

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE – FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA TOMADA DE DECISÃO EM
RELAÇÃO AO DESGASTE DE UM DIGESTOR PREVENDO A SUA VIDA ÚTIL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MATHEUS DUARTE GUTIERRES

RIO GRANDE, RS

2023

MATHEUS DUARTE GUTIERRES

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA TOMADA DE DECISÃO EM
RELAÇÃO AO DESGASTE DE UM DIGESTOR PREVENDO A SUA VIDA ÚTIL**

Dissertação de mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do Rio
Grande-FURG como requisito para obtenção
do título de “Mestre em Engenharia
Mecânica” – Área de Concentração:
Engenharia de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Leonardo de Carvalho
Gomes

RIO GRANDE, RS

2023

Ficha Catalográfica

G984d Gutierres, Matheus Duarte.

Desenvolvimento de um sistema para tomada de decisão em relação ao desgaste de um digestor prevendo a sua vida útil / Matheus Duarte Gutierres. – 2023.

77 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2023.

Orientador: Dr. Leonardo de Carvalho Gomes.

1. Regressão linear 2. Digestores de penas 3. Disponibilidade
4. Fabricação mecânica 5. Tomada de decisão 6. Manutenção
7. Manutenção preditiva I. Gomes, Leonardo de Carvalho II. Título.

CDU 621

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec



Ata nº 10/2023 da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos vinte e sete dias do mês de julho de dois mil e vinte e três, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às dezesseis horas, online via web conferência, a que se submeteu o mestrando **MATHEUS DUARTE GUTIERRES**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Simulação e controle de processos de fabricação, com o seguinte título: **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA TOMADA DE DECISÃO EM RELAÇÃO AO DESGASTE DE UM DIGESTOR PREVENDO A SUA VIDA ÚTIL**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Leonardo de Carvalho Gomes, Luciano Volcanoglo Biehl, e o convidado Fernando Henrique Lermen sob a presidência do Professor Leonardo de Carvalho Gomes. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Leonardo de Carvalho Gomes: APROVADO
2. Luciano Volcanoglo Biehl: APROVADO
3. Fernando Henrique Lermen: APROVADO

Foi concedido um prazo de 30 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. _____	 Documento assinado digitalmente LEONARDO DE CARVALHO GOMES Data: 27/07/2023 16:34:01-0300 Verifique em https://validar.itl.gov.br	_____
CPF: 885669350-04	 Documento assinado digitalmente LUCIANO VOLCANOGLO BIEHL Data: 27/07/2023 16:41:21-0300 Verifique em https://validar.itl.gov.br	_____
2. _____	 Documento assinado digitalmente FERNANDO HENRIQUE LERMEN Data: 27/07/2023 16:45:08-0300 Verifique em https://validar.itl.gov.br	_____
CPF: 575195100-00		
3. _____		
CPF: 090244619-36		
Matheus Duarte Gutierres: _____	 Documento assinado digitalmente MATHEUS DUARTE GUTIERRES Data: 28/07/2023 16:12:14-0300 Verifique em https://validar.itl.gov.br	_____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, primeiramente, à minha família que sempre esteve ao meu lado ao longo de toda minha trajetória. Dedico também, aos meus amigos próximos, os quais me deram suporte nos momentos difíceis, principalmente nos últimos três anos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ewerton Freitas Gutierres e Maira Marlene Duarte Gutierres, que sempre me ofereceram suporte, não apenas em minha trajetória acadêmica, mas ao longo de toda a minha vida. Por mais distante que eu tenha ido, sempre tive um lar para onde voltar.

À minha irmã e melhor amiga, Andressa Duarte Gutierres, que com seu amplo conhecimento em gramática, inglês e metodologia científica, auxiliou-me na montagem e estruturação do meu trabalho.

À minha família, especialmente Juliana Silva Cabreira e Adriana Silva Cabreira, que estiveram ao meu lado desde o meu primeiro dia de aula na infância até a defesa da minha dissertação.

À FURG, em particular à Escola de Engenharia e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, por nunca terem fechado as portas para mim, sempre me acolhendo quando busquei apoio. Como costumo dizer, a educação pública salva e transforma vidas.

Ao professor Dr. Leonardo de Carvalho Gomes, pelos ensinamentos não apenas acadêmicos, mas também pela mentoria para a vida, mostrando-se incansável ao longo de todo o programa de pós-graduação. Gratidão que não consigo expressar em palavras.

Ao professor Dr. Luciano Volcanoglo Biehl, por ter me apresentado o programa de pós-graduação e por manter as portas da universidade e da vida acadêmica abertas para mim.

Ao professor Dr. Darci Luiz Savicki, que me ofereceu suporte nas análises estatísticas relacionadas à aplicação da regressão linear como linha de tendência em minha pesquisa.

Aos colegas da empresa onde a pesquisa foi realizada, que possibilitaram a aplicação prática do trabalho. Em particular, ao então Supervisor de Planejamento e Controle da Manutenção, William Paulo Roncaglio, que me concedeu autonomia para o desenvolvimento e implementação do sistema.

RESUMO

O presente trabalho aborda a aplicação da regressão linear como uma ferramenta de apoio à tomada de decisões, com o intuito de otimizar a disponibilidade dos digestores de penas em uma fábrica de farinhas e gorduras. A pesquisa foi conduzida em uma unidade frigorífica de grande porte, onde ocorre o abate diário em torno de 420.000 aves. Observou-se que a indisponibilidade produtiva dos digestores de penas afeta significativamente a capacidade produtiva de farinha de penas, especialmente devido a reprovações durante as inspeções da Norma Regulamentadora 13 (NR-13). A retirada de operação dos digestores é desencadeada por reprovações imprevistas de componentes durante as inspeções, devidas à detecção de pontos com baixa espessura durante as inspeções, principalmente os tampos. Em caso de reprovação, o processo completo para a substituição de um tampo é relativamente longo, podendo se estender por até seis meses. Nesse contexto, o objetivo da presente pesquisa é demonstrar que por meio da utilização da regressão linear, enquanto ferramenta, é possível prever o desgaste dos componentes dos digestores, permitindo intervenções de forma preditiva. Para atingir esse objetivo, foi criado e implementado um sistema de banco de dados para registrar medições de espessura ao longo do tempo, utilizando a regressão linear para analisar essas medições e prever a vida útil dos componentes, especialmente os tampos. Os resultados obtidos confirmam a eficácia da regressão linear enquanto ferramenta, a qual revelou-se crucial para a estratégia de manutenção da referida fábrica em 2022. A análise das curvas de tendência geradas pelo sistema embasou decisões relacionadas à substituição de tampos, evitando perdas de produção e mantendo a capacidade produtiva nominal da fábrica ao longo do ano. Isso demonstra a viabilidade da aplicação da regressão linear como uma ferramenta valiosa para monitorar o desgaste de equipamentos, com potencial para ser usada em outros processos e equipamentos, resultando em uma gestão de manutenção mais eficiente e econômica. Assim sendo, este estudo apresenta uma abordagem inovadora para lidar com a questão da indisponibilidade dos digestores de penas, com resultados consistentes, que não apenas preservaram a capacidade produtiva de uma fábrica de farinhas e gorduras, mas também, esses resultados oferecem oportunidades de melhorias para os processos de manutenção em outros ramos da indústria.

Palavras-chave: regressão linear, digestores de penas, disponibilidade, fabricação mecânica, tomada de decisão, manutenção, manutenção preditiva.

ABSTRACT

The present study explores the application of linear regression as a decision support tool to optimize the availability of feather digesters in a flour and fat factory. The research was conducted in a large-scale protein processing unit with a daily slaughter of approximately 420,000 grillers. A notable impact on the productive capacity of feather flour resulted from the unavailability of these digesters, particularly due to the failure during inspections in accordance with The Regulatory Standard 13 (NR-13). Low thickness, predominantly observed in lid components, led to the unexpected withdrawal of the digesters from operation. In case of rejection, the complete process for replacing a lid is relatively lengthy, extending up to six months. In this context, the research aims to demonstrate that the utilization of linear regression as a tool enables the predictive assessment of digester component wear, allowing preventive interventions. To achieve this objective, a database system was developed and implemented to record thickness measurements over time. Linear regression was then employed to analyze these measurements and predict the remaining lifespan of components, especially the lids. The results confirm the effectiveness of linear regression as a crucial tool for the maintenance strategy of the factory in 2022. The analysis of trendlines generated by the system supported decisions related to lid replacements, preventing production losses and maintaining the nominal production capacity of the factory throughout the year. This underscores the viability of linear regression as a valuable tool for monitoring equipment wear, with the potential for broader application in various processes and equipment, leading to more efficient and cost-effective maintenance management. Therefore, this study presents an innovative approach to addressing the issue of feather digester unavailability, yielding consistent results that not only preserved the production capacity of a flour and fat factory but also offer opportunities for improvement in maintenance processes across diverse industrial sectors.

Keywords: linear regression, feather digesters, availability, mechanical manufacturing, decision support, maintenance, predictive maintenance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fontes dos serviços de manutenção.....	21
Figura 2 - Equação linear para mais de dois pontos medidos.....	23
Figura 3 - Digestor de penas	26
Figura 4 - Principais componentes de um digestor	27
Figura 5 - Fluxograma de inspeção em recipientes sob pressão	30
Figura 6 - Pontos de medição de espessura (tampos e costado)	31
Figura 7 - Capacidade nominal FFG: Meta x Realizado (ton) em 2020	35
Figura 8 - Etapas da pesquisa	37
Figura 9 - Medições de espessura das inspeções de 2019 e 2020	40
Figura 10 - Relacionamento entre tabelas de um banco de dados.....	43
Figura 11 - Pontos de controle para medição de espessura	48
Figura 12 - Campos e relacionamento das tabelas do Sistema de Monitoramento de Digestores	49
Figura 13 - Formulário de login	50
Figura 14 - Tela inicial	51
Figura 15 - Formulário de seleção de equipamento.....	51
Figura 16 - Formulário de inserção de dados.....	52
Figura 17 - Ranking de desgaste de digestores.....	52
Figura 18 - Formulário de ranking de criticidade: detalhes última condição	53
Figura 19 - Tendência de desgaste do ponto de controle com regressão linear.....	53
Figura 20 - Dados da última inspeção do Digestor de Penas 01	55
Figura 21 - Tendência de desgaste do ponto 30 do Digestor de Penas 01	56
Figura 22 - Capacidade nominal FFG: Meta x Realizado (ton) em 2020	56
Figura 23 - Capacidade nominal FFG: Meta x Realizado (ton) em 2021	57
Figura 24 - Capacidade nominal FFG: Meta x Projeção (ton) em 2022	57
Figura 25 - Capacidade nominal FFG: Realizado de 2020 a 2022	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Nível de correlação pelo método de Pearson	25
Tabela 2 - Digestores de penas: Informações cadastrais	47
Tabela 3 - Digestores de penas: Dispositivos de segurança	47
Tabela 4 - Digestores de penas: Espessura de componentes e parâmetros de condição	48
Tabela 5 - Digestores de penas: Coeficiente de Pearson para regressão linear de perda de espessura	54
Tabela 6 - Capacidade produtiva da Fábrica de Farinhas e Gorduras antes e depois da implementação do Sistema de Monitoramento de digestores	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	OBJETIVO GERAL.....	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	BREVE HISTÓRICO DA MANUTENÇÃO.....	18
2.2	O PAPEL DA INSPEÇÃO DENTRO DO CONTEXTO DA MANUTENÇÃO..	20
2.3	REGRESSÃO LINEAR: UMA FERRAMENTA ESTATÍSTICA PARA ANÁLISE DADOS.....	22
2.4	AJUSTE DE CURVAS COM EQUAÇÕES LINEARES	23
2.4.1	Coeficiente de correlação linear de Pearson.....	24
2.4.2	Coeficiente de determinação	25
2.5	DIGESTORES DE PENAS: CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS E DE OPERAÇÃO	26
3	METODOLOGIA.....	33
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA.....	34
3.2	CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO..	35
3.3	ETAPAS DA PESQUISA	37
3.3.1	Levantamento de informações pertinentes para a criação de um sistema de monitoramento de digestores	37
3.3.1.1	Cadastro de Digestores.....	38
3.3.1.2	Dados de NR-13.....	38
3.3.1.3	Dados de cadastro complementares.....	39
3.3.1.4	Parâmetros de condição.....	39
3.3.1.5	Estratégia de monitoramento de condição.....	39
3.3.2	Definição dos pontos de controle para medição de espessura de componentes de digestores	40
3.3.3	Construção do sistema de monitoramento de digestores	41
3.3.3.1	Banco de dados.....	41
3.3.3.2	Interface gráfica.....	44
3.3.4	Análise da eficácia do sistema como ferramenta de apoio à tomada de decisões.....	45
4	RESULTADOS.....	46
4.1	LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES PERTINENTES PARA A CRIAÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO DE DIGESTORES.....	46
4.1.1	Dados cadastrais dos digestores.....	46

SUMÁRIO

4.1.2	Parâmetros de condição.....	47
4.2	DEFINIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE PARA MEDIÇÃO DE ESPESSURA DECOMPONENTES DE DIGESTORES.....	48
4.3	CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO DE DIGESTORES.....	48
4.3.1	Tabelas e relacionamentos.....	49
4.3.2	Interface Gráfica.....	50
4.4	ANÁLISE DA EFICÁCIA DO SISTEMA COMO FERRAMENTA DE APOIO À TOMADA DE DECISÕES.....	54
4.4.1	Utilização da ferramenta implementada para suporte na tomada de decisão.....	55
4.4.2	Perda de disponibilidade evitada pela utilização da ferramenta como suporte para análise de dados.....	56
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	59
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	63
7	REFERÊNCIAS.....	65
7.1	REFERÊNCIAS NOMINAIS.....	65
7.2	REFERÊNCIAS POR ESTRATO.....	68
7.3	REFERÊNCIAS POR QUALIS.....	68
7.4	REFERÊNCIAS POR DATA DOS ARTIGOS	69
ANEXOS		70
ANEXO 1 – RELATÓRIO DE INSPEÇÃO NR-13 ANTES DA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA		70
ANEXO 2 – RELATÓRIO DE INSPEÇÃO NR-13 APÓS DA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA		72
APÊNDICES.....		74
APÊNDICE 1 – RANKING DE CRITICIDADE DO SISTEMA, COM CURVAS DE REGRESSÃO LINEAR		74
APÊNDICE 2 – ENTREGA DO CERTIFICADO DE DESTAQUE PELA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO POR REGRESSÃO LINEAR.....		75

1 INTRODUÇÃO

Em um mundo com a população humana na casa dos 7,8 bilhões (UNITED STATES CENSUS BUREAU, 2023), é quase intuitivo pensar na importância da utilização de aves como fonte de proteína animal. Somente no Brasil, em 2019, foram produzidas 13,245 milhões de toneladas de carne de frango (VITALI DUMINELLI et al., 2023). Por conta da gigante escala da atividade frigorífica, existe uma geração de toneladas de subprodutos oriundas do processo de abate, tais como, vísceras, penas, sangue e carcaças condenadas (NUNES, 2003). Estes resíduos sólidos impactam no meio ambiente por meio de efluentes e emissões gasosas (BERETA, RODRIGUES e REBELATO, 2022).

No contexto atual, onde o Brasil ocupa a posição de terceiro maior produtor de frango de corte (BERETA, RODRIGUES E REBELATO, 2022), as fábricas de farinhas e gorduras assumem um papel de destaque. Elas se revelam como uma solução vantajosa para o tratamento dos resíduos gerados pelo abate de aves, sendo responsáveis por processar os materiais descartados pelas unidades de abate (FERROLI, 1999). Além de mitigar os impactos ambientais associados a esses resíduos, essas fábricas têm a capacidade de produzir itens de alto valor agregado, tais como, farinhas com teores elevados de proteína e óleos (FERROLI, 1999).

Em relação aos produtos gerados, é relevante destacar a farinha de penas, que chama a atenção não apenas devido à grande quantidade de matéria-prima proveniente dos abatedouros, mas também devido ao seu conteúdo significativo de proteína bruta (SCAPIM et al., 2003).

Dentro do processamento de farinha de penas, o equipamento mais crítico é o digestor de penas, tanto para as menores fábricas quanto para as mais completas e automatizadas (FERROLI et al., 2001). Este equipamento, gargalo na produção, trata-se de um vaso cilíndrico, encamisado e que opera sob pressão. Além de ser o maior responsável pela qualidade do produto em todo o processo, é um equipamento crítico em relação à segurança, podendo ocasionar graves acidentes.

A empresa que motivou a presente pesquisa tem enfrentado transtornos devido à indisponibilidade de seus digestores. Por tratar-se de vasos de pressão, esses equipamentos estão enquadrados na Norma Regulamentadora 13 (NR-13) e são periodicamente inspecionados. Durante a inspeção, são feitas aferições de espessura e, caso seja encontrada uma medida inferior à mínima admissível (apontada em seu prontuário), o equipamento é retirado de operação.

No ano de 2020, a empresa teve sua capacidade produtiva de farinha de penas diminuída em 31,2 toneladas devido a condenação de dois digestores, durante as inspeções de NR-13. Esse volume representou um prejuízo de R\$ 79.560,00. Já em 2021, outro digestor saiu de operação inesperadamente, permanecendo dez meses fora de operação. Isso gerou a diminuição de 26 toneladas de farinha de penas e um prejuízo equivalente a R\$ 66.300,00.

Durante o período de experiência profissional do pesquisador como Engenheiro de Confiabilidade na Fábrica de Farinhas e Gorduras, objeto de estudo de caso da presente pesquisa, observou-se que os digestores de penas eram condenados durante as inspeções anuais de NR-13 de maneira imprevista, por conta da perda de espessura de componentes. Em caso de condenação do equipamento, o tempo mínimo para recolocá-lo em operação é cerca de seis meses. Com isso, há um grande impacto na produção de farinha de penas, devido à perda de capacidade produtiva derivada da retirada do referido equipamento da linha de produção.

Diante desse cenário, a presente pesquisa propõe o desenvolvimento de um sistema de monitoramento da perda de espessura dos componentes de digestores, utilizando a ferramenta estatística de regressão linear no intuito de prever falhas e, conseqüentemente, diminuir os prejuízos financeiros da empresa.

Assim, pode ser possível que a empresa encaminhe a fabricação e substituição dos componentes antes de atingirem sua espessura mínima, evitando as paradas dos equipamentos por longos períodos.

Tendo em vista que a regressão linear é uma linha de tendência que minimiza os desvios quadrados dos dados reais da amostra (MEDEIROS e BIANCHI, 2009), a curva de regressão pode ser capaz de demonstrar quando os componentes podem chegar na espessura mínima. Esses dados são capazes de fornecer suporte à manutenção, permitindo que se atue antes que esses componentes atinjam seus limites de vida útil, garantindo uma maior disponibilidade do equipamento, estabilidade do processo e mitigando riscos à segurança operacional.

Logo, o que se busca com a seguinte pesquisa é propor a utilização de um modelo de regressão linear para previsão da data limite de vida útil de componentes de digestores, permitindo que essas peças sejam substituídas antes de atingirem a espessura mínima admissível.

O presente trabalho é composto por seis capítulos, iniciando-se pela introdução, seguindo para o referencial teórico, para a metodologia, para os resultados obtidos, para a discussão dos resultados e, por fim, para as conclusões e recomendações de trabalhos futuros. A pesquisa em questão torna-se relevante tanto do ponto de vista da manutenção industrial, quanto do ponto de vista acadêmico.

Do ponto de vista da indústria, a pesquisa aborda os impactos produtivos e econômicos da indisponibilidade de digestores. Por meio da implementação da regressão linear, busca-se prever os limites de vida útil dos componentes dos digestores. Isso é importante para a tomada de decisões relacionadas à manutenção e disponibilidade desses componentes, visando mitigar os impactos negativos na produção e nos resultados financeiros da companhia.

Do ponto de vista acadêmico, esta pesquisa oferece uma contribuição ao propor uma ferramenta complementar para a gestão de ativos. Essa ferramenta é fundamentada em um modelo estatístico de monitoramento do desgaste de componentes, permitindo a projeção dos seus limites de vida útil. A metodologia empregada utiliza a regressão linear para criar linhas de tendência. Esse enfoque representa um avanço no campo da análise de dados e desempenha um papel importante no apoio à tomada de decisões relacionadas à manutenção e disponibilidade de equipamentos. Além disso, é importante ressaltar que essa

abordagem pode ter potencial para ser aplicada em diversos outros processos produtivos, ampliando ainda mais seu alcance e utilidade.

A confiabilidade dos resultados obtidos na pesquisa é fundamental para embasar teoricamente as práticas de manutenção e gestão dos digestores. Isso abre precedentes até mesmo para estender o uso de regressão linear para outros tipos de processos produtivos, desde que comprovada a correlação dos dados por métodos estatísticos.

Assim, a pesquisa possui relevância tanto prática, ao atender às necessidades da indústria, em relação aos impactos produtivos e econômicos quanto acadêmica, ao aplicar a regressão linear como ferramenta para prever os limites de vida útil e auxiliar a tomada de decisões de manutenção e disponibilidade. O presente trabalho compila conceitos de manutenção preditiva, banco de dados e análise estatística em um único sistema.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do presente trabalho é demonstrar a viabilidade da regressão linear como ferramenta de auxílio na tomada de decisão referente a vida útil de equipamentos, de modo a evitar a perda de disponibilidade e, conseqüentemente, mitigar as reduções da capacidade produtiva em uma Fábrica de Farinhas e Gorduras.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A fim de alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- a) Coleta de dados referentes aos impactos da indisponibilidade de digestores no processo de produção da farinha de penas;
- b) Proposta de utilização da regressão linear como ferramenta de análise de dados a fim de evitar impactos na disponibilidade de digestores para a produção em uma Fábrica de Farinhas e Gorduras de um frigorífico;

- c) Implementação do sistema de regressão linear proposta para acompanhamento do desgaste de componentes dos digestores em função do tempo;
- d) Análise dos resultados para a verificação de efetividade do sistema de acompanhamento da perda de espessura, criado como ferramenta de suporte à tomada de decisão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo aborda sobre manutenção, inspeção em manutenção, regressão linear e digestores de penas. Estes tópicos formam o referencial teórico da presente pesquisa.

2.1 BREVE HISTÓRICO DA MANUTENÇÃO

A palavra “Manutenção” tem sua origem no latim *manus tenere*, que pode ser traduzido como “manter o que se tem” (VIANA, 2002). Pode-se dizer que a manutenção está presente na história humana “desde que começamos a manusear instrumentos de produção” (VIANA, 2002).

Com o começo da Primeira Revolução Industrial no final do século XVIII, a capacidade humana de produzir bens de consumo ampliou-se para proporções maiores (VIANA, 2002). Já no fim do século XIX, com a mecanização das indústrias, surgiu a necessidade dos primeiros reparos em equipamentos, os quais inicialmente eram executados pelos próprios operadores (OTANI e MACHADO, 2008).

Já em 1914, com a combinação entre o início da Primeira Guerra Mundial e a implantação da produção em série, instituída por Ford, as fábricas passaram a sentir cada vez mais a necessidade de criar equipes com a capacidade de efetuar reparos em máquinas operatrizes no menor tempo possível (OTANI e MACHADO, 2008).

Assim, a fim de atender à operação, nasceu um órgão subordinado com o objetivo básico de execução da manutenção. Nascera o que conhecemos hoje como manutenção corretiva (OTANI e MACHADO, 2008).

Conforme os anos avançaram, já na década de 30, com as movimentações relacionadas ao início da Segunda Guerra Mundial, surgiu a necessidade de aumento da velocidade e dos volumes de produção. Para tanto, a manutenção passou a ter cada vez mais importância.

Além de se preocupar com a correção de falhas, a alta administração industrial passou a dar enfoque em ações para evitar que elas ocorressem (OTANI e MACHADO, 2008). Chegou-se a um ponto onde a manutenção se tornou tão importante quanto a operação.

Com o término da Segunda Guerra Mundial até o início da década de 60, houve modificações nos processos produtivos, motivadas pela pressão do mercado, com grandes demandas para todos os tipos de produtos. Isso levou à mecanização

dos equipamentos e a instalação de áreas industriais (NOGUEIRA, GUIMARÃES e DA SILVA, 2012).

Seguindo uma ordem cronológica, a partir da década de 1930, pode-se dividir a evolução da Manutenção em quatro gerações (PINTO e XAVIER, 2001).

A Primeira Geração corresponde ao período que antecede à Segunda Guerra Mundial. Um período sem elevada mecanização dos processos industriais, em que os equipamentos não eram complexos e costumavam ser superdimensionados. Não havia grandes exigências por produtividade, acreditava-se que as falhas e quebras ocorriam pelo fato dos equipamentos se desgastarem com o passar dos anos (PINTO e XAVIER, 2001). Sendo assim, a ação da manutenção dava de forma corretiva e não planejada.

Já o período pós Segunda Guerra Mundial, entre as décadas de 1950 e 1970, considera-se como a Segunda Geração. Por conta dos conflitos, a demanda pelos mais variados tipos de produtos cresceu de forma significativa, enquanto a disponibilidade de mão de obra industrial diminuiu. Por consequência, houve o aumento da mecanização e da complexibilidade das instalações industriais.

Desta maneira, o tempo de disponibilidade de máquinas em operação passou a ser uma necessidade, conceituando-se que falhas em equipamentos poderiam ser evitadas (PINTO e XAVIER, 2001). Concebia-se, assim, o conceito de Manutenção Preventiva, em que são tomadas ações nos equipamentos em intervalos fixos, com o intuito de evitar quebras.

A Terceira Geração, considerada da década de setenta em diante. Paradas de produção passaram a derivar no aumento de custos e no decréscimo na qualidade dos produtos. Crescera o conceito de produção *just in time*: produzir, transportar e comprar na hora certa, o qual tornava-se uma tendência mundial (PINTO e XAVIER, 2001). Por conta dos estoques reduzidos, interrupções de produção e/ou entregas poderiam ocasionar a paralização de uma fábrica inteira.

Consequentemente, com o aumento da exigência por alta disponibilidade, fortificou-se o conceito Manutenção Preditiva, em que, ao invés de ações em intervalos de tempo fixos, passou a intervir em equipamentos baseando-se em técnicas de monitoramento de condição. A informática passou a ser uma grande aliada da manutenção. A utilização de *softwares* passou a auxiliar no planejamento

e controle da manutenção, ao passo que a confiabilidade passou a assumir uma posição de destaque (PINTO e XAVIER, 2001).

Atualmente, na Quarta Geração, mantem-se as expectativas da geração anterior. O principal indicador de performance da Manutenção segue sendo a disponibilidade, a qual pode ser definida como a capacidade de produção ininterrupta durante o tempo que a planta está disponível para a operação (PINTO e XAVIER, 2001), ao passo que as intervenções por manutenção corretiva passam a ser o termômetro de ineficiência da Manutenção.

No contexto da Engenharia de Manutenção, a confiabilidade segue sendo o maior objetivo, implementando-se métodos de análise de falhas, com o objetivo de eliminar a causa raiz de quebras, de forma a intervir-se cada vez menos nos equipamentos durante o processo produtivo. Técnicas de Inspeção e Manutenção Preditiva vêm sendo cada vez mais utilizadas, tomando o lugar de intervenções preventivas.

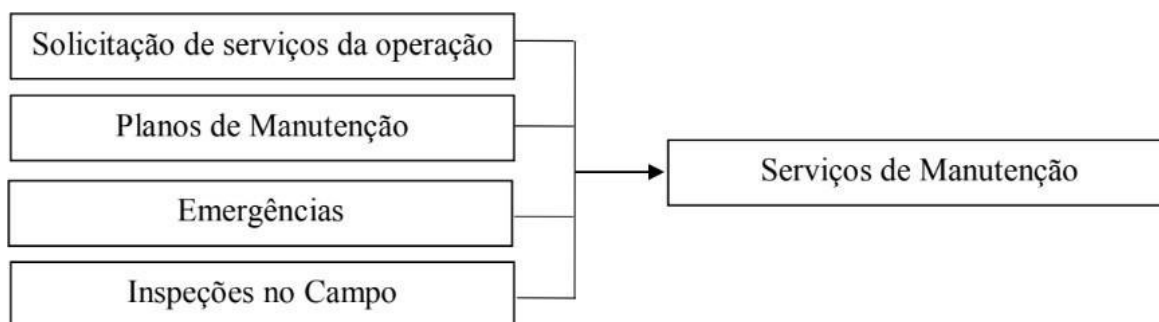
2.2 O PAPEL DA INSPEÇÃO DENTRO DO CONTEXTO DA MANUTENÇÃO

Em um sistema de manutenção organizado, com equipamentos e processos identificados, os fluxos para solicitações de serviços devem seguir regras organizacionais eficientes, a fim de manter a qualidade do atendimento das demandas de manutenção.

As solicitações de atendimento de manutenção têm várias origens, principalmente oriundas do setor de produção. Elas podem surgir devido à detecção de melhorias necessárias, paradas de produção inesperadas ou condições inseguras de operação.

De acordo com as recomendações de fabricantes e estudos de setores como Engenharia de Manutenção, há os planos preventivos, que definem a frequência de substituição de componentes. Dedicado à detecção de falhas potenciais, há as denominadas inspeções de campo, realizadas pelo Inspetor de Equipamentos. A Figura 1, a seguir, ilustra as diferentes fontes de solicitações de serviço de manutenção

Figura 1 - Fontes dos serviços de manutenção



Fonte: Viana (2002)

Dentre as fontes de Solicitação de Serviços (SS), podemos destacar as Inspeções de Campo. Por meio da realização de Rotas de Inspeção, o Inspetor de Equipamentos realiza a análise de uma série de itens de um determinado grupo de ativos. No caso de detectar alguma avaria e/ou sintoma de falha, cria-se uma Ordem de Serviço (OS) e indica sua prioridade. De acordo com a criticidade da OS, realiza-se sua programação para execução (VIANA, 2002).

A função do inspetor de equipamentos é necessária para o setor de manutenção, uma vez que ele pode ser definido como “os olhos da manutenção”.

Conforme o tempo passa, as técnicas “clássicas” de inspeção sensitiva, como avaliação visual e acompanhamento de ruído, vêm cada vez mais dando espaço para o monitoramento preditivo, em que é realizado o acompanhamento sistemático de um parâmetro de condição do equipamento, como intuito de prever uma falha funcional (OTANI e MACHADO, 2008).

Parâmetros como análise de vibrações, taxa de alongamento e perda de espessura em função do tempo vêm sendo utilizados para acompanhamento preditivo de equipamentos. Caso se identifique alterações que possam vir a ser falhas potenciais, a manutenção realiza intervenções no equipamento antes que ocorra a quebra (MARQUES e BRITO, 2019).

Dentre o processo produtivo, de acordo com os parâmetros de processo e de operação de equipamentos, pode-se ter algum fenômeno abrasivo ou ambiental, o qual desgasta a superfície de componentes, de forma que haja uma perda de espessura superficial. Nesse cenário, técnicas de inspeção preditiva, como a

medição de espessura por ultrassom se mostram ótimas alternativas para, por exemplo, medir a espessura de carcaças, tampos de vasos de pressão e tubulações (PINTO e XAVIER, 2009).

O aparelho de ultrassom atua através da geração de um sinal de alta frequência, o qual é emitido a partir de um cabeçote sob a superfície a ser medida. O aparelho lê diretamente o tempo decorrido entre a emissão e a reflexão do sinal, convertendo-o em uma medida de comprimento (PINTO e XAVIER, 2009).

Através de medições de espessura realizadas num determinado intervalo de tempo, pode-se acompanhar a perda de espessura de um componente, gerando o perfil do desgaste. Aliando-se essa técnica de monitoramento com ferramentas estatísticas, como por exemplo a regressão linear, é possível gerar uma ferramenta específica, a qual permite a projeção da vida útil do componente, por meio da geração de uma linha de tendência de desgaste em função do tempo.

2.3 REGRESSÃO LINEAR: UMA FERRAMENTA ESTATÍSTICA PARA ANÁLISE DE DADOS

Para muitas observações dentro do contexto da ciência e da engenharia, são feitos experimentos nos quais grandezas físicas são aferidas e armazenadas. Normalmente, esses registros são denominados de dados ou pontos experimentais (GILAT e SUBRAMANIAM, 2008).

Cientistas e engenheiros podem empregar os dados coletados de diferentes maneiras, como por exemplo, no desenvolvimento ou na avaliação de fórmulas matemáticas (equações) que possam representar o experimento.

Para tanto, são traçadas curvas, nas quais se assume uma forma de equação específica, de modo que os parâmetros dessa equação representem da melhor forma possível o conjunto de dados (GILAT e SUBRAMANIAM, 2008).

Em certas aplicações, os dados experimentais coletados são utilizados para realizar uma estimativa dos valores esperados entre os pontos medidos, em um procedimento o qual chamamos de **interpolação**. Outra possibilidade, é a predição de como esses dados poderiam ser estendidos além do intervalo no qual os pontos foram aferidos, procedimento esse denominado de **extrapolação** (GILAT e SUBRAMANIAM, 2008).

2.4 AJUSTE DE CURVAS COM EQUAÇÕES LINEARES

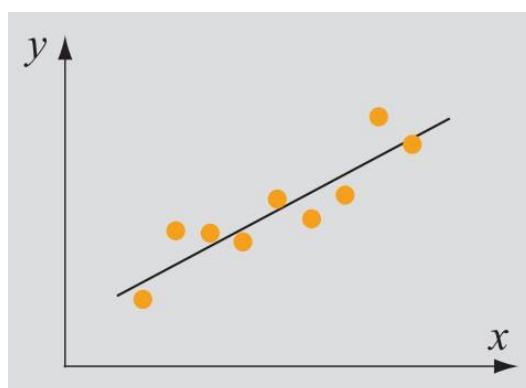
Denomina-se ajuste de curvas o procedimento no qual utiliza-se uma fórmula matemática para produzir uma curva que melhor represente um conjunto de dados (GILAT e SUBRAMANIAM, 2008).

Quando se promove o melhor ajuste de pontos por meio de um polinômio de primeiro grau, trata-se de um ajuste de curva por equação linear, o qual apresenta-se conforme a equação linear 2.1.

$$y = a_1x + a_0 \quad (2.1)$$

Em conjuntos de dados que possuem mais de dois pontos, como é de se esperar, uma reta não pode transpassar por todos os pontos. Nestes casos, as constantes a_1 e a_0 são determinadas de forma que a reta promova o melhor ajuste para os dados como um todo, conforme pode-se observar na Figura 2. Ou seja, determina-se as constantes de forma que a função aproximada obtenha o menor erro possível (GILAT e SUBRAMANIAM, 2008).

Figura 2 - Equação linear para mais de dois pontos medidos



Fonte: GILAT e SUBRAMANIAM (2008)

Entre os pontos coletados (pontos do gráfico da figura acima) e a função aproximada (reta inclinada entre os pontos) há uma diferença, a qual é denominada resíduos (r_i). Para medir o quão essa função é capaz de representar os dados coletados, calcula-se o erro total (E), o qual pode ser obtido através da soma dos quadrados dos resíduos, conforme a equação 2.2.

$$E = \sum_{i=1}^n r_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_1 x_i + a_0)]^2 \quad (2.2)$$

Dessa forma, a regressão linear por mínimos quadrados é um procedimento pelo qual são determinados os coeficientes a_1 e a_0 da função linear $y = a_1 x + a_0$, com o fito de encontrar o melhor ajuste para um conjunto de pontos. Ou seja, de forma que se obtenha o menor erro global possível. (GILAT e SUBRAMANIAM, 2008).

Para obter-se os coeficientes a_1 e a_0 que permitem o melhor ajuste linear da função, utiliza-se a equação do erro total E (2.2) citada anteriormente, através do cálculo de derivadas parciais. Após manipular algebricamente, chega-se à seguinte equação (2.3):

$$a_1 = \frac{nS_{xy} - S_x S_y}{nS_{xx} - (S_x)^2} \quad a_0 = \frac{S_{xx} S_y - S_{xy} S_x}{nS_{xx} - (S_x)^2} \quad (2.3)$$

onde,

$$S_x = \sum_{i=1}^n x_i \quad , \quad S_y = \sum_{i=1}^n y_i \quad , \quad S_{xy} = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad , \quad S_{xx} = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (2.4)$$

Através da determinação da equação de regressão linear, é possível observar o comportamento da função, por exemplo, onde acompanhe-se o desgaste de um componente y_i em função do tempo x_i .

Diante disso, uma vez conhecido o comportamento da função, é possível extrapolar os dados de forma a projetar em quanto tempo o componente irá atingir determinada espessura.

2.4.1 Coeficiente de correlação linear de Pearson

Com a finalidade de avaliar o grau de associação entre duas variáveis, utiliza-se uma ferramenta denominada como análise de correlação, a qual mede a “força” de relacionamento linear entre variáveis x e y (RODRIGUES, 2012).

Tabela 1 - Nível de correlação pelo método de Pearson

<i>r</i>	Nível de correlação
0	Nula
0 a 0,3	Fraca
0,3 a 0,6	Regular
0,6 a 0,9	Forte
0,9 a 1	Muito Forte
1	Plena

Fonte: CALLEGARI-JACQUES (2003)

Segundo a bibliografia de Callegari-Jacques (2003), define-se a força de relação entre duas variáveis de acordo com a proximidade do coeficiente de Pearson a 1, ou seja, quanto mais próximo de 1, maior é a correlação.

2.4.2 Coeficiente de determinação

O coeficiente de determinação (R^2) indica a qualidade de ajuste da regressão obtida em relação aos dados. Mais especificamente, o R^2 explica que um percentual na variação da variável dependente é justificado pela variável independente (BASTOS, GUIMARÃES e SEVERO, 2015). Assim como o coeficiente de Pearson, quanto mais próximo de 1, maior é a representatividade da linha de tendência em relação aos dados da amostra. Para quantificar a relação entre duas variáveis, é utilizado o coeficiente de correlação linear de Pearson (R_{xy}), o qual é dado pela seguinte equação (2.5)

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.5)$$

Onde $\bar{x}$ e $\bar{y}$ são a média das variáveis, obtidas por:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad , \quad \bar{y} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n} \quad (2.6)$$

2.5 DIGESTORES DE PENAS: CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS E DE OPERAÇÃO

No processo de produção da farinha de penas, o digestor é o equipamento mais importante. Além de ser fundamental para a qualidade do produto final, há uma questão ambiental crítica, uma vez que existem vários subprodutos oriundos da atividade frigorífica do setor avícola, como vísceras, penas, sangue, partes e/ou carcaças condenadas (NUNES, 2003).

Além disso, as empresas que atuam no processamento de proteína animal são fortemente pressionadas por rigorosas legislações e políticas ambientais relacionadas ao processamento de produtos não comestíveis (Port. Nº 286, 2018). Nesse cenário, as Fábricas de Farinhas e Gorduras (FFG) ganham uma significativa importância.

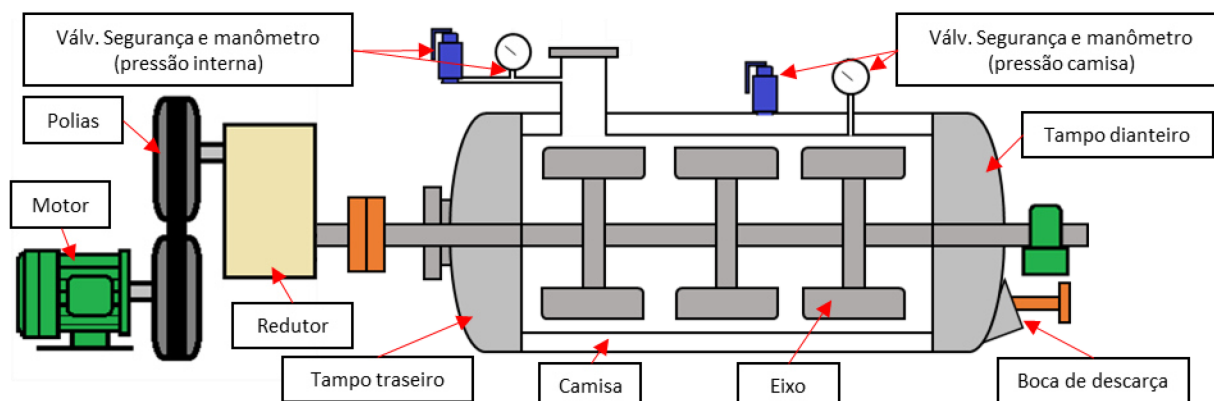
Embora esse equipamento possa variar em tamanho, temperatura de operação e Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA), seu padrão construtivo não costuma variar. Nas figuras a seguir (Figura 3 e 4), pode-se observar os principais componentes de um digestor de penas:

Figura 3 - Digestor de penas



Fonte: O autor (2022)

Figura 4 - Principais componentes de um digestor



Fonte: O autor (2022)

O princípio de funcionamento do digestor é receber vapor em sua camisa e eixo, com o objetivo de transferir calor ao produto processado, no denominado processo de “cozimento”. Devido ao movimento de rotação do eixo, enquanto o equipamento opera, os componentes mecânicos sofrem desgaste pelo processo de abrasão, principalmente os tampos.

Os tampos de digestores são elementos críticos do equipamento. Além de trabalhar pressurizados, devem ser dimensionados levando-se em consideração as características de operação, uma vez que, devido ao movimento rotativo dos eixos no processo de cozimento, passam pelo processo de abrasão. Dentro do projeto de engenharia, os materiais devem ser selecionados para resistir aos esforços dos quais o equipamento será submetido.

Igualmente crítico é o processo de fabricação desses componentes, que passam por etapas de corte e conformação mecânica. Processos de conformação mecânica, de maneira geral, estão entre os mais antigos processos de fabricação envolvendo metais (SCHAEFFER, 2021).

Ao submeterem-se a processos de deformação plástica, chapas metálicas passam por uma série de etapas, sofrendo diferentes níveis de tensão e deformação. Essas etapas, são necessárias para que as chapas atinjam o formato desejado, de acordo com os moldes utilizados (ROCHA et al., 2022).

O processo mais comumente utilizado na fabricação de tampos é a estampagem, no qual a matéria-prima (chapa metálica plana) é transformada na forma geométrica desejada (DA SILVA, 2006) através da presnagem, com um componente denominado punção, em direção à matriz da chapa. Desta forma, obtém-se um tampo moldado na sua forma abaulada.

Se não for bem executado, o processo de estampagem pode gerar diversos tipos de defeitos em uma peça (DA SILVA, 2006). Falhas no projeto dos moldes ou na execução do processo podem gerar concentrações de tensões, as quais podem contribuir para fraturas dúcteis e até mesmo resultando, eventualmente, em rachaduras (PARK et al., 2016).

Já em relação ao fluxo de produção, o digestor é o equipamento que determina a qualidade do produto, através do processo de cozimento. Sob alta temperatura e alta pressão, processa as penas até que ocorra o processo de hidrólise, que consiste na degradação dos filamentos de queratina (raque das penas), a fim de tornar os nutrientes mais solúveis e digeríveis (SINHORINI, 2013). O mau funcionamento do equipamento pode acarretar em um produto de má qualidade, com excesso de umidade ou hidrólise incompleta.

Para um aumento do valor proteico, pode-se adicionar sangue à farinha durante o processo de cozimento. No caso do equipamento estudado, deve-se alimentar o digestor com cerca de 60% do seu volume, equivalente a três toneladas de penas, e então adicionar oitocentos litros de uma mistura de sangue e água. Para que as penas atinjam a hidrólise, deve-se utilizar vapor superaquecido à 130°C de temperatura e pressão de 3 kgf/cm² durante 45 minutos.

Por trabalharem pressurizados e devido a relação pressão x volume > 8, os digestores enquadram-se na Norma Regulamentadora 13 (NR 13) do Ministério do Trabalho e Emprego do Brasil, a qual abrange caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento (Ministério do Trabalho e Emprego, 2022).

Em razão disso, os digestores enquadram-se na categoria de vasos de pressão, de acordo com a NR 13, necessitando de acessórios e dispositivos de segurança, além de ser necessário que sejam inspecionados periodicamente de acordo com os prazos estabelecidos pela referida norma.

A NR-13 tem por objetivo estabelecer as verificações e testes específicos para garantir a segurança e a saúde dos colaboradores, estabelecendo os requisitos mínimos para garantia da integridade estrutural dos equipamentos por ela contemplados (ASSUMPÇÃO e DE CARVALHO, 2021). Para tanto, a mesma define critérios relacionados à instalação, inspeção, operação e manutenção de caldeiras a vapor, vasos de pressão e suas tubulações.

Estão sob abrangência da NR-13:

- a) Todos os equipamentos enquadrados como caldeiras, conforme item 13.4.1.1;
- b) Vasos de pressão cujo produto $P \times V$ seja superior a 8 (oito), onde P é a pressão máxima de operação em kPa e V o seu volume interno em m^3 ;
- c) Vasos de pressão que contenham fluido da classe A, especificados no item 13.5.1.2, alínea "0", independente das dimensões e do produto $P.V$;
- d) Recipientes móveis com $P \times V$ superior a 8 (oito) ou com fluido da classe A, especificados no item 13.5.1.2, alínea "0";
- e) Tubulações ou sistemas de tubulação interligados a caldeiras ou vasos de pressão que contenham fluidos de classe A ou B, conforme item 13.5.1.2, alínea "0" desta NR.

Equipamentos que operam sob pressão requerem muita atenção e responsabilidade. Os prazos para a inspeção interna e externa, para calibração de válvulas e para manômetros devem ser respeitados. Em caso de manutenções, alterações e/ou modificações no vaso, deve ser elaborado um Projeto de Alteração ou Reparo – PAR, o qual deve ser feito nas seguintes situações (Ministério do Trabalho e Emprego, 2022):

- a) Sempre que as condições de projeto forem modificadas;
- b) Sempre que forem realizados reparos que possam comprometer a segurança;

Além disso, o PAR deve (Ministério do Trabalho e Emprego, 2022):

- a) Ser concebido ou aprovado por um Profissional Habilitado – PH;
- b) Determinar materiais, procedimentos de execução, controle de qualidade e qualificação de pessoal;
- c) Ser divulgado para os empregados do estabelecimento que estão envolvidos com o equipamento.

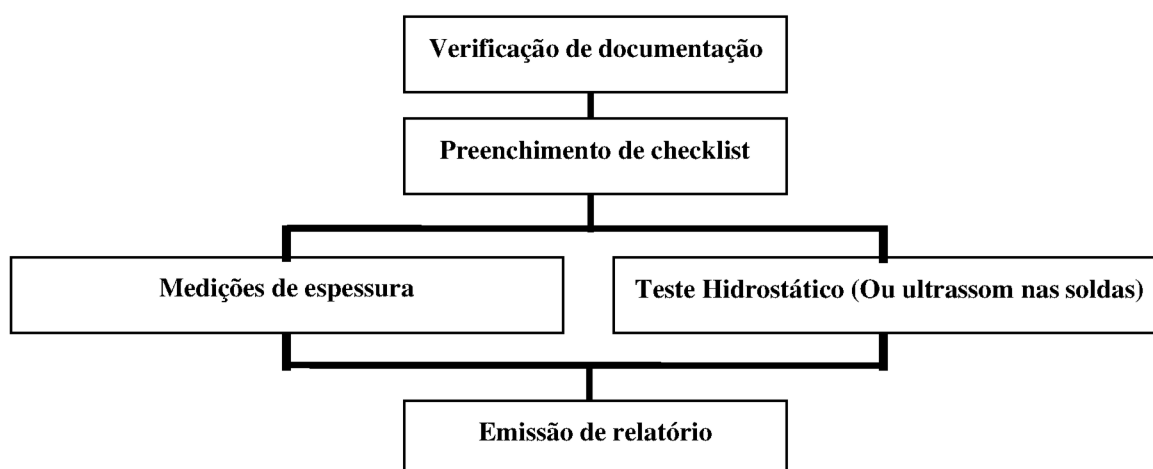
As consequências de um acidente em um vaso de pressão podem ser catastróficas. No ano de 2018, a explosão de um digestor de penas resultou na morte de três funcionários de um frigorífico de aves (BUCHARLES, 2019).

Durante as investigações, a perícia identificou que uma das causas fundamentais foi a elevação da pressão interna do vaso acima da Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA), devido ao não acionamento da válvula de segurança.

Visto isso, fica claro o quanto é importante respeitar os prazos das inspeções periódicas de segurança, assim como manter os instrumentos indicadores e de alívio de pressão devidamente calibrados.

Os prazos de inspeções periódicas interna e externa em recipientes sob pressão são determinados pela NR 13, variando de acordo com a pressão e o fluído de trabalho. De modo geral, costuma-se seguir os passos apresentados na Figura 5 (PRATA et al., 2018).

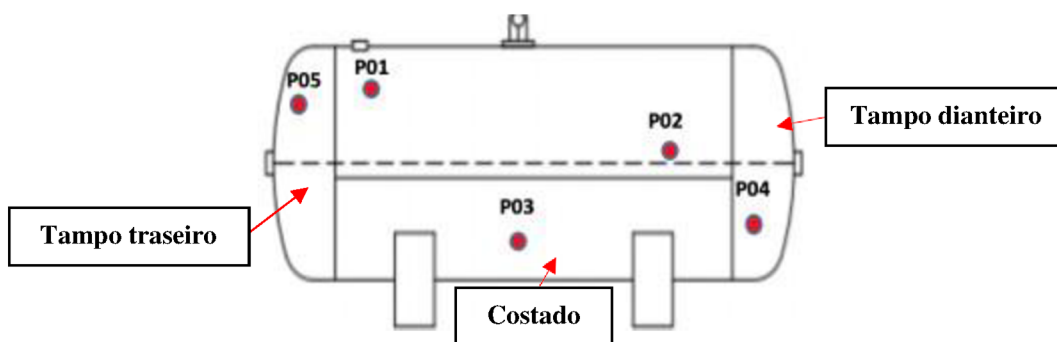
Figura 5 - Fluxograma de inspeção em recipientes sob pressão



Fonte: Prata, Ferreira e Goulart (2018)

- **Verificação de documentação:** Nessa etapa é verificado se o vaso possui toda a documentação necessária para o atendimento da norma, como o prontuário de fabricação (com memorial de cálculo e características do vaso), os certificados de calibração dos instrumentos de segurança, os projetos de alteração ou reparo (PAR) e o livro de registro. Toda a ocorrência no equipamento deve ser registrada no livro;
- **Preenchimento do checklist:** Conforme a inspeção avança, é comum que se utilize um checklist, a fim de analisar se os itens mandatários da norma estão sendo seguidos;
- **Medições de espessura:** Esse passo é muito importante, pois permite checar se a espessura dos componentes do vaso é suficiente para suportar sua pressão de trabalho. Para tanto, utiliza-se um aparelho de ultrassom, raspando-se uma pequena superfície até expor-se o metal “cru”. Para uma leitura correta, utiliza-se uma pequena quantidade de gel no cabeçote do aparelho (PRATA, FERREIRA e GOULART, 2018). A partir dos valores obtidos, utiliza-se as normas ASME VIII DIV.1 e Seção 4 da API RP 579 para verificar se as espessuras estão conforme o especificado. A Figura 6 ilustra os pontos de medição de espessura.

Figura 6 - Pontos de medição de espessura (tampos e costado)



Fonte: Prata, Ferreira e Goulart (2018)

- **Teste hidrostático (ou ultrassom em soldas):** Uma vez que o teste hidrostático é um ensaio destrutivo, para evitar que os equipamentos sejam levados a pressões elevadas desnecessariamente, é comum que o Profissional Habilitado (P.H) opte pelo ensaio de ultrassom em soldas. Além de ser muito eficiente, evita o desgaste do vaso. Costuma-se inspecionar

principalmente as soldas entre os tampos e costado (no caso do digestor, entre os tampos e a camisa);

- **Emissão de relatório:** Após concluída a inspeção, o inspetor deve registrar a data no livro de segurança, indicando se o equipamento se encontra íntegro para operação. Para vasos, deve-se obedecer ao prazo máximo de 60 dias (segundo NR-13) para emissão de relatório, onde deve constar o registro fotográfico da inspeção e as recomendações de segurança para que o equipamento atenda a norma.

Dadas as características operacionais dos digestores, que resultam no desgaste de seus componentes, juntamente com a necessidade de cumprir as Normas Regulamentadoras pertinentes, que exigem aferições periódicas da espessura do equipamento, existe a probabilidade de retirada não planejada do equipamento de produção.

Portanto, ao seguir os princípios de manutenção e aplicar a análise estatística de regressão linear, é possível monitorar o desgaste das partes do digestor ao longo do tempo, especialmente os tampos. Isso permite a tomada de decisões quanto à substituição de componentes antes que alcancem seus limites de vida útil, evitando assim reduções na capacidade produtiva da fábrica

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo é apresentada a metodologia aplicada no presente trabalho, assim como as etapas para o desenvolvimento da referida pesquisa. Para atingir o objetivo geral e os objetivos específicos, utilizou-se como base as diretrizes de autores renomados em manutenção, como Viana (2002), que destaca a importância da inspeção de equipamentos e Pinto e Xavier (2001), que abordam a atuação preditiva da manutenção com base nas alterações dos parâmetros de condição de equipamentos inspecionados.

A pesquisa levou em consideração os limites de espessura admissíveis para a operação dos digestores de penas, bem como os prazos de inspeção determinados pela norma regulamentadora aplicável (NR-13). Para garantir a integridade dos dados, criou-se o “Sistema de Monitoramento de Digestores”, onde as medições de espessura coletadas durante as inspeções foram armazenadas em um banco de dados modelado a partir do software *Microsoft Access*, seguindo a proposta de Battisti (2018).

Para Gilat e Subramaniam (2008), após conhecer o comportamento da função, é possível utilizar a regressão linear para extrapolar os dados, projetando-se valores futuros. Com base nessa premissa, aplicou-se a regressão linear nas medições de espessura em função do tempo, a fim de estimar os limites de vida útil dos componentes. No entanto, como apontado por Callegari-Jacques (2003), para assegurar a confiabilidade das informações, é fundamental verificar se o comportamento da função é realmente linear.

Para tanto, calculou-se os coeficientes de Correlação e Determinação. Ao obter-se os coeficientes próximos a 1, certificou-se que a correlação entre as variáveis “espessura” e “tempo” é muito forte. Portanto, a regressão linear é representativa para os dados analisados.

O desenvolvimento da presente pesquisa contou com o suporte do time de Engenharia de Manutenção do frigorífico, aplicando-se a regressão linear para auxiliar na gestão dos digestores.

Esse time é composto pelo Planejador de Manutenção, responsável pela programação de manutenções e inspeções, pelo Inspetor de Equipamentos, responsável pelo monitoramento de ativos e acompanhamento das inspeções de

NR-13, pelo Engenheiro de Confiabilidade, responsável por definir as estratégias de gestão de ativos, e pelo Supervisor de Manutenção, responsável por fornecer suporte ao time, assim como tomar decisões relacionadas à disponibilidade e custos.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

O presente trabalho consiste em uma pesquisa aplicada, realizada em uma empresa multinacional do ramo frigorífico, utilizando-se da abordagem de pesquisa-ação. Durante o estudo, foi constatado que a indisponibilidade de digestores reprovados em inspeções de NR-13 tinha impactos negativos na capacidade produtiva.

A principal causa dessa indisponibilidade era a reprovação durante as inspeções, devido a pontos dos digestores com espessura abaixo do admissível por norma. Diante dessa situação, identificou-se a necessidade de prever as falhas dos componentes antes de atingirem a espessura limite. Assim, possibilitando à equipe de manutenção intervir antes que a falha ocorresse.

Para tanto, assim como proposto por Battisti (2018), desenvolveu-se e implementou-se uma ferramenta de banco de dados completa para armazenar medições de espessura. Utilizando o método de regressão linear, conforme descrito por Gilat e Subramaniam (2008), foi possível analisar o desgaste dos componentes ao longo do tempo por meio da geração de curvas de tendência através da interpolação dos dados.

A pesquisa adotou uma abordagem quantitativa para a coleta e análise dos dados. Foram realizadas medições da espessura dos componentes em diferentes momentos do tempo. Além disso, seguindo as diretrizes de Callegari-Jacques (2003), utilizou-se o coeficiente de Pearson para avaliar a correlação entre a espessura e o tempo e o coeficiente de determinação para verificar a qualidade de ajuste da regressão linear aos dados coletados. Quanto mais próximos de 1 esses coeficientes estiverem, melhores serão os resultados obtidos.

Aproveitou-se o momento das inspeções NR-13 dos digestores, as quais eram realizadas anualmente, para aferir sistematicamente a espessura de determinados pontos dos equipamentos. A partir de duas coletas, já é possível ter ideia do comportamento do desgaste dos componentes em função do tempo.

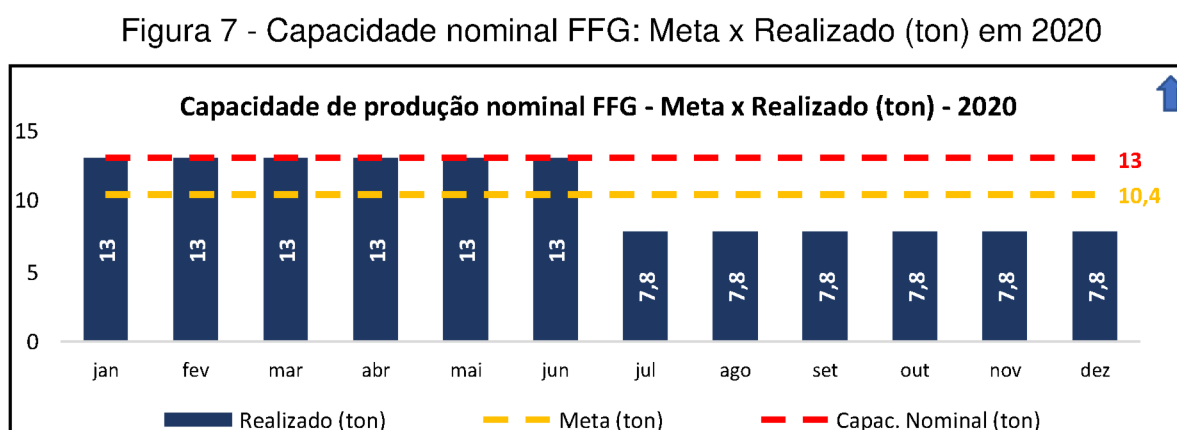
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

O presente estudo foi realizado em uma empresa multinacional do setor de alimentos, localizada no Estado do Rio Grande do Sul - Brasil. A unidade específica onde realizou-se a esquisa, processa o abate diário de 420.000 aves. Para lidar com o grande volume de penas gerado no frigorífico, a unidade conta com uma Fábrica de Farinhas e Gorduras (FFG) que possui cinco digestores de penas em sua linha de produção do produto "Farinha de Penas e Sangue".

No processo de produção, a cada batelada, cada digestor é alimentado com 03 toneladas de penas e 800 litros da mistura de sangue e água, preenchendo cerca de 60% do seu volume. Ao longo do dia, os cinco digestores somados passam por 20 bateladas, produzindo 650 kg de farinha à cada batelada. Logo, a capacidade nominal de produção é 13 ton/mês, enquanto o valor do produto é R\$ 2.550,00/ton.

No ano de 2020, o frigorífico onde estabeleceu-se a presente pesquisa passou por um grande impacto em seu processo produtivo de Farinha de Penas, derivado da desativação simultânea de dois Digestores de Penas pelo período de seis meses. Isso foi equivalente a deixar de produzir 31,2 toneladas de produto, o que representa R\$ 79.560,00.

O gráfico a seguir (Figura 7) representa a diferença entre a capacidade nominal, a meta e o realizado no ano de 2020, onde a capacidade produtiva mensal foi reduzida de 13 ton/mês para 7,8 ton/mês:



Fonte: O autor (2023)

A causa da desativação desses dois equipamentos foi sua condenação durante a inspeção da norma NR-13, onde ambos foram reprovados por conta de seus tampos estarem com a espessura inferior à mínima admissível pelo prontuário dos vasos de pressão. Durante a medição de espessura, os vasos foram reprovados de maneira inesperada, já que não havia nenhuma técnica de inspeção preditiva aplicada nos equipamentos, a qual permitia antecipar-se à falha.

Visto isso, levantou-se a possibilidade da criação e implementação de uma ferramenta de análise estatística, a qual fosse capaz de prever a data limite para os componentes de digestores atingirem a espessura mínima admissível, possibilitando que a área de manutenção substitua os mesmos antes de chegarem ao limite de sua vida útil. Assim, evita-se a paralização de equipamentos e, conseqüentemente, impede que a planta reduza sua capacidade de produção. Posteriormente, a ferramenta seria nominada como “Sistema de Monitoramento de Digestores”.

Na empresa onde a pesquisa foi realizada, a política de controle de custos é rigorosa, especialmente em relação a grandes intervenções com custos elevados, como a substituição do tampo de um digestor. Nesses casos, a conta de manutenção mensal não é capaz de absorver os custos necessários. Portanto, a Supervisão de Manutenção, em conjunto com a Engenharia de Confiabilidade, deve realizar uma solicitação de verba para essas grandes intervenções.

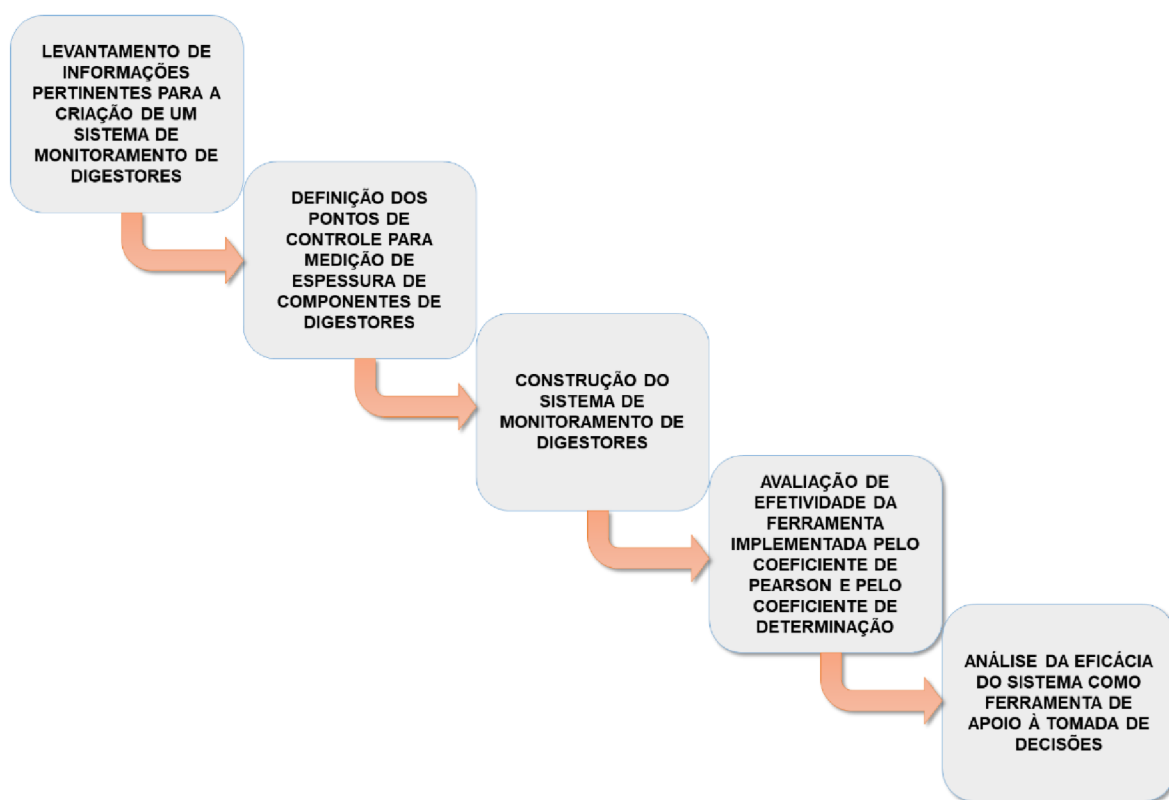
No entanto, para que essa solicitação seja atendida, é fundamental apresentar uma justificativa consistente, demonstrando claramente a criticidade da situação e os impactos negativos causados à capacidade produtiva da fábrica. Sendo assim, uma demonstração do limite de vida útil do componente, por meio da regressão linear se torna uma ferramenta de auxílio na tomada de decisão. Além de atenuar impactos à disponibilidade, a mesma pode proporcionar o planejamento em longo prazo, projetando os momentos do ano necessários para a intervenção nos equipamentos.

3.3 ETAPAS DA PESQUISA

A pesquisa foi organizada em quatro etapas, começando pelo levantamento de informações pertinentes para a criação de Sistema de Monitoramento de Digestores, passando pela definição dos pontos de controle para a medição de espessura, seguindo para a implementação do sistema e seguindo para o teste de efetividade da ferramenta, a fim de aferir se era confiável para tomada de decisão.

Na Figura 8 a seguir, estão dispostas as etapas da pesquisa.

Figura 08 - Etapas da pesquisa



Fonte: O autor (2023)

3.3.1 Levantamento de informações pertinentes para a criação de um sistema de monitoramento de digestores

O primeiro passo para a estruturação da ferramenta de análise, foi realizar o levantamento das características dos equipamentos a serem analisados, assim como quais informações seriam pertinentes para auxílio na tomada de decisão.

Além dos dados de espessura, os quais são os determinantes para esse projeto, dados cadastrais puderam dar suporte para a manutenção, proporcionando agilidade no Planejamento e Controle de Manutenção, fornecendo facilidade na leitura dos cenários nos quais os vasos de pressão se encontram.

Desta forma, definiu-se como útil para o monitoramento de digestores os dados nos subcapítulos a seguir.

3.3.1.1 Cadastro de digestores

Em uma tradução livre do inglês, pode-se descrever *Tag* como “etiqueta de identificação”. Já no conceito industrial, “*Tagueamento*” representa a identificação da localização das áreas operacionais e seus equipamentos (VIANA, 2002). Fazendo uma analogia com o cotidiano, a *tag* é a Carteira de Identidade do equipamento, ou seja, é um “registro único”, o qual permite a rastreabilidade do ativo, assim como geração de histórico de manutenção.

3.3.1.2 Dados de NR-13

Uma vez que a retirada de operação dos digestores foi derivada de inspeções conforme a Norma Regulamentadora 13, seria pertinente o levantamento das características dos vasos de pressão em questão, a fim de se conhecer os aspectos construtivos do projeto dos equipamentos, assim como seus limites de operação. Sendo pertinentes as seguintes informações:

- PMTA (Pressão Máxima de Trabalho Admissível) em Kgf/cm²;
- Categoria do vaso;
- Volume em m³;
- Classe de fluído;
- Válvulas de Pressão;
- Manômetros;
- Espessura de projeto dos componentes (em mm);
- Espessura mínima admissível para operar na PMTA (em mm).

3.3.1.3 Dados de cadastro complementares

Para aumentar a confiabilidade da ferramenta desenvolvida, definiu-se quais informações seriam pertinentes para correlacionar o sistema de monitoramento com a Gestão de Manutenção, sendo esses dados os seguintes:

- Ordem de Serviço (OS) de inspeção;
- Data de inspeção;
- Empresa que realizou as medições;
- Número do relatório de inspeção (NR-13) emitido.

3.3.1.4 Parâmetros de condição

Um dos critérios para definir se um vaso de pressão está íntegro para operar em segurança, é a espessura de seus componentes. De acordo com o prontuário do equipamento, para sua pressão de trabalho, é calculada uma espessura mínima admissível. Uma vez que a espessura atinja esse limite, o vaso deve ser retirado de operação, pois está em desacordo com a NR-13. Para a ferramenta de análise dos digestores, utilizou-se o seguinte critério:

- Referência: Espessura nominal de projeto;
- Espessura de alerta: 30% inferior à espessura nominal de projeto;
- Espessura mínima: Limite apontado no prontuário do vaso de pressão.

3.3.1.5 Estratégia de monitoramento de condição

A estratégia adotada para o acompanhamento da condição de componentes dos digestores foi a medição de espessura por aparelho de ultrassom. Através das medições periodicamente executadas, é possível traçar-se uma linha de tendência por meio da regressão linear, para projetar quando a espessura chegará ao limite mínimo para aquele componente.

3.3.2 Definição dos pontos de controle para medição de espessura de componentes de digestores

Um dos grandes desafios para o monitoramento da condição dos digestores, era a falta de definição de pontos de controle para as medições de espessura. Durante as inspeções anuais, os componentes tinham seu desgaste aferido em pontos aleatórios, de forma a não proporcionar acompanhamento de tendência em função do tempo.

Desta forma, durante uma inspeção, o componente apresentava espessura próxima da medida nominal, não indicando elevado desgaste. Já na próxima inspeção, inesperadamente, eram encontrados pontos abaixo da espessura mínima, ocasionando a retirada de operação do equipamento.

Na imagem a seguir (Figura 9) é possível observar as inspeções realizadas em dois digestores nos anos de 2019 e 2020. Nota-se que não foram identificados pontos de baixa espessura nas inspeções de 2019, enquanto nas inspeções de 2020, um dos equipamentos foi condenado por baixa espessura, estando com pontos do tampo traseiro com a espessura de **5,60 mm**, enquanto o valor mínimo admissível do componente é de **9,52mm**, sendo que no ano anterior, a espessura aferida foi de **13,7 mm**.

Figura 9: Medições de espessura das inspeções de 2019 e 2020

DIGESTOR	Inspeção 2019	Inspeção 2020	
Digestor de penas 01	Relatório de Inspeção nº I190134-040	Relatório de Inspeção Nº I200205-010	
Digestor de penas 05	Relatório de Inspeção nº I190134-041	Relatório de Inspeção Nº I200205-011	

Fonte: O autor (2023)

Conforme a imagem acima, não havia um padrão a ser seguido para a realização de medições de espessura, o que não possibilitava o acompanhamento de desgaste dos componentes. Além disso, havia o risco de não aferir-se algum ponto com menor espessura, o que poderia desencadear em reprovação inesperada de digestores em inspeções futuras.

Sendo assim, com a finalidade de garantir o mapeamento da espessura de todas as áreas dos componentes, assim como proporcionar o acompanhamento da taxa de desgaste em função do tempo, definiu-se 30 pontos de controle para medição de espessura dos digestores. Sendo estes:

- 12 pontos de controle no tampo traseiro;
- 03 pontos de controle na camisa interna;
- 03 pontos de controle na camisa externa.
- 12 pontos de controle no tampo dianteiro.

3.3.3 Construção do sistema de monitoramento de digestores

A ferramenta foi desenvolvida através do *software Microsoft Access*, tanto a modelagem do banco de dados quanto a interface gráfica.

3.3.3.1 Banco de dados

Podemos definir o termo “banco de dados” como uma coleção estruturada de dados armazenados e organizados, de forma a permitir agilidade na busca e na recuperação das informações nele armazenadas (MANOVICH, 2015).

Para realizar uma avaliação de dados confiável, não basta apenas coletar a informação de maneira correta, mas também organizar os objetos de análise de forma organizada, incorporada e consistente. Para tanto, é possível utilizar o Modelo Relacional de Dados, o qual possibilita a criação de um banco de dados estruturado, de forma que as informações são divididas em tabelas, as quais possuem relacionamentos entre si (BATTISTI, 2018). Esse modelo proporciona um elevado nível de organização dos dados, uma vez que evita a repetição de informações na base de dados (DA SILVA e FERREIRA, 2017).

Através do relacionamento entre tabelas, é possível trabalhar com os dados de maneira organizada, sem o risco de editar/alterar os dados já armazenados acidentalmente, alimentando o banco com novas medições, gerando consultas e ordenando as informações da maneira mais conveniente para serem analisadas.

Uma alternativa para criação e modelagem de bancos de dados, é o *Microsoft Access*, que é um software de criação e gerenciamento de dados relacionais, possibilitando criar-se sistemas de armazenamento de informações.

Além do armazenamento de dados, o *Microsoft Access* permite a filtragem e pesquisa de informações (consultas), a criação de interfaces gráficas para exposição e manipulação de dados (formulários) e a geração de documentos (relatórios) para exposição dos elementos armazenados (BATTISTI, 2018).

O princípio de criação de um sistema de banco de dados relacionais é determinar quais tabelas serão criadas e os campos de dados que irão constituí-las. Com as tabelas já concebidas, define-se as regras de relacionamento entre elas. É o relacionamento entre tabelas que permite trabalhar com os dados de forma confiável, sem perder a consistência das informações e gerando um histórico de medições íntegro.

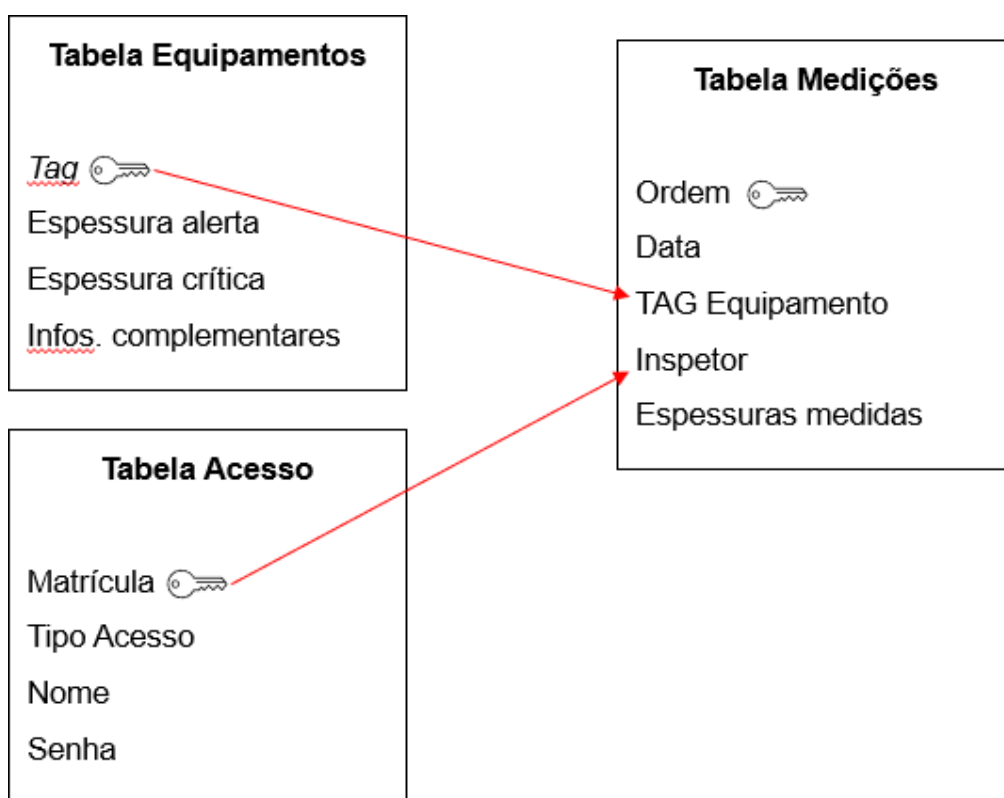
Cada tabela possui, obrigatoriamente, pelo menos um campo denominado “chave primária”, pelo qual através do mesmo, os relacionamentos são criados. Ao criar-se um relacionamento entre tabelas, esse campo “puxa” consigo as informações da sua tabela de origem. Por exemplo, um banco de dados para o acompanhamento da redução de espessura de um componente em função do tempo pode ser constituído por três tabelas:

- **Tabela Equipamentos:** Tabela onde são armazenadas as informações dos componentes que são medidos, como os parâmetros de alerta e os dados cadastrais. Sua chave primária é o *tag* do equipamento, pois cada equipamento medido possui um único nome (*tag*) cadastrado;
- **Tabela Medições:** Tabela onde são registradas as medições de espessura e a data quando foram coletadas. Sua chave primária é a OS (Ordem de Serviço), pois cada medição é feita através de uma OS a qual não possui valores duplicados;

- **Tabela Acesso:** Tabela onde ficam registrados os usuários do sistema, possibilitando que haja um tipo de acesso para inserir/editar dados e outro apenas para consulta. Sua chave primária é a matrícula do colaborador.

Na figura 10, a seguir, é demonstrado o relacionamento entre os campos das tabelas. As chaves primárias estão indicadas pelo desenho de uma chave ao lado do seu nome.

Figura 10 - Relacionamento entre tabelas de um banco de dados



Fonte: O autor (2023)

Caso seja necessário, é possível gerar um relatório que compara os dados coletados e armazenados na Tabela Medições com os parâmetros de alerta armazenados na Tabela Equipamento. A lógica do relacionamento entre tabelas é que seja possível realizar várias medições de espessura do mesmo equipamento, mas que esse equipamento possua apenas um cadastro. Isso aumenta a confiabilidade da informação, pois evita a criação de cadastros duplicados ou que os dados coletados percam a referência com o equipamento o qual se referem.

Para construção do Sistema de Monitoramento de Digestores, ficaram definidas as seguintes tabelas:

- **Tabela Local de Instalação:** Para cadastro de equipamentos e parâmetros de condição, criou-se a tabela “Local de Instalação”, com a *tag* dos digestores como chave primária. Nessa tabela, ficam armazenados os dados de projeto dos equipamentos, parâmetros de projeto e o percentual de desgaste dos componentes do vaso de pressão, segundo a última inspeção realizada;
- **Tabela Inspeções:** A fim de armazenar as informações coletadas em inspeções, criou-se a tabela Inspeções, com a ordem de serviço (OS) da inspeção realizada, as espessuras encontradas para cada ponto, a situação das válvulas de segurança e os manômetros dos digestores;
- **Tabela Acesso:** Tabela com as informações de usuários do sistema, com diferenciação do tipo de acesso para edição de dados e/ou apenas para consulta.

3.3.3.2 Interface gráfica

Através da interface gráfica do sistema são gerados formulários, através dos quais é possível navegar, inserir dados, editar cadastros e consultar informações. Os formulários são:

- **Formulários de Navegação:** São os menus de navegação do sistema, como tela de início e de seleção do equipamento;
- **Formulários de Inserção de dados:** Formulário através do qual se faz a inserção de dados de inspeção e a edição de cadastros dos equipamentos;
- **Formulário de Consulta:** Possui por objetivo observar os dados. Assim como o nome já sugere, o mesmo é baseado em consultas, permitindo trabalhar-se com os dados. Por exemplo, ordenando equipamentos de acordo com o percentual de desgaste e projetando as tendências de perda de espessura em função do tempo por meio de curvas de tendência;

- **Geração de curvas de tendência:** O *Microsoft Access* possui uma ferramenta de geração de curvas de tendências. Através de uma tabela de dados, o sistema calcula a equação da curva de regressão, assim como os coeficientes de determinação (R^2) e de correlação (R). Os gráficos de curva de tendência podem ser expostos nos formulários de consulta.

3.3.4 Análise da eficácia do sistema como ferramenta de apoio à tomada de decisões

O Sistema de Monitoramento de Digestores utiliza a regressão linear para projetar a vida útil de componentes por perda de espessura. A fim de avaliar a efetividade da ferramenta, ou seja, se a regressão linear é útil para acompanhamento e tomada de decisão, utilizou-se a análise de correlação para medir a “força” de relacionamento linear entre variáveis tempo e espessura (RODRIGUES, 2012), assim como o coeficiente de determinação para verificar a qualidade de ajuste do modelo de regressão. De acordo com o método de Pearson, quanto mais próximo de 1 for o coeficiente de correlação, mais representativa será a linha de tendência.

A fim de avaliar a eficácia do sistema para apoio à tomada de decisões sobre manutenção e disponibilidade, foram avaliados os seguintes tópicos:

- Utilização da ferramenta implementada para suporte na tomada de decisão;
- Perda de disponibilidade evitada pela utilização da ferramenta como suporte para análise de dados;

Com base na análise dos resultados, foi possível definir se o sistema agrega valor ou não aos processos industriais.

4 RESULTADOS

Os resultados apresentados a seguir são referentes, cronologicamente, ao período no qual o presente autor desempenhava suas funções no departamento de Engenharia de Confiabilidade da Fábrica de Farinhas e Gorduras da empresa frigorífica onde a ferramenta foi implementada (março de 2020 a maio de 2022).

Primeiramente, são apresentados os dados levantados para elaboração do sistema, seguindo para o “croqui” dos pontos de controle definidos para as coletas de espessura. Após, é demonstrado o sistema desenvolvido, tanto o relacionamento das tabelas quanto os formulários de consulta. Por fim, são apresentados os resultados da análise de efetividade das curvas de tendência através do coeficiente de Pearson.

4.1 LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES PERTINENTES PARA A CRIAÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO DE DIGESTORES

A seguir, seguem os dados levantados para a construção do sistema, tanto informações cadastrais quanto parâmetros de projeto, assim como valores de alerta e limites de espessura mínima de operação.

4.1.1 Dados cadastrais dos digestores

Nas tabelas a seguir, estão as informações cadastrais coletadas. A catalogação desses dados proporcionou a identificação das características de cada digestor, facilitando a consulta de informações relacionadas à NR-13, como por exemplo, a identificação de seus manômetros e válvulas de pressão, dispositivos os quais necessitam ser mantidos calibrados para o atendimento de normas de segurança e legais.

Tabela 2 - Digestores de penas: Informações cadastrais

DIGESTORES DE PENAS: INFORMAÇÕES CADASTRAIS					
TAG	DESCRIÇÃO	PMTA (Kgf/cm ²)	Categoria	Volume (m ³)	Classe fluído
DIG032820261	Digestor de Penas 01	5,61	III	5	C
DIG032820262	Digestor de Penas 02	6,61	III	5	C
DIG032820263	Digestor de Penas 03	5	IV	5	C
DIG032820264	Digestor de Penas 04	5	IV	5	C
DIG032820265	Digestor de Penas 05	5	IV	5	C

Fonte: O autor (2023)

Tabela 3 - Digestores de penas: Dispositivos de segurança

DIGESTORES DE PENAS: DISPOSITIVOS DE SEGURANÇA					
TAG	DESCRIÇÃO	Válvula de Pressão camisa	Válvula de Pressão interna	Manômetro pressão camisa	Manômetro pressão interna
DIG032820261	Digestor de Penas 01	PSV-DIG-01	PSV-397	PIA-094	PIA-100
DIG032820262	Digestor de Penas 02	PSV-DIGP02	PSV-398	PIA-096	PIA-097
DIG032820263	Digestor de Penas 03	PSV-DIGP03	PSV-618	PIA-090	PIA-091
DIG032820264	Digestor de Penas 04	PSV-DIGP04	PSV-260	PIA-095	PIA-087
DIG032820265	Digestor de Penas 05	PSV-DIGP05	PSV-261	PIA-089	PIA-101

Fonte: O autor (2023)

4.1.2 Parâmetros de condição

Segundo a metodologia adotada para o sistema, definiu-se uma espessura de alerta (70% da medida nominal) para os componentes de digestores, com a finalidade de sinalizar ao planejamento de manutenção o fato do desgaste estar chegando próximo do limite admissível pelo prontuário dos vasos de pressão. Já abaixo da espessura mínima de projeto, o vaso de pressão deve ser retirado de operação:

Tabela 4 - Digestores de penas: Espessura de componentes e parâmetros de condição

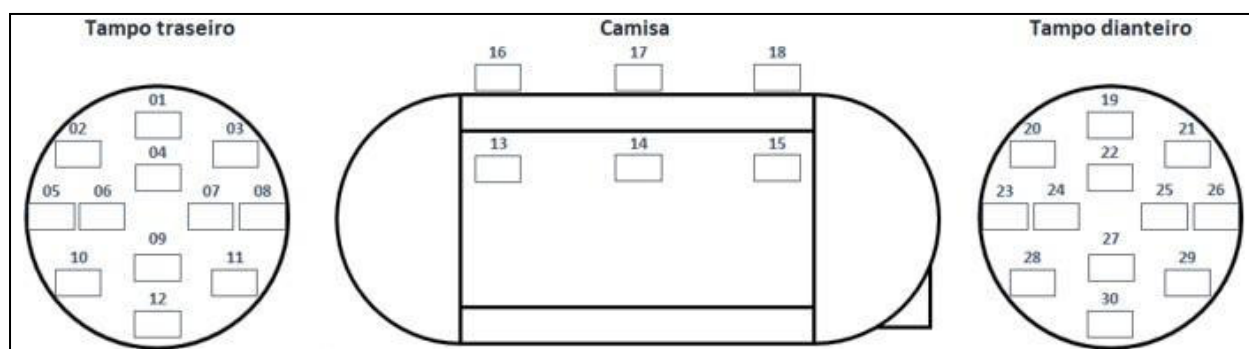
DIGESTORES DE PENAS: ESPESSURA DE COMPONENTES DE ACORDO COM PRONTUÁRIO							
TAG	DESCRIÇÃO	Espessura de projeto tampos	Espessura de alerta tampos	Espessura mínima tampos	Espessura de projeto camisa	Espessura de alerta camisa	Espessura mínima camisa
DIG032820261	Digestor de Penas 01	19,05	13,34	9,52	19,05	13,34	9,52
DIG032820262	Digestor de Penas 02	19,05	13,34	9,52	19,05	13,34	9,52
DIG032820263	Digestor de Penas 03	11,35	7,95	8,5	17,03	11,92	11,3
DIG032820264	Digestor de Penas 04	19,1	13,37	9,52	19,1	13,37	9,52
DIG032820265	Digestor de Penas 05	15,88	11,12	9,45	15,88	11,12	5,9

Fonte: O autor (2023)

4.2 DEFINIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE PARA MEDIÇÃO DE ESPESSURA DECOMPONENTES DE DIGESTORES

De acordo com os 30 pontos de controle definidos, criou-se um “croqui” (Figura 11) para garantir o mapeamento de todas as partes do equipamento, assim como para aferir as medições de espessura sempre nos mesmos pontos, permitindo a geração de tendência de comportamento.

Figura 11 - Pontos de controle para medição de espessura



Fonte: O autor (2020)

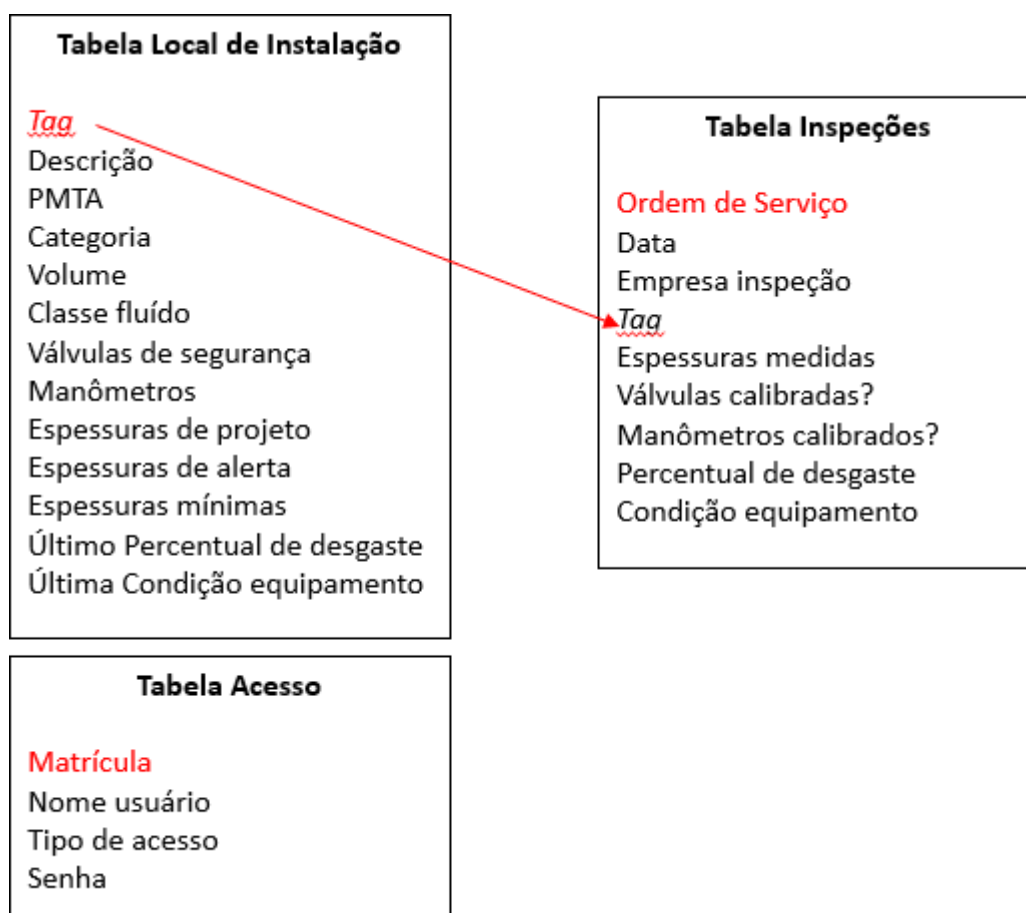
4.3 CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO DE DIGESTORES

Seguem na sequência do texto as tabelas e os formulários de navegação e de consulta do Sistema de Monitoramento de Digestores.

4.3.1 Tabelas e relacionamentos

A Figura 12 apresenta os dados e relacionamentos das tabelas do banco de dados do sistema. Os campos escritos em vermelho são as chaves primárias das tabelas.

Figura 12 - Campos e relacionamento das tabelas do Sistema de Monitoramento de Digestores



Fonte: O autor (2020)

Conforme a Figura 12, nota-se que não há relacionamento direto entre a Tabela Acesso e as demais. Isso se deve ao fato da tabela apenas diferenciar os perfis de acesso ao sistema, de forma que apenas usuários autorizados possam inserir e/ou editar dados. Assim, é possível aumentar a segurança e confiabilidade da informação.

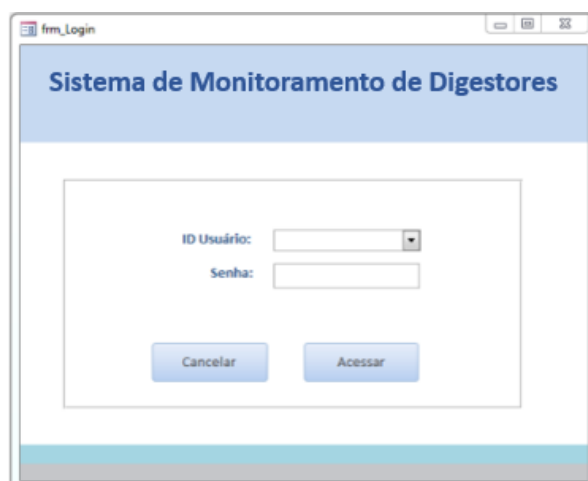
4.3.2 Interface gráfica

Uma vez que as informações cadastrais foram levantadas, que as tabelas foram montadas e que os relacionamentos foram estabelecidos, o passo seguinte foi a elaboração de formulários. É através dos formulários que se “navega” através do sistema. Portanto, é fundamental que a manipulação da ferramenta seja intuitiva e a informação seja clara e de fácil interpretação.

Os modelos de formulários criados foram os seguintes:

- **Formulário de login:** Como o próprio nome já diz, é o formulário de acesso ao sistema. De acordo com o tipo de usuário cadastrado, é possível inserir e/ou editar dados, ou apenas consultá-los. A Figura 13 apresenta o Formulário de Login.

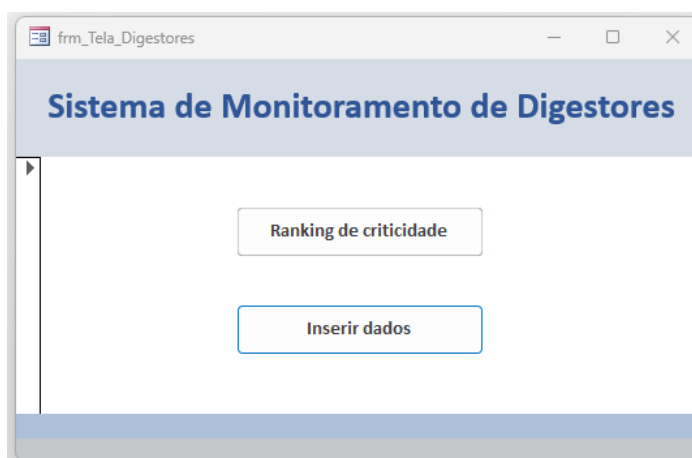
Figura 13 - Formulário de *login*

A imagem mostra uma janela de aplicativo com o título 'frm_Login'. O cabeçalho da janela contém o texto 'Sistema de Monitoramento de Digestores'. O corpo da janela apresenta um formulário com dois campos de entrada: 'ID Usuário' (um menu suspenso) e 'Senha' (um campo de texto). Abaixo dos campos, há dois botões: 'Cancelar' e 'Acessar'. A janela possui uma barra decorativa azul na base.

Fonte: O autor (2020)

- **Tela inicial:** É o menu principal de navegação do sistema, através do qual se opta por inserir dados de medições ou consultar o ranking de criticidade. A Figura 14 mostra a Tela inicial.

Figura 14 - Tela inicial



Fonte: O autor (2020)

- **Formulário de inserção de dados:** Primeiramente, é aberto um formulário de filtragem de equipamentos, no qual é selecionado qual equipamento desejamos inserir dados. A Figura 15 ilustra esse formulário.

Figura 15 - Formulário de seleção de equipamento



Fonte: O autor (2020)

Em seguida, com o equipamento selecionado, são adicionados os dados coletados durante a inspeção. Os dados são inseridos na tela de Formulário de inserção de dados, o qual é mostrado na Figura 16, a seguir.

Figura 16 - Formulário de inserção de dados

Fonte: O autor (2020)

Com os registros de inspeções inseridos no sistema, é gerado um “Ranking de criticidade”, o qual ordena os digestores de acordo com seu percentual de desgaste. A partir da redução de 30% da espessura nominal de algum dos componentes do digestor (tampos ou camisa), a condição do equipamento passa a ser de “Alerta”. Abaixo do mínimo admissível para operação, a condição passa para “Inaceitável”, sendo necessário desativar o vaso de pressão. A Figura 17 mostra o Ranking de criticidade.

Figura 17 - Ranking de desgaste de digestores

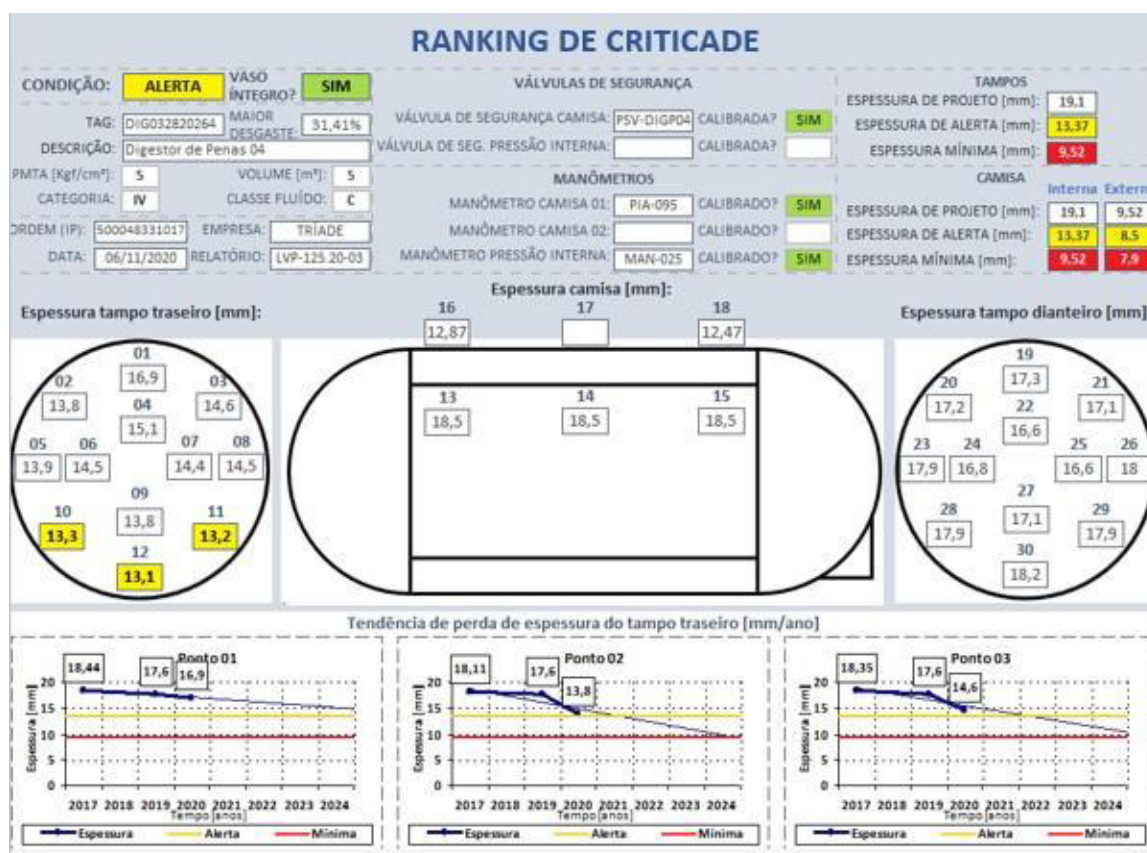
TAG	DESCRIÇÃO	DESG	CONDIÇÃO
DIG032820262	Digestor de Penas 02	79,00%	INACEITÁVEL
DIG032820261	Digestor de Penas 01	48,14%	ALERTA
DIG032820264	Digestor de Penas 04	31,41%	ALERTA
DIG032820265	Digestor de Penas 05	28,65%	BOM
DIG032820263	Digestor de Penas 03	19,14%	BOM

Fonte: O autor (2020)

Ao navegar pelo ranking, observa-se os detalhes da última inspeção, assim como condição atual do equipamento, podendo-se observar também o gráfico de tendência de todos os pontos de controle. Programou-se o sistema para utilizar os

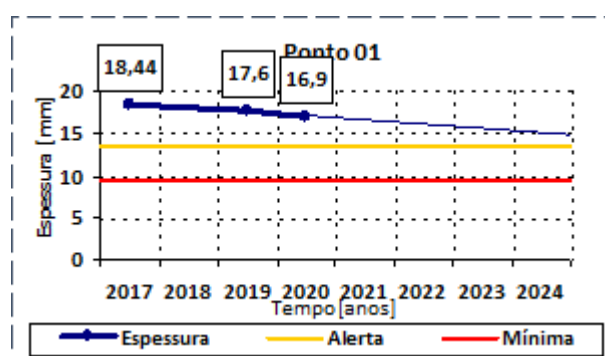
dados de espessura coletados para calcular a curva de regressão linear, a qual indica quando o componente do digestor atingirá a espessura mínima admissível para seguir em operação, assim como o coeficiente de Correlação (R) e coeficiente de determinação (R^2). A Figura 18 mostra os detalhes do ranking de criticidade.

Figura 18 - Formulário de ranking de criticidade: detalhes última condição



Fonte: O autor (2020)

Figura 19 - Tendência de desgaste do ponto de controle com regressão linear



Eq. Linha de tendência

$$y = -0,0013x + 74,388$$

$$R = 0,9975$$

$$R^2 = 0,9950$$

Fonte: O autor (2020)

4.4 ANÁLISE DA EFICÁCIA DO SISTEMA COMO FERRAMENTA DE APOIO À TOMADA DE DECISÕES

Após o sistema ter ganhado robustez, com um volume grande de dados inseridos, realizou-se a análise de efetividade da ferramenta. Para tanto, calculou-se a correlação pelo método de Pearson e confrontou-se com os resultados do sistema, a fim de verificar se a relação entre as variáveis tempo e espessura é significativa. Também, comparou-se o coeficiente de determinação, para verificar a qualidade de ajuste do modelo de regressão. Utilizou-se a bibliografia de Callegari-Jacques (2003), que define a força de correlação de acordo com a proximidade do coeficiente de Pearson a 1. Ou seja, quanto mais próximo de 1, maior a correlação.

Na tabela a seguir, estão compiladas as medições dos pontos detectados com a menor espessura na última inspeção de cada digestor, assim como os coeficientes de correlação e determinação para os referidos pontos:

Tabela 5 - Digestores de penas: Coeficiente de Pearson para regressão linear de perda de espessura

DIGESTORES DE PENAS							
Cálculo do Coeficiente de Correlação de Pearson (R) e Coeficiente de Determinação (R^2)							
TAG	DESCRIÇÃO	Ponto de menor espessura	Menor espessura (mm)	R para o ponto	R^2 para o ponto	Nível de correção	Observação
DIG032820261	Digestor de Penas 01	Ponto 30	9,88	0,9815	0,9632	Muito forte	Tendência de desgaste apontando falha na próxima inspeção
DIG032820262	Digestor de Penas 02	Ponto 29	4,00	N/A	N/A	N/A	Reprovado por baixa espessura
DIG032820263	Digestor de Penas 03	Ponto 29	10,53	0,8861	0,7852	Forte	
DIG032820264	Digestor de Penas 04	Ponto 12	13,10	0,9303	0,8654	Muito Forte	
DIG032820265	Digestor de Penas 05	Ponto 24	10,10	0,9991	0,9982	Muito forte	Muito próxima de uma correlação plena

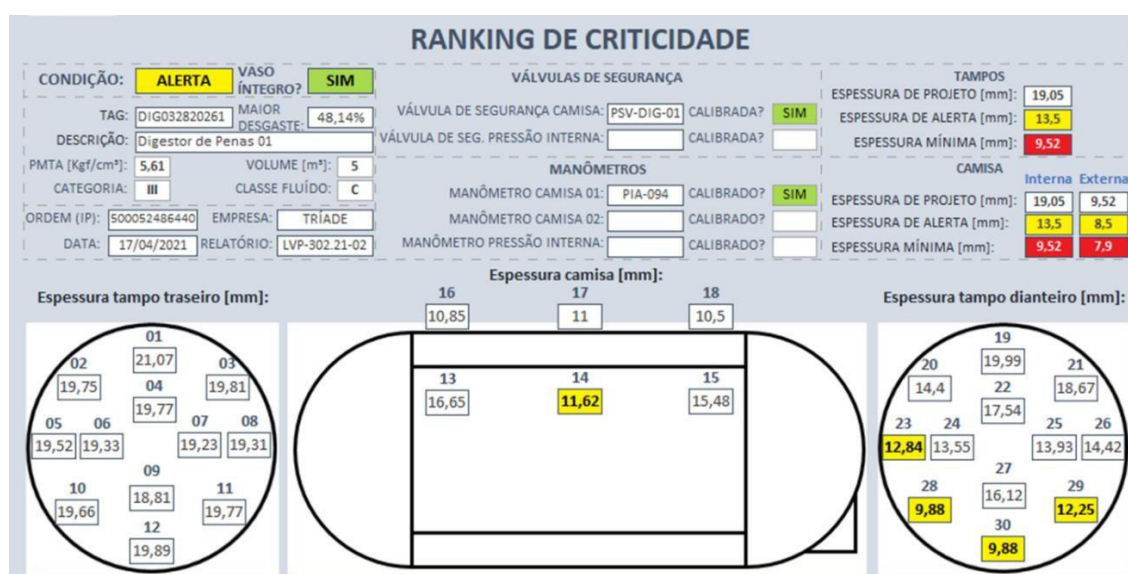
Fonte: O autor (2023)

De acordo com os dados obtidos e apresentados acima, observou-se que tanto o coeficiente de correlação R , que indica a força da relação entre as variáveis, quanto o coeficiente de determinação R^2 , que demonstra qualidade de ajuste do modelo de regressão linear, se aproximam de 1, comprovando que a ferramenta implementada é confiável para uma tomada de decisão.

4.4.1 Utilização da ferramenta implementada para suporte na tomada de decisão

Através do Sistema, observou-se que o Ponto 30, referente ao tampo dianteiro do Digestor de Penas 01, apresentava a espessura de 9,88 mm, enquanto o valor mínimo admissível segundo o Prontuário NR-13 do equipamento é 9,52 mm:

Figura 20 - Dados da última inspeção do Digestor de Penas 01

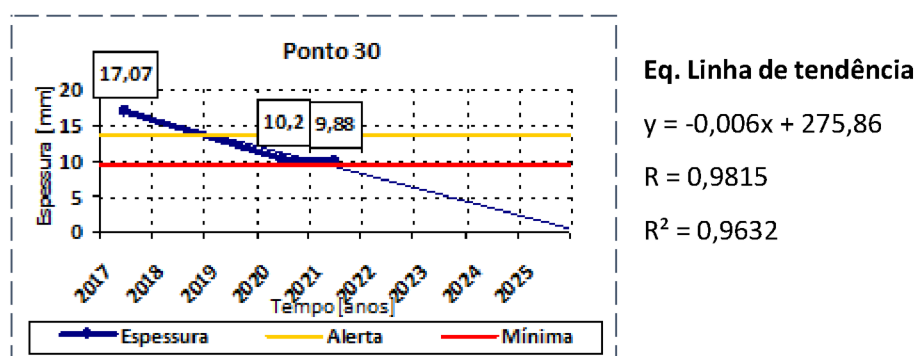


Fonte: O autor (2021)

Para o ponto 30, referenciado na Figura 21, a seguir, o coeficiente de correlação calculado foi 0,9815, enquanto o coeficiente de determinação foi 0,9632. Ambos muito próximos de 1, reforçando a representatividade da regressão linear.

Com base no padrão de desgaste observado neste ponto do tampo dianteiro do digestor, na próxima inspeção a linha de tendência indica que a medição de espessura estaria abaixo do limite mínimo aceitável de 9,52 mm, o que resultaria na retirada do equipamento de operação. Isso pode ser observado no gráfico a seguir, na Figura 21.

Figura 21 - Tendência de desgaste do ponto 30 do Digestor de Penas 01



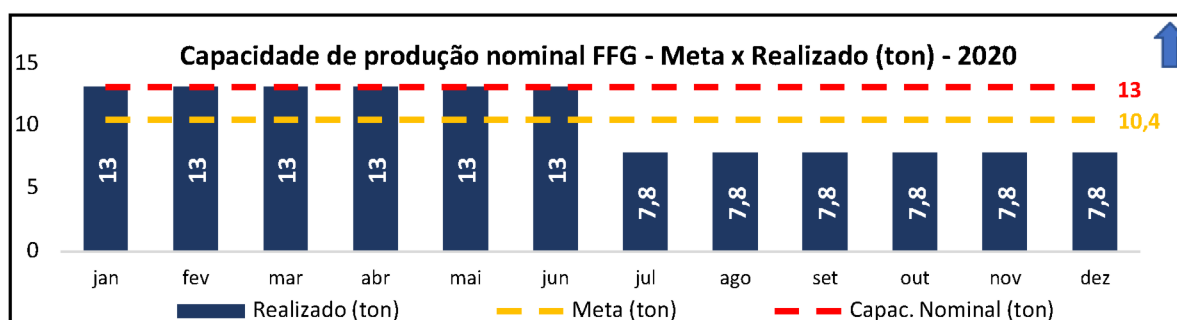
Fonte: O autor (2021)

De acordo com a interpretação dos dados apresentados pelo sistema, decidiu-se por providenciar a substituição do tampo do digestor, projetando-se a evitar uma reprovação do vaso de pressão em sua próxima inspeção de NR-13, o que representaria a indisponibilidade do equipamento por um período mínimo de 6 meses.

4.4.2 Perda de disponibilidade evitada pela utilização da ferramenta como suporte para análise de dados

No gráfico a seguir (Figura 22), estão dispostos os dados referentes ao ano de 2020, os quais demonstram que dois digestores de penas permaneceram indisponíveis para a produção durante 06 meses, o que representou deixar de produzir 31,2 toneladas de farinha de penas, as quais representavam R\$ 79.560,00.

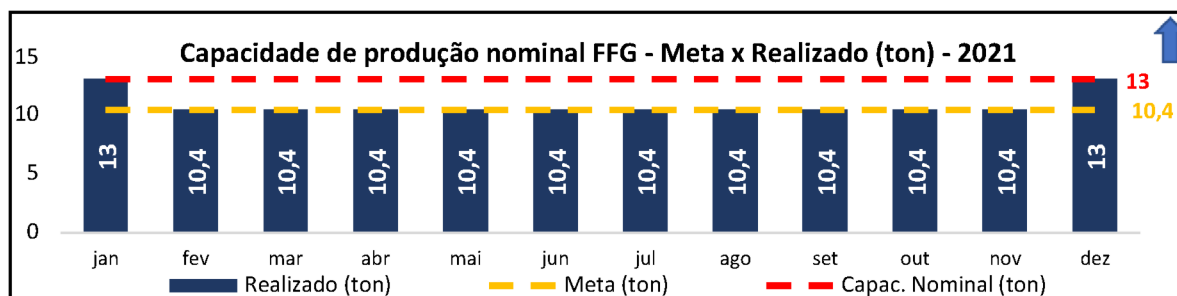
Figura 22 - Capacidade nominal FFG: Meta x Realizado (ton) em 2020



Fonte: O autor (2021)

Já no ano de 2021 (Figura 23), anteriormente à implementação do Sistema de Monitoramento de Digestores, houve a reprovação do Digestor de penas 02, o qual ficou indisponível durante 10 meses, deixando-se de produzir 26 toneladas de farinha de penas, equivalentes a R\$ 66.300,00. Durante o período em que o digestor deixou de operar, a capacidade produtiva da fábrica foi diminuída em 2,6 ton/mês.

Figura 23 - Capacidade nominal FFG: Meta x Realizado (ton) em 2021

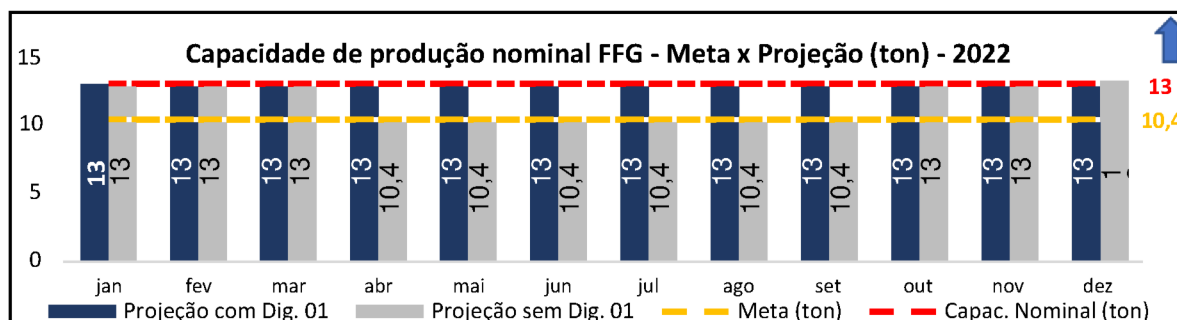


Fonte: O autor (2021)

Após a implementação do Sistema de Monitoramento de Digestores, foi possível prever a falha do tampo dianteiro do Digestor de Penas 01, evitando sua reprovação em inspeção, que consequentemente o tornaria indisponível para produção.

Considerando que o período mínimo entre a solicitação de substituição de um tampo, fabricação e instalação do novo componente é de pelo menos 06 meses, evitou-se a perda de produção de **15,6 toneladas**, o que representaria uma perda de **R\$ 39.780,00** para a companhia. Na Figura 24, a seguir, pode-se observar a capacidade produtiva em 2022, comparada com capacidade produtiva neste mesmo período caso o digestor houvesse sido reprovado em inspeção.

Figura 24 - Capacidade nominal FFG: Meta x Projeção (ton) em 2022



Fonte: O autor (2022)

A retirada do Digestor de Penas 01 de operação, que permaneceria indisponível pelo menos seis meses, teria reduzido a capacidade produtiva mensal da fábrica em 2,6 toneladas. No entanto, isso foi evitado através da substituição do seu tampo dianteiro, o que permitiu manter a capacidade produtiva nominal de 13 ton/mês ao longo do ano.

Em relação à implementação do sistema, houve um grande incentivo por parte da companhia onde a pesquisa foi aplicada, principalmente do setor de produção. Isso se deu devido à imprevisibilidade em relação aos resultados das inspeções, que causava desconforto, uma vez que não havia uma real ideia da condição de desgaste dos componentes dos digestores.

Já quanto à definição dos pontos de controle para as medições de espessura, houve certa resistência por parte das empresas responsáveis pelas inspeções de NR-13. Uma vez que o habitual é inspecionar poucos pontos por medição de espessura, foi necessário que o Inspetor de Equipamentos acompanhasse de perto as empresas terceirizadas, a fim de garantir que todos os pontos indicados fossem aferidos.

Por sua vez, a supervisão de manutenção, além de oferecer suporte, propôs a padronização do sistema como ferramenta de apoio à gestão. Os limites de vida útil apontados pela regressão linear auxiliaram nas decisões que mantiveram a disponibilidade da planta ao longo do ano, bem como possibilitaram o planejamento de custos de forma mais eficiente.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após a implementação do Sistema de Monitoramento de Digestores, foi possível identificar os padrões de desgaste e a previsibilidade do limite de vida útil de componentes de digestores. Destaca-se o Digestor de Penas 01, onde as informações foram relevantes para que a equipe de manutenção pudesse agir de forma preventiva, auxiliando na decisão de substituir seu tampo dianteiro, a fim de evitar perdas de disponibilidade da linha de digestores de penas.

Na Tabela 6, a seguir, é possível comparar-se a capacidade produtiva antes e depois da implementação da ferramenta.

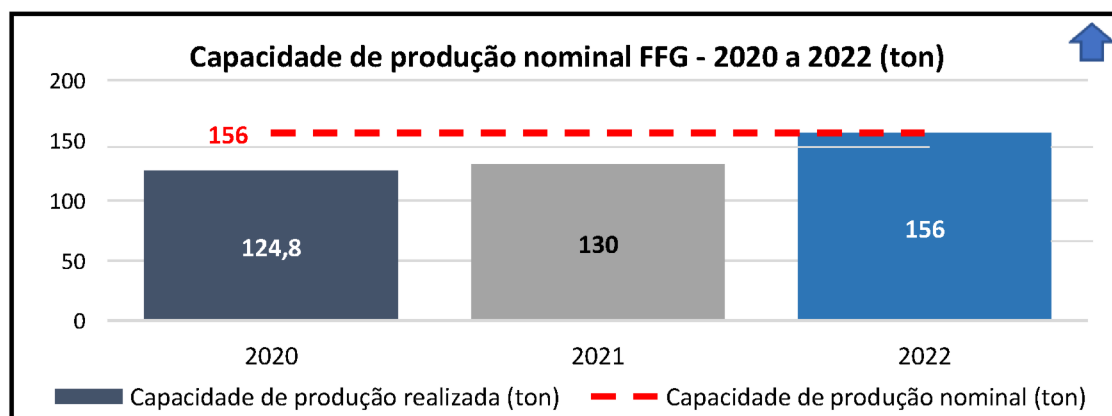
Tabela 6 - Capacidade produtiva da Fábrica de Farinhas e Gorduras antes e depois da implementação do Sistema de Monitoramento de digestores

Capacidade de produção nominal FFG - Antes x Depois			
	Antes		Depois
	2020	2021	2022
Capacidade de produção realizada (ton)	124,8	130	156
Capacidade de produção nominal (ton)	156	156	156

Fonte: O autor (2023)

A Figura 25, a seguir, compara o desempenho da capacidade produtiva da fábrica onde a pesquisa foi aplicada nos últimos três anos:

Figura 25 - Capacidade nominal FFG: Realizado de 2020 a 2022



Fonte: O autor (2023)

Nota-se que, antes da implementação do Sistema de Monitoramento de Digestores, nos anos de 2020 e 2021, a Fábrica de Farinhas e Gorduras não conseguiu operar em sua capacidade produtiva nominal, registrando 124,8 e 130 toneladas, respectivamente. Essa redução na capacidade produtiva teve um impacto financeiro significativo para a empresa, resultando em perdas de R\$ 79.560,00 em 2020 e R\$ 66.300,00 em 2021.

A causa principal dessa diminuição de capacidade foi a indisponibilidade de digestores, devido a reprovações inesperadas por perda de espessura em ambos os casos. Já em 2022, com a utilização do sistema como suporte para a tomada de decisão de troca do tampo dianteiro do Digestor de Penas 01, não houve impactos na disponibilidade por reprovação de equipamentos.

Segundo o Gerente de manutenção e utilidades da unidade: “Foi utilizada uma metodologia, aplicado o conhecimento técnico e o resultado foi fantástico”. Já o Supervisor de planejamento e controle da manutenção citou que: “Esse tipo de trabalho ressalta a importância da engenharia de manutenção para a melhoria contínua de resultados”.

Levando-se em conta que a utilização do Sistema de Monitoramento de Digestores permitiu a atuação da manutenção antes que houvesse a falha do equipamento, podemos reforçar o conceito de monitoramento preditivo definido por Pinto e Xavier (2001).

Assim como proposto por Viana (2002), é através de inspeções que se avalia a condição de ativos, através do monitoramento de uma série de itens, de acordo com as características do equipamento, buscando-se a detecção de avarias e/ou sintomas de falha.

Através dos dados coletados em inspeções, foi possível realizar a predição do desgaste de componentes de digestores em função do tempo, extrapolando-se os dados, indo de encontro com Gilat e Subramaniam (2008), com a utilização de regressão linear por mínimos quadrados.

Com a finalidade de manter a confiabilidade dos dados coletados, seguiu-se os passos propostos por Battisti (2018), para a criação de um banco de dados íntegro. Utilizou-se o *software Microsoft Access* para a geração de tabelas, consultas e modelagem gráfica da interface do sistema.

Para Callegari-Jacques (2003), quanto mais próximos de 1 os coeficientes de Correlação e de Determinação, maior é a força de relação entre as variáveis e melhor é a representatividade dos dados, através da linha de tendência.

No caso específico do tampo que foi optado por sua substituição, o coeficiente de correlação calculado foi 0,9815, enquanto o coeficiente de determinação foi 0,9632. Confrontando-se os resultados do sistema com a metodologia proposta por Callegari-Jacques (2003), conclui-se que a relação entre as variáveis espessura e tempo é “muito forte”. Portanto, a ferramenta de regressão linear é confiável como suporte à tomada de decisão.

Sendo assim, pode-se interpretar que a pesquisa aplicada contribui para a literatura ao demonstrar, por meio de uma aplicação prática, que a utilização da regressão linear é uma ferramenta confiável para prever os limites de vida útil dos componentes. Essa abordagem se mostrou essencial para manter a disponibilidade dos equipamentos, bem como para garantir uma gestão eficiente e econômica da manutenção.

Neste trabalho foi desenvolvida e implementada uma ferramenta de banco de dados que utiliza o método de regressão linear para gerar curvas de tendência. Essa abordagem integrou conceitos de manutenção preditiva, banco de dados e análise estatística em um único sistema.

Por meio do Sistema de Monitoramento de Digestores, foi possível constatar que, em equipamentos nos quais um parâmetro monitorável varia com o tempo, como desgaste, alongamento, perda de diâmetro ou de espessura, é viável utilizar o modelo de regressão linear para auxiliar a manutenção no monitoramento e na tomada de decisão.

É importante ressaltar que, a efetividade do uso da linha de tendência depende da proximidade do Coeficiente de Correlação (R) e do Coeficiente de Determinação (R^2) a 1. Quando há uma relação forte e representativa dos dados, é possível evitar impactos e perdas de disponibilidade decorrentes de falhas nos componentes.

Dessa forma, independentemente do tipo de processo produtivo e do parâmetro monitorado, desde que se obtenham coeficientes de correlação e determinação próximos de 1, a regressão linear pode projetar com confiabilidade os limites de vida útil.

Na empresa onde aplicou-se a pesquisa, a eficácia da ferramenta comprovou-se através do suporte à decisão de substituição do tampo dianteiro do Digestor de Penas 01, resultando em impactos significativos na capacidade produtiva da empresa. Como resultado, o sistema foi validado como uma ferramenta de suporte à manutenção da empresa, fornecendo auxílio no planejamento de manutenções e no controle de custos relacionados aos componentes dos digestores de penas.

Segundo o Supervisor de Produção da unidade, os resultados de capacidade produtiva obtidos em 2022 foram “extremamente satisfatórios”. Ele ressaltou que: “...foi a primeira vez em muito tempo que todos os digestores operaram ao longo de um ano inteiro.” Essa fato comprova a efetividade das ações implementadas com base na pesquisa aplicada.

Além disso, o Sistema de Monitoramento de Digestores recebeu um certificado de destaque, reconhecendo a importância da ferramenta implementada na otimização da disponibilidade dos equipamentos e na melhoria geral do desempenho produtivo da fábrica, conforme pode-se observar no Apêndice 2.

Esses resultados reforçam a relevância da regressão linear como uma ferramenta confiável para auxiliar na gestão dos equipamentos e da manutenção. A implementação bem-sucedida do sistema demonstrou como a utilização dessa metodologia pode trazer benefícios significativos para as empresas, contribuindo para a eficiência operacional e para a obtenção de resultados positivos no ambiente industrial.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir da presente pesquisa, concluiu-se que é possível utilizar a regressão linear como uma ferramenta de auxílio na tomada de ações, de modo a evitar a perda de disponibilidade e, conseqüentemente, a redução da capacidade produtiva.

O objetivo geral foi plenamente atingido, pois o experimento de utilização da regressão linear se demonstrou eficiente para auxílio na tomada de decisões relacionadas ao desgaste de componentes de digestores.

Através do coeficiente de correlação e do coeficiente de determinação, conclui-se que as linhas de tendência se mostraram confiáveis na identificação de padrões de desgaste e previsibilidade do limite de vida útil de componentes.

As informações fornecidas pelo sistema implementado revelaram-se relevantes para auxiliar nas decisões de manutenção e disponibilidade dos digestores de penas, uma vez que desempenharam um papel determinante na estratégia de substituição do tampo dianteiro do Digestor de Penas 01. Essa decisão evitou uma perda de produção de 15,6 toneladas, o que representaria um prejuízo de R\$ 39.780,00 para a companhia.

Quanto aos objetivos específicos deste estudo, foram alcançados de acordo com as seguintes etapas: primeiro, coletaram-se dados sobre os impactos da indisponibilidade dos digestores na produção de farinha de penas. Em seguida, utilizou-se a regressão linear como ferramenta de análise desses dados, conforme proposto inicialmente.

Posteriormente, implementou-se um sistema que utilizou a linha de tendência para acompanhar o desgaste dos componentes dos digestores ao longo do tempo. Por fim, a efetividade dessa ferramenta foi validada por meio de métodos estatísticos.

Com base nos resultados obtidos na pesquisa, pode-se concluir que o desenvolvimento dos objetivos específicos foi fundamental para alcançar o objetivo geral do estudo. A ferramenta implementada revelou-se eficaz no suporte à tomada de decisões relacionadas à disponibilidade da linha de digestores de penas da companhia.

Ao encontro e continuidade do presente trabalho, seriam pertinentes as seguintes pesquisas futuras:

- Ampliar o escopo do estudo para incluir a linha de digestores de vísceras, a fim de evitar impactos inesperados na capacidade produtiva da farinha de vísceras suínas;
- Definir pontos de controle e adicionar os eixos no Sistema de Monitoramento de Digestores, considerando que esses componentes também são afetados pela perda de espessura ao longo do tempo;
- Experimentar outros modelos de extrapolação de dados, como regressão exponencial, logarítmica, potencial e polinomial em diferentes graus, e analisar a efetividade dessas curvas por meio dos coeficientes de correlação e determinação;
- Explorar o uso da regressão linear para acompanhamento de outros parâmetros monitoráveis, como o alongamento e redução de diâmetro.

Essas sugestões de pesquisas podem contribuir para expandir e aprimorar a análise de digestores, assim como fornecer *insights* valiosos para a manutenção preditiva e otimização dos processos industriais relacionados, não limitando-se à fábricas de farinhas, mas podendo aprimorar o monitoramento de equipamentos em outros setores da indústria.

7 REFERÊNCIAS

7.1 REFERÊNCIAS NOMINAIS

ASSUMPÇÃO, Renato Fortes; DE CARVALHO, Flavio Lucio Santos. **Proposta de planejamento operacional em paradas para manutenção e inspeção NR 13 na área de recuperação e utilidades na indústria de celulose**. Brazilian Journal of Production Engineering, 2021. Disponível em: <https://unisales.br/wp-content/uploads/2023/06/PROPOSTA-DE-PLANEJAMENTO-OPERACIONAL-EM-PARADAS-PARA-MANUTENCAO-E-INSPECAO-NR-13-NA-AREA-DE-RECUPERACAO-E-UTILIDADES-NA-INDUSTRIA-DE-CELULOSE.pdf>.

Acesso em: 2 jul. 2023.

BASTOS, E.V.P.; GUIMARÃES, J. C. F.; SEVERO, E. A. **Modelo de regressão linear para análise de investimentos em uma empresa do ramo petrolífero**. Revista Produção e Desenvolvimento, v. 01, n. 1, p. 77-88, 2015. Disponível em: <http://revistas.cefet-rj.br/index.php/producaoedesenvolvimento>.

Acesso em: 4 abr. 2023.

BATTISTI, Júlio. **Aprenda com Júlio Battisti: Access 2013 Avançado Macros e Programação VBA - Através de Exemplos Práticos Passo a Passo**. São Paulo: Instituto Alpha, 2018.

BERETA, V.; RODRIGUES, A. M.; REBELATO, M. G. **Referencial metodológico para a avaliação do desempenho ambiental de empresas da indústria avícola**. Revista Produção Online, [S. l.], v. 22, n. 1, p. 2316–2348, 2023. DOI: 10.14488/1676-1901.v22i1.4556. Disponível em: <https://www.producaoonline.org.br/rpo/article/view/4556>. Acesso em: 13 ago. 2023.

BUCHARLES, Luciano G. E. **Explosão de Vaso Pressurizado**. 2019. Disponível em: <https://ibape-nacional.com.br/biblioteca/wp-content/uploads/2020/02/AO-22-Explos%C3%A3o-de-Vaso-Pressurizado.pdf>. Acesso em: 27 out. 2020.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003.

DA SILVA, Gilberto José Ribeiro. **Contribuição para o estudo do processo de conformação de chapas utilizando um fluido na substituição das formas da matriz: hidroconformação**. 2006. Dissertação (Mestrado em Processos Industriais) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, São Paulo, 2006.

DA SILVA, Gilmar José; FERREIRA, Júlio Cesar Oliveira. **Análise comparativa de desempenho de consultas entre um banco de dados relacional e um banco de dados não relacional**. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Computação. Universidade de Uberaba - UNIUBE, 2017.

FERROLI, Paulo Cesar Machado. **Balanceamento do sistema produtivo de farinhas e óleos: fábricas de subprodutos de origem animal**. 1999. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Florianópolis, 1999.

FERROLI, Paulo Cesar Machado; NETO, Miguel Fiod; FILHO, Nelson Casarotto; CASTRO, João Ernesto E. **Fábricas de Subprodutos de Origem Animal: a Importância do Balanceamento das Cargas dos Digestores de Vísceras.** Produção, v. 10, n. 2, p. 5-20, 2001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/prod/a/xSCLpJ6wgHg3L9dKXtBLcmH/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10 jul. 2023.

GILAT, Amos; SUBRAMANIAM, Vish. **Métodos Numéricos para Engenheiros e Cientistas: Uma introdução com aplicações usando o MATLAB.** 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

MANOVICH, Lev. **The Database.** Revista Eco Pós, v. 18, n. 1, 2015. Disponível em: https://ecopos.emnuvens.com.br/eco_pos/article/view/2366/2024. Acesso em: 22 mar. 2023.

MARQUES, Ana Claudia; BRITO, Jorge Nei. **Importância da manutenção preditiva para diminuir o custo em manutenção e aumentar a vida útil dos equipamentos.** Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 5, n. 7, p. 8913-8923, 2019. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/2315/2322>. Acesso em: 20 mar. 2023.

MEDEIROS, Flaviani Souto Bolzan; BIANCHI, Renata Coradini. **A aplicação do método regressão linear simples na demanda de produtos sazonais: um estudo de caso.** Disciplinarum Scientia. Série: Ciências Sociais Aplicadas, Percentil Scopus: 50%, v. 5, n. 1, p. 35-53, 2009. Disponível em: <https://periodicos.ufn.edu.br/index.php/disciplinarumSA/article/view/1493/1407>. Acesso em: 10 jul. 2023.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. **Norma Regulamentadora NR-13: Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulações.** 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-13-atualizada-2022-retificada.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2023.

NUNES, R. V. **Digestibilidade de nutrientes e valores energéticos de alguns alimentos para aves.** 2003. 103 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

OTANI, Mario.; MACHADO, Waltair Vieira. **A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial.** Revista Gestão Industrial, p. 01-16, 2008. Disponível em: <http://www.mantenimentomundial.com/notas/proposta.pdf>. Acesso em: 08 abr. 2023.

PARK, Namsu; HUH, Hoon; LIM, Sung Jun; LOU, Yanshan; KANG, Yeon Sik; SEO, Min Hong. **Fracture-based forming limit criteria for anisotropic materials in sheet metal forming.** International Journal of Plasticity, Percentil Scopus: 97%, v. 96, p. 1-35, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0749641916300651>. Acesso em: 12 jul. 2023.

PINTO, Alan Kardec; XAVIER, Julio Aquino Nascif. **Manutenção: Função estratégica.** 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

PORTARIA Nº 286, 2018. Disponível em: http://www.adab.ba.gov.br/arquivos/File/ASCOM2019/Port_286_de_31_10_2018.pdf. Acesso em: 27 out. 2020.

PRATA, P.A.; FERREIRA, G.C.; GOULART, C.S. **Plano de inspeção de vaso de pressão baseado na NR-13 em uma usina sucroalcooleira.** 2018. Disponível em: <http://publicacoes.facthus.edu.br/index.php/geral/article/view/353>. Acesso em: 29 out. 2020.

RABELO, Mariane Helena Sances; SILVA, Eric Keven; PERES, Alexandre de Paula. **Análise de Modos e Efeitos de Falha na avaliação dos impactos ambientais provenientes do abate animal.** Eng Sanit Ambient, v. 19, n. 1, p. 79-86, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/gHGWdp3DmhgGnKRK6Ljhc6x/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 22 out. 2020.

ROCHA, Rafael Pandolfo da; RIFFEL, Matheus Henrique; ROSIAK, André; SCHAEFFER, Lirio. **Caracterização dos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 430 para aplicação em processos de estampagem profunda.** Brazilian Journal of Development, v. 8, n. 7, p. 51077-51101, 2022. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/50254/pdf>. Acesso em: 12 jul. 2023.

RODRIGUES, Sandra Cristina Antunes. **Modelo de Regressão Linear e suas Aplicações.** 2012. Dissertação (Mestrado em Ensino de Matemática no 3º Ciclo do Ensino Básico e no Ensino Secundário). Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2012.

SCAPIM, M.R.S.; LOURES, E.G.; ROSTAGNO, H.S. **Avaliação nutricional da farinha de penas e de sangue para frangos de corte submetida a diferentes tratamentos térmicos.** Acta Scientiarum Animal Sciences, v. 25, n. 1, p. 91-98, 2003.

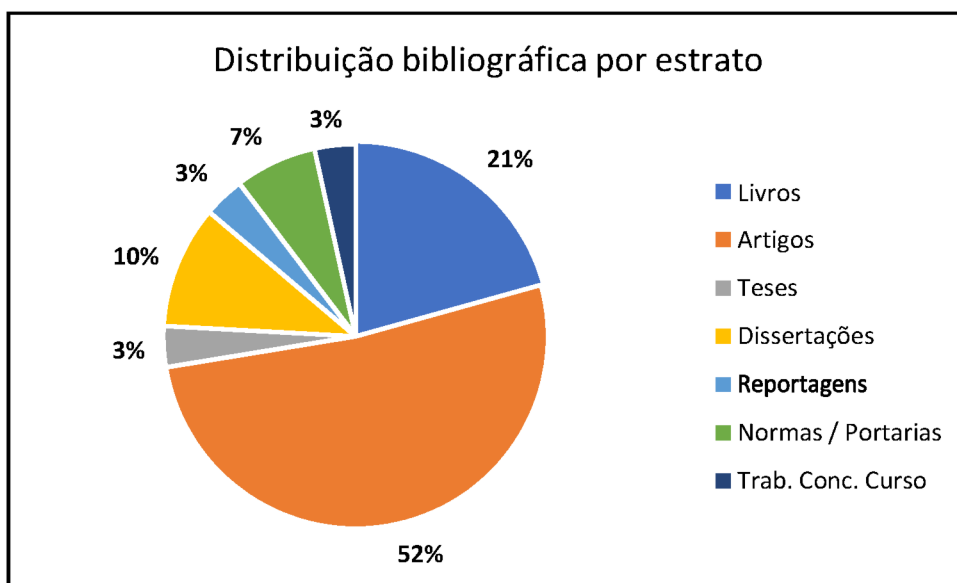
SCHAEFFER, Lirio. **Importância dos processos de manufatura por conformação mecânica para o Brasil.** Revista Thema, v. 19, n. 1, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ifsul.edu.br/index.php/thema/article/view/2373>. Acesso em: 9 jul. 2023.

SINHORINI, Márcia Regina. **Processo de produção de farinha de penas hidrolisadas: estudos de otimização do teor proteico e do valor de digestibilidade da proteína.** 2013. 105 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2013.

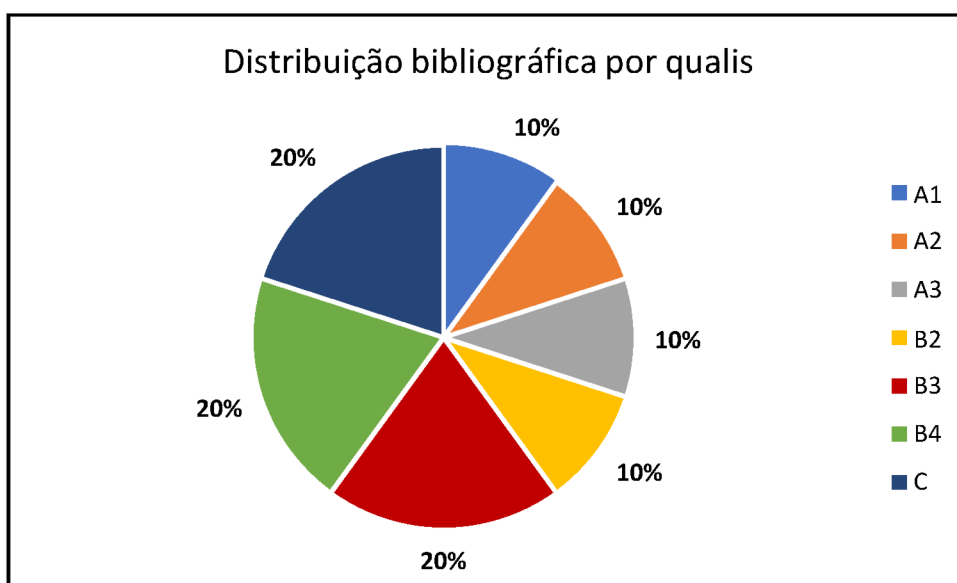
VIANA, Herbert Ricardo Garcia. **PCM, Planejamento e Controle da Manutenção.** Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

VITALI DUMINELLI, M.; ILKA JACINTO SALVARO, G.; DE OLIVEIRA ESTEVAM, D. **Avicultura e Sistemas Integrados: Cenário Brasileiro e Catarinense da Produção de Aves.** Desenvolvimento Socioeconômico em Debate. [S. l.], v. 9, n. 1, p. 137–151, 2023. DOI: 10.18616/rdsd.v9i1.7863. Disponível em: <https://periodicos.unesc.net/ojs/index.php/RDSD/article/view/7863>. Acesso em: 16 ago. 2023.

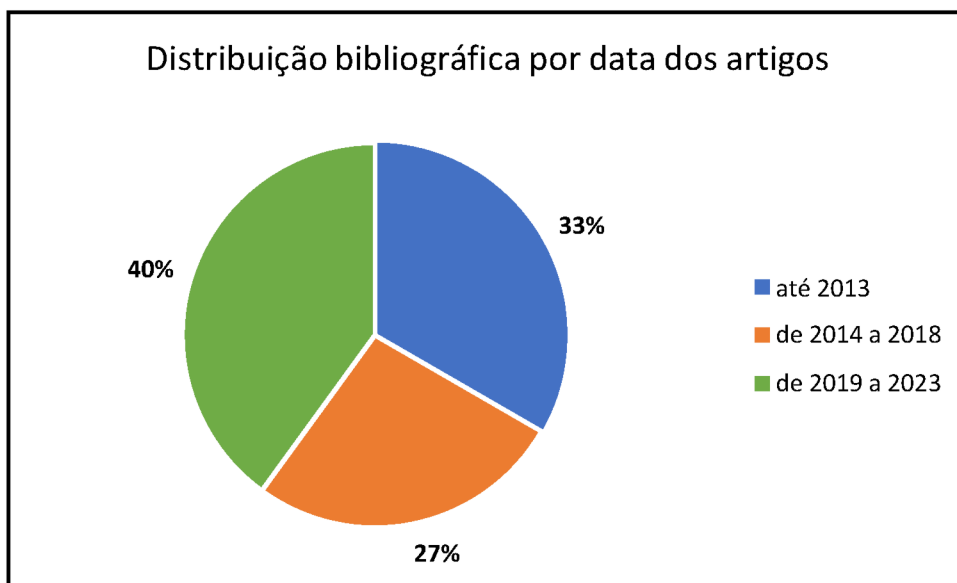
7.2 REFERÊNCIAS POR ESTRATO



7.3 REFERÊNCIAS POR QUALIS



7.4 REFERÊNCIAS POR DATA DOS ARTIGOS



ANEXOS

ANEXO 1 – RELATÓRIO DE INSPEÇÃO NR-13 ANTES DA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

Relatório de Inspeção Nº I200205-010				Página 1 de 5		
III-FSP-0008-DGP – DIGESTOR DE PENAS 01						
1. Objetivo						
Verificar as condições de segurança, operacionais e de projeto do equipamento através de inspeção, em atendimento à Norma Regulamentadora NR13, por meio de técnicas de manutenção preditiva.						
2. Cliente e Responsabilidade						
Responsabilidade de inspeção			Cliente			
Empresa _____			Empresa _____			
Endereço _____			Endereço _____			
Responsável _____			Contato _____			
Inspetor _____						
3. Tipo e Período da Inspeção						
Início: 02/05/2020		Tipo de inspeção:		Periódica		
Fim: 16/06/2020		Tipos de exame:		Externa e Interna		
4. Caracterização do Equipamento						
Localização	FFG	Cód. de Projeto	ASME VIII, Div.1 Ed.2001	Comp. Costado (mm)	3600	
Fabricante	Prestatti	Fluido de Operação	Vapor saturado / produto	Volume (m³)	5,0	
Modelo (Nº de Série)	DPP 5000 (5132-11)	PMTA (bar)	5,61	Grupo de Risco	4	
Formato ou tipo	Cilíndrico horizontal	PTH (bar)	7,65	Classe do Fluido	C	
Data de Fabricação	2011	Diâm. Interno (mm)	1360	Categoria NR13	V	
5. Recomendações						
<ul style="list-style-type: none"> Reparar o Isolamento Térmico junto ao tampo Traseiro, está danificado, conforme foto 04. O tampo frontal apresenta pontos com espessuras de 10,2 mm, é bastante provável que até a próxima inspeção tal espessura já tenha atingido a mínima que é de 9,52 mm, frente a abrasividade do produto processado e o meio agressivo em termos de corrosão, recomendamos a unidade que já considere no planejamento do próximo ano a substituição deste tampo. Recomendado o preenchimento das soldas do eixo que apresentam corrosão preferencial nas soldas, como aquelas demonstradas na foto 12 e 13, o preenchimento deverá ser realizado após limpeza adequada com escova rotativa, estes vales de corrosão preferencial acabam por acumular matéria orgânica, acelerando o processo corrosivo e reduzindo a vida útil do eixo, o acabamento das soldas nas partes internas dos digestores deve evitar ao máximo a existência de pontos de estagnação análogos a estes. Reentrâncias também podem gerar pontos de concentração de tensão, ainda mais no eixo, onde além dos esforços mecânicos por pressão ainda existem os carregamentos pela rotação e agitação da carga de produto, quando realizado este procedimento deverá constar no PAR conforme item 13.3.3 da NR 13; 						
6. Providências Necessárias						
<ul style="list-style-type: none"> Providenciar certificados de calibração dos dispositivos de segurança, da PSV-DIG-P01 conforme NR-13.5.1.6, alínea (e). Providenciar a substituição do tampo traseiro interno, que apresenta espessura abaixo da mínima requerida para operação segura na PMTA requerida (Mínima: 9,52 mm/menor atual: 5,6 mm), conforme prontuário original nos parâmetros do código de projeto ASME VIII, Div.1 Ed. 2001. (Foto 18). Reparar as soldas reprovadas mostradas nas fotos 08 a 11. Realizar a limpeza da corrosão incidente no flange frontal (união entre o costado e tampo dianteiro), conforme figuras 16 e 17. (Recomendada a utilização de escova rotativa) Os parâmetros dos reparos e intervenções mecânicas, <u>principalmente envolvendo soldagem, mandrilhamento e substituição de peças pressurizadas</u>, devem ser previamente estabelecidos em projeto de alteração e reparo, conforme item NR-13.3.3 e seus respectivos subitens, bem como realizar inspeção extraordinária após reparo, conforme citado no item 7 deste relatório. 						
7. Conclusão						
A integridade não pode ser garantida, frente aos problemas estruturais identificados, para que a condição de integridade estrutural possa ser recuperada deverão ser tomadas as providências citadas conforme item 6 deste relatório, bem como os exames extraordinários citados no item 8, também deste relatório.						
8. Próxima Inspeção						
Exame Externo, interno e teste hidrostático em todas as partes, em caráter extraordinário pós reparo, conforme NR-13.5.4.11 (b).						
9. Dispositivos de Segurança, Instrumentos e Espessuras						
Válvula de segurança			Instrumento de medição de pressão		Espessuras (mm)	
Identificação	PSV-DIG-P01	PSV-397	Identificação	MAN-016	Camisa	9,4
Pressão de ajuste	4,90 kgf/cm²	4,00 kgf/cm²	Escala	0 a 10 kgf/cm²	Tampo dianteiro	10,2

Relatório de Inspeção Nº I200205-010				Página	
III-FSP-0008-DGP – DIGESTOR DE PENAS 01				2 de 5	

Última calibração	08/03/19	28/09/2019	Calibração	30/05/2018	Tampo traseiro	5,6
Nº Certificado	-	2019-106-2	Nº Certificado	BRF/11416	Eixo principal	16,6
					Tubo ancoragem	7,4
					Costado	15,0

10. Resultados das Inspeções e intervenções executadas

- Identificado Isolamento térmico do tampo traseiro danificado.
- Identificada espessura abaixo dos parâmetros estabelecidos em prontuário.
- Identificada corrosão severa na união entre o flange que une o costado e o tampo frontal.
- Identificadas soldas com defeitos na face entre bocal de descarga e tampo frontal, pela parte interna.
- Identificado que o tampo frontal tende a atingir a espessura mínima ou próximo da mesma até a inspeção seguinte.

11. Observações

As recomendações decorrentes da inspeção devem ser implementadas pelo empregador, com a determinação de prazos e responsáveis pela sua execução conforme NR13, item 13.5.4.17;

12. Exame visual Externo

Exame visual realizado externamente verificando-se os níveis de desgaste, corrosão e a existência possíveis defeitos ou deformações nas soldas e chapas do vaso quando estas visíveis, avaliação de isolamento térmico e condições da instalação, bem como dispositivos de segurança e medição de pressão.

Registro Fotográfico do Exame Externo



01



02



03



04

ANEXO 2 – RELATÓRIO DE INSPEÇÃO NR-13 APÓS DA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

Laudo de inspeção extraordinária de digestor

Página 1 de 8

Digestor de Penas 02 - Tag: DIG032820262

Laudo: LVP-497.21-04

Data de emissão: 10/12/2021

1. DADOS DO CONTRATANTE

Cliente:	Endereço:		
Local:	CEP:	CNPJ:	

2. OBJETIVO

O presente relatório de inspeção visa garantir e assegurar o atendimento pleno dos requisitos da Norma Regulamentadora NR13 do Ministério da Economia - Secretaria Especial de Previdência e Trabalho - Alterada conforme Portaria SEPRT n.º 915 de 30 de julho de 2019.

3. CLASSIFICAÇÃO CONFORME NORMA NR13

Fluido de trabalho:	Classe do fluido:	Categoria conforme NR-13:
Vapor	C	III

4. DADOS DE PROJETO E OPERACIONAIS

Fabricante:	Número de fabricação:	Código de projeto e ano de edição:
Prestatti	5131	DIV 1 Ed 2001
Norma de fabricação:	Ano de fabricação:	Modelo:
ASME VIII	2011	DIG03288219
Tipo:	Local de instalação:	Material de construção:
Cilíndrico horizontal	FFG	kgf/m²
Pressão de trabalho:	Pressão de projeto:	PMTA:
4 - kgf/m²	5,61 kgf/m²	5,61 kgf/m²
Pressão de teste:	Temperatura de operação:	Temperatura de projeto:
7,65 kgf/m²	158,1 °C	158,1 °C
Faixa de temperatura de operação:	Volume:	Peso do vaso vazio (Kg):
Acima de zero °C	5000 L	9000 Kg
Área externa (m²):	Número do prontuário:	
-	5131/11	

5. INSPEÇÃO CORPO

Realizada ✓

Alinhamento e prumo:	Conforme	Aterramento elétrico:	Existente	Bacia de contenção:	Existente
Base/pla/suportação:	Conforme	Chumbadores e porcas da base:	Conforme	Parafusos e porcas:	Conforme
Juntas aparafusadas:	Conforme	Costado:	Conforme	Tampas:	Conforme
Soldas dos bocais:	Conforme	Soldas do costado:	Conforme	Soldas das tampas:	Conforme
Outras soldas:	Conforme	Oxidação:	Existente	Corrosão:	Inexistente
Vazamentos:	Inexistente	Vibrações excessivas:	Não avaliada	Visor de nível:	Não aplicável
Purgador:	Conforme	Válvulas de bloqueio na entrada e saída:	Conforme	Termômetro:	Não aplicável
Placa de identificação:	Não conforme	Indicação da categoria e número de identificação:	Não conforme		

6. INSPEÇÃO CAMISA

Realizada ✓

Alinhamento e prumo:	Conforme	Costado:	Conforme	Soldas dos bocais:	Conforme
Soldas do costado:	Conforme	Outras soldas:	Conforme	Oxidação:	Existente
Corrosão:	Inexistente	Trincas, Rachaduras:	Inexistente	Vazamentos:	Inexistente
Vibrações excessivas:	Não avaliada	Válvulas de bloqueio na entrada e saída:	Conforme		

7. INSPEÇÃO EIXO

Realizada ✓

Alinhamento e prumo:	Conforme	Suportação:	Conforme	Parafusos e porcas:	Conforme
Juntas aparafusadas:	Não aplicável	Soldas:	Conforme	Oxidação:	Existente
Corrosão:	Inexistente	Trincas, Rachaduras:	Inexistente		
Vibrações excessivas:	Não avaliada	Visor de nível:	Inexistente	Vazamentos:	Inexistente

Laudo de inspeção extraordinária de digestor

Página 2 de 8

Digestor de Penas 02 - Tag: DIG032820262

Laudo: LVP-497.21-04

8. INSPEÇÃO DIMENSIONAL

Comprimento entre soldas camisa: 3600 mm	Comprimento entre soldas corpo: 3464 mm	Comprimento total: -
Formato:	Tampo esq. / Inf.	Tampo dir. / sup.
Altura:	Toristérico	Toristérico
Diâmetro interno camisa:		1360 mm
Diâmetro externo corpo:		1500 mm

8.1. Medição de espessura por ultrassom - ME

ANEXO 1 - Medição do coprocessor para o digestor

TAMPO ESQ/INF

TAMPO DIR/SUP

1:	18 mm	13	14	15	19:	19 mm
2:	18,9 mm	A) 13,9 mm	A) 18,44 mm	A) 19,67 mm	20:	18,7 mm
3:	17,9 mm	B) 15,92 mm	B) 15,75 mm	B) 15,72 mm	21:	18,9 mm
4:	17,8 mm	C) 13,8 mm	C) 13,1 mm	C) 13,45 mm	22:	18,6 mm
5:	19 mm	D) 17,29 mm	D) 14,48 mm	D) 17,66 mm	23:	18,9 mm
6:	18,9 mm				24:	18,5 mm
7:	18,9 mm	16	17	18	25:	17,9 mm
8:	18,8 mm	A) 9,5 mm	A) 9,68 mm	A) 9,7 mm	26:	18,6 mm
9:	17,9 mm	B) 9,79 mm	B) 9,68 mm	B) 9,69 mm	27:	18,9 mm
10:	18 mm	C) 9,75 mm	C) 9,73 mm	C) 9,7 mm	28:	18,9 mm
11:	18,9 mm	D) 9,66 mm	D) 9,7 mm	D) 9,73 mm	29:	18,9 mm
12:	18,9 mm				30:	19 mm

8.2. Espessura

	Nominal	Mínima admissível
Corpo:	9,52 mm	7,9 mm
Camisa:	19,05 mm	9,52 mm
Elxo:	17,48 mm	-
Tampo dir. / sup:	-	-
Tampo esq. / Inf:	-	-

9. DISPOSITIVO DE SEGURANÇA

Localização:	Tipo de dispositivo:	Número/Tag:
Geratriz superior do costado	Valvula de segurança	-
Dispositivo contra bloqueio inadvertido:	Canalização da descarga:	Condições operacionais:
Não aplicável	Inexistente	Conforme
Calibração:	Certificado de calibração:	Data de calibração:
Conforme	-	-

10. DISPOSITIVO INDICADOR DE PRESSÃO

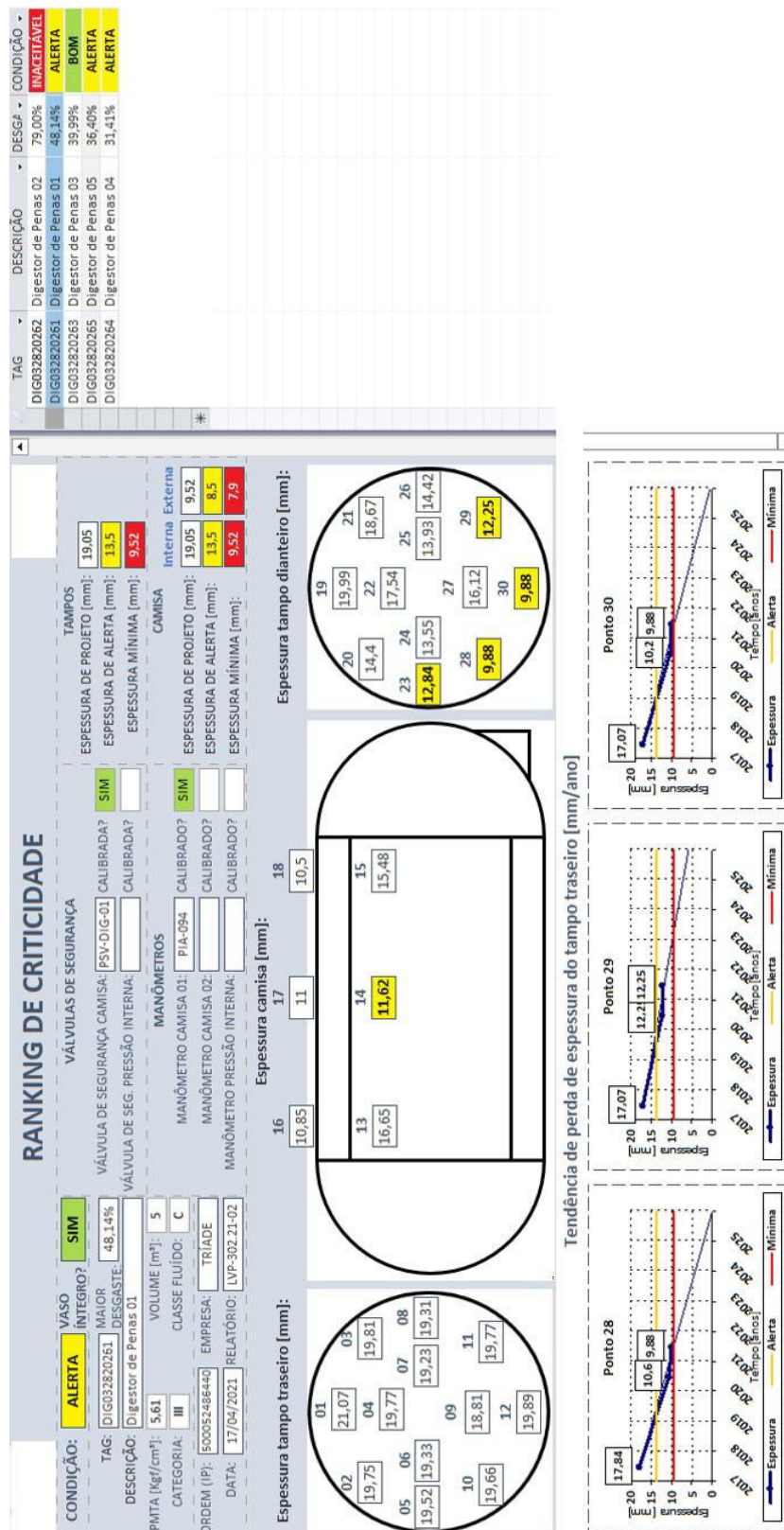
Localização:	Tipo de indicador:	Número/Tag:
Geratriz superior do costado	Manômetro	-
Modelo:	Faixa de pressão:	Condições operacionais:
Analogico Reto Vertical	Adequada ao equipamento	Conforme
Calibração:	Certificado de calibração:	Data de calibração:
Conforme	-	-

11. AMBIENTE DE INSTALAÇÃO

Ambiente de instalação:	Acesso fácil e seguro:	Deteção de vazamento de gases tóxicos:
Fechado	Conforme	Não aplicável
Ventilação permanente:	Iluminação permanente:	Iluminação de emergência:
Existente	Existente	Existente
Drenos/respiros/bocas de visita/indicadores de nível:	Saídas amplas e desobstruídas:	
Acessíveis	Conforme	

APÊNDICES

APÊNDICE 1 – RANKING DE CRITICIDADE DO SISTEMA, COM CURVAS DE REGRESSÃO LINEAR



APÊNDICE 2 – ENTREGA DO CERTIFICADO DE DESTAQUE PELA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO POR REGRESSÃO LINEAR

