. N.S.W.*, 1942, vol. 76, pp. 203–224.

JEYAPRAKASH, Natarajan; YANG, Che-Hua. **Friction, Lubrication, and Wear**. 2020. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/344830957>>. Acesso em: 15 de junho. 2021.

JOHNSON, K.L. **Contact Mechanics**. New York, NY (USA): Cambridge University Press, 1996.

JOST, H. Peter. **Tribology: origin and future**. Elsevier Sequoia/ Printed in The Netherlands, 1990.

KARABACAK, Yunus Emre; GÜRSEL ÖZMEN, Nurhan; GÜMÜŞEL, Levent. Worm gear condition monitoring and fault detection from thermal images via deep learning method. **Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability**, v. 22, n. 3, 2020, p. 544–556. Disponível em: <<http://www.ein.org.pl/sites/default/files/2020-03-18.pdf>>. Acesso em: 16 de junho. 2021

KODA, F. **Estudo da fadiga de contato em engrenagens cilíndricas de dentes retos**. 2009. 187 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica e dos Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, Paraná, 2009.

LAGO, Daniel Fabiano. **Manutenção de redutores de velocidade pela integração das técnicas preditivas de análise de vibrações e análise de óleo lubrificante**. 2007. 180 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia – UNESP, Ilha Solteira – SP, 2007.

MARIBONDO, J. F. **Desenvolvimento de uma metodologia de projeto de sistemas modulares, aplicada a unidades de processamento de resíduos sólidos domiciliares**. 2000. 301 p. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2000.

MENDONÇA, Luís Viegas. **Termografia por Infravermelhos Inspeção de Betão**. Revista Engenharia & Vida, n. 16, set. 2005, p. 53-57.

MOBLEY, R. Keith. **An introduction to predictive maintenance**. 2 ed. United States of America: Elsevier Science, 2002.

MODEST, Michael F. **Radiative heat transfer**. 2 ed. The Pennsylvania State University: Academic Press, 2003.

NEZAMABADI, Ali Reza; SOURY, Ehsan; HOUSHMAND, Andarash. Experimental investigation of worm gears performance, part I: contact pattern and worm wheel teeth. *Indian J.Sci.Res.*1(2), 2014, p. 40-46. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/283292355\\_Experimental\\_Investigation\\_of\\_Worm\\_Gears\\_Performance\\_Part\\_I\\_Contact\\_Pattern\\_and\\_Worm\\_Wheel\\_Teeth](https://www.researchgate.net/publication/283292355_Experimental_Investigation_of_Worm_Gears_Performance_Part_I_Contact_Pattern_and_Worm_Wheel_Teeth)>. Acesso em: 20 de junho. 2021.

NIEMANN, Gustav. **Elementos de Máquinas**. São Paulo: Editora Blucher, 1971.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4 ed. Tradução de Konstantinos Dimitriou Stavropoulos, Porto Alegre: Bookman, 2013.

OLINDA, P. V. DA S. **Estudo da viabilidade da termografia na detecção de falha por desalinhamento paralelo vertical em acoplamento flexível**. 2018. 123 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2018.

OLIVEIRA NETO, João Manoel de. **Estudo da viabilidade da termografia para a detecção de falhas decorrentes de fadiga por contato em engrenagens cilíndricas de dentes retos**. 2019. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

PEREDA, Ana Isabel Castilho. **Automação de Diagnóstico para ensaios não destrutivos magnéticos**. 2010. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

POPOV, Valentin L. **Contact Mechanics and Friction: Physical Principles and Applications**. New York: Springer, 2010.

QUARTEZANI, Alessandra dos Santos; SILVA, Lorraine Gobbi da; SILVA, Maurício Eugênio. **Estudo de caso de análise de falha de um redutor mecânico**. 2013. 97 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Produção Mecânica) – Faculdade Norte Capixaba de São Mateus, São Mateus, 2013.

RADI, Polyana A.; SANTOS, Lúcia V.; BONETTI, Luiz F.; TRAVA-AIROLDI, Vladimir J. **Tribologia, conceitos e aplicações**. Trabalho publicado nos Anais do 13º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA- XIII ENCITA/2007, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 2007.

SHARIF, K. J.; KONG, S.; EVANS, H. P.; SNIDLE, R. W. **Contact and elastohydrodynamic analysis of worm gears** (Part 1: theoretical formulation). Cardiff School of Engineering, Cardiff University, Wales, UK, 2001. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/27649246\\_Contact\\_and\\_elastohydrodynamic\\_analysis\\_of\\_worm\\_gears\\_Part\\_1\\_Theoretical\\_formulation](https://www.researchgate.net/publication/27649246_Contact_and_elastohydrodynamic_analysis_of_worm_gears_Part_1_Theoretical_formulation)>. Acesso em: 15 de junho. 2021

SILVA, Edna Lúcia da.; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. rev. atual. – Florianópolis: UFSC, 2005.

SILVA JÚNIOR, J. J. DA. **Análise de óleos lubrificantes sob a ótica da termografia em ensaios de atrito cisalhante**. 2017. 166 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2017.

SINATORA, Amilton. **Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte**. 2005. 33 p. Erudição (Concurso para titular do Departamento de Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

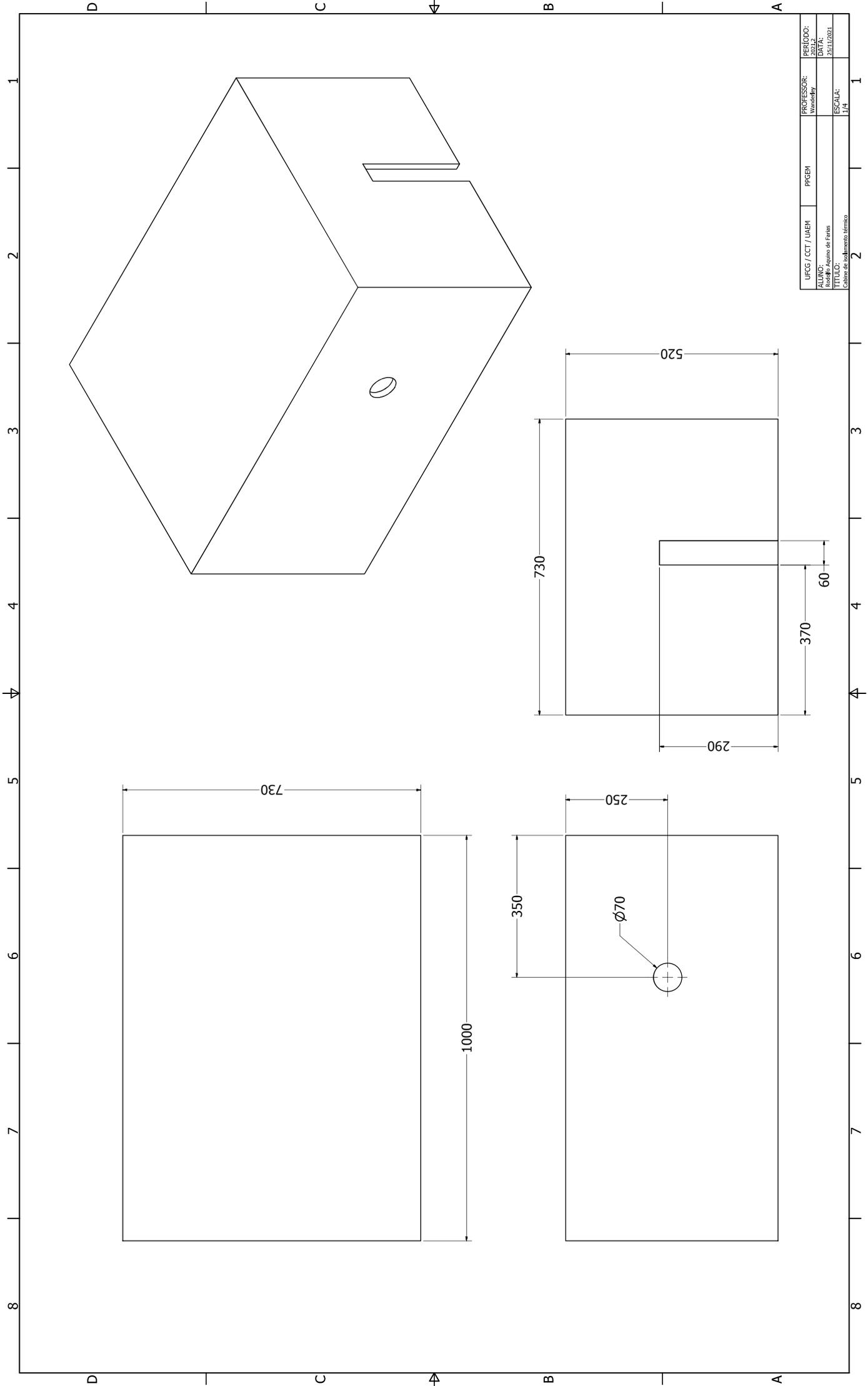
SOUSA, Harlan Ellison Araújo de Sousa. **Projeto de uma caixa de Redução fixa para veículo mini baja do IFPB**. 2011. 122 p. Monografia (Tecnólogo em Automoção Industrial) - Instituto Federal da Paraíba – IFPB, João Pessoa, 2011.

VIANA, Herbert Ricardo Garcia. **PCM, planejamento e controle de manutenção**. Rio de Janeiro: Qualitymark Ed., 2002.

WAQAR, Tayyab; DEMETGUL, Mustafa. **Thermal analysis MLP neural network based fault diagnosis on worm gears**. Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Technology, Marmara University, Goztepe, Istanbul, Turkey, 2016. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/297588086\\_Thermal\\_Analysis\\_MLP\\_Neural\\_Network\\_Based\\_Fault\\_Diagnosis\\_on\\_Worm\\_Gears](https://www.researchgate.net/publication/297588086_Thermal_Analysis_MLP_Neural_Network_Based_Fault_Diagnosis_on_Worm_Gears)>. Acesso em: 18 de junho. 2021.

## APÊNDICE I

Projeto mecânico da cabine de isolamento térmica em isopor e EVA para termografia.



UFGG / CCT / UAEM	PROFESOR:	PERIODO:
	Asistiendo	Quinta
ALUNO:		FECHA:
Rodrigo Aquino del Fresno		23/11/2021
TITULO:	ESCALA:	
Cable de aislamiento térmico	1/4	

2 1

3

4

4

5

6

7

8

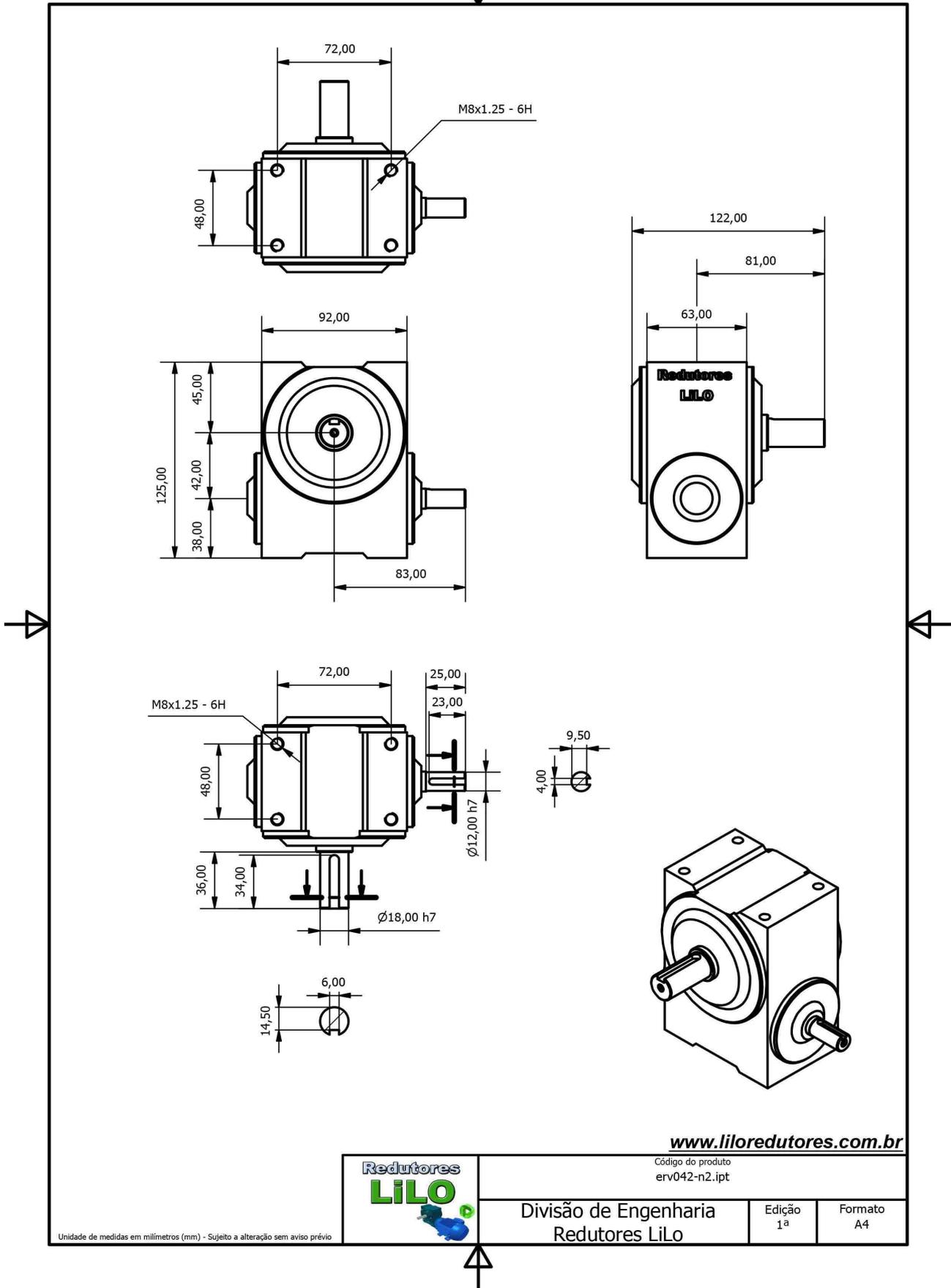
## APÊNDICE II

Informações detalhadas sobre o redutor mecânico LILO EVR-042-n2.

# Redutores LiLO

Descrição do Código do Redutor de Velocidade	
ERV042-12-N2-Pos1-X-71/B3D/0,5cv/4P	Código
Redutor de velocidade do tipo coroa e rosca sem fim	ERV
Distancia de Centro entre a entrada e a saída do redutor	<b>042</b>
Redução	<b>12</b>
Redutor com eixo de entrada maciço e eixo de saída maciço a esquerda	<b>N2</b>
Posição de instalação do motoredutor	Pos1
Redutor não possui Flange de fixação	X
Carcaça do motor a trabalhar com o redutor	71
Forma construtiva do Motor a trabalhar com o redutor	B3D
Potência do Motor a trabalhar com o redutor (cv)	<b>0,5</b>
Quantidade de Polos do Motor a trabalhar com o redutor	4P
Quantidade de dentes	24
Dados Técnicos do Redutor de Velocidade	
Rotação na entrada do redutor	1720
Redução	12
Rotação na saída do redutor	143
Potência do motor que vai acionar o redutor (cv)	0,5
Torque na saída do redutor	16,3Nm (1,7kgfm)
Carga que o redutor consegue erguer com diâmetro de 100 milímetros na saída (Kg)	33
Carga Radial que o redutor suporta (Kg)	160
Carga Axial que o redutor suporta (Kg)	80
Esse redutor de velocidade pode trabalhar com até 1800rpm de entrada	sim
Esse redutor pode sofrer até 10 arranques por hora	Sim
Esse redutor pode trabalhar até 8 horas por dia ininterrupto	Sim
Fator de serviço trabalhando com motor de 0,5cv	1,40
Viscosidade do óleo utilizado no redutor em temperatura de até 40°C DIN51519	460
Quantidade de óleo (Litros)	0,15
Rendimento	0,666
Peso aproximado do redutor (Kg)	5
<b>*Nossos produtos são fabricados especificamente para cada cliente, não possibilitando a troca ou devolução</b>	

Desenho Dimensional (PDF)



Unidade de medidas em milímetros (mm) - Sujeito a alteração sem aviso prévio



[www.liloredutores.com.br](http://www.liloredutores.com.br)

Código do produto  
erv042-n2.ipt

Divisão de Engenharia  
Redutores LILo

Edição  
1ª

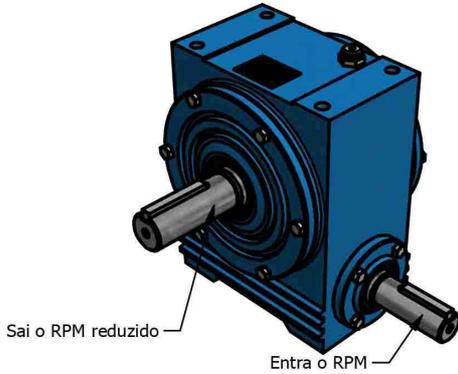
Formato  
A4

Posições que o Redutor pode ser Instalado ( Posição Escolhida foi a Pos1 )

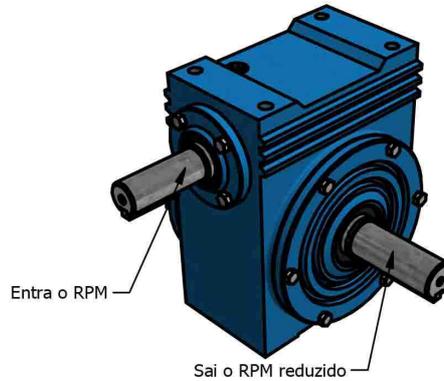


# ESTE REDUTOR PODE TRABALHAR NESSAS POSIÇÕES

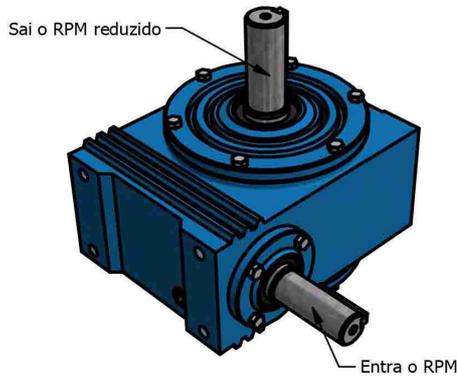
**Posição 1**



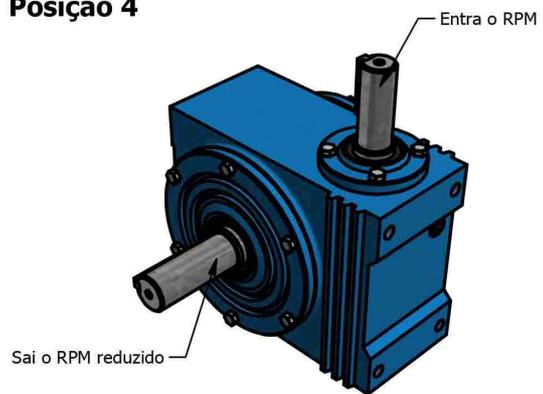
**Posição 2**



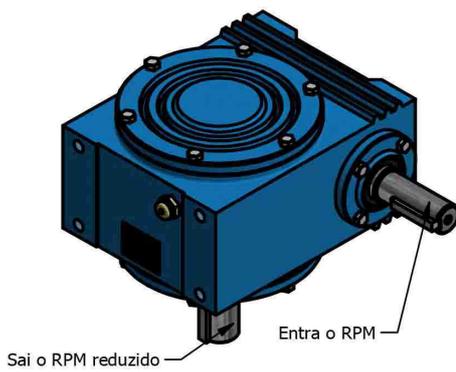
**Posição 3**



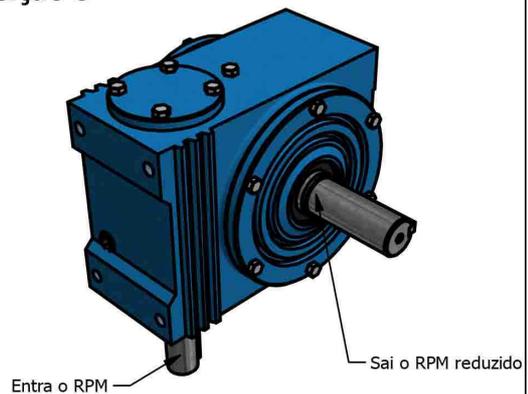
**Posição 4**



**Posição 5**



**Posição 6**



[www.liloredutores.com.br](http://www.liloredutores.com.br)



Unidade de medidas em milímetros (mm) - Sujeito a alteração sem aviso prévio

Código do produto  
ERV- N2

Divisão de Engenharia  
Redutores LiLO

Edição  
1ª

Formato  
A4

