

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ADMINISTRAÇÃO, CIÊNCIAS CONTÁBEIS,
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SERVIÇO SOCIAL

LUCAS DE OLIVEIRA MARQUES

APLICAÇÃO DOS CONCEITOS DE MANUTENÇÃO
CENTRADA EM CONFIABILIDADE NA CORRENTE DO
DIFUSOR DE UMA USINA BIOENERGÉTICA

ITUIUTABA
2022

LUCAS DE OLIVEIRA MARQUES

APLICAÇÃO DOS CONCEITOS DE MANUTENÇÃO CENTRADA EM
CONFIABILIDADE NA CORRENTE DO DIFUSOR DE UMA USINA
BIOENERGÉTICA

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia de
Produção como requisito parcial para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia de
Produção.

Orientadora: Mara Rúbia da Silva Miranda

ITUIUTABA
2022

APLICAÇÃO DOS CONCEITOS DE MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE NA CORRENTE DO DIFUSOR DE UMA USINA BIOENERGÉTICA

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia de Produção, da Faculdade de Administração, Ciências Contábeis, Engenharia de Produção e Serviço Social (FACES) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção avaliado pela banca examinadora formada por:

Ituiutaba, 11 de agosto de 2022.
Banca Examinadora:

Mara Rúbia da Silva Miranda (orientadora),
Universidade Federal de Uberlândia

Gabriela Lima Menegaz,
Universidade Federal de Uberlândia

Vanessa Aparecida de Oliveira Rosa,
Universidade Federal de Uberlândia

Dedico este trabalho aos nossos pais, mães, irmãos e amigos,
por sempre nos apoiarem para alcançarmos nossos objetivos.

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste estudo e trabalho de conclusão de curso contou com a ajuda de várias pessoas, dentre as quais podemos destacar:

- À professora orientadora que durante meses me acompanhou pontualmente dando todo auxílio necessário para a elaboração do trabalho;
- Aos professores do curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Uberlândia que através dos seus ensinamentos permitiram que nós pudéssemos hoje concluir esse trabalho com louvor;
- A todos que participaram das pesquisas e tiraram um tempo de sua jornada de trabalho para sanar qualquer dúvida que viesse a ocorrer. Onde agradeço em especial ao Engenheiro de Confiabilidade Samuel Pagotto pela colaboração e disposição no processo de obtenção e análise de dados, modelagem e investigação.
- Aos meus pais, amigos e pessoas próximas pela compreensão das ausências e pelo afastamento temporário, como também pelos incentivos que não me permitiram desistir de meus objetivos durante o período acadêmico.

“Mais cedo ou mais tarde o homem que vence é aquele que pensa que pode.”

Bruce Lee

RESUMO

Em uma empresa bioenergética os custos de manutenção são elevados, já que o ambiente em que os equipamentos atuam é bastante agressivo, em outras palavras, eles têm de desempenhar sua função de projeto em condições adversas de operação, como poeira, umidade e altas temperaturas. Apesar dos obstáculos, esses equipamentos necessitam possuir uma alta confiabilidade e disponibilidade a fim de garantir a produção planejada. Dito isso é importante garantir o máximo da vida útil do equipamento responsável por não deixar a produção tanto de etanol, açúcar e eletricidade parar. Portanto neste estudo foi confrontado a vida útil especificada pelo fabricante da corrente de acionamento do difusor acerca de cinco diferentes esforços, no qual é estimado o desgaste real das correntes e determinado seu limite. Assim após a modelagem numérica pelo método dos elementos finitos do elo, foi simulado usando o maior desses esforços a fim de garantir com uma maior margem de segurança a vida útil do componente menos resistente do conjunto, aquele que sofre ruptura primeiro. Determinado assim a menor espessura desse componente em relação ao esforço utilizado.

Palavras-chave: Confiabilidade, Corrente, Desgaste, Vida útil.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema dos Métodos Clássicos e do Método dos Elementos Finitos	17
Figura 2 - Estrutura discretizada.....	19
Figura 3 - Ideia geral da Condição de Compatibilidade dos Deslocamentos.....	22
Figura 4 – Observação em relação às forças internas.....	23
Figura 5 - Método para análise de sistemas discretos	24
Figura 6 - Medidor de espessura por ultrassom.....	28
Figura 7 - Fluxograma de produção de açúcar e etanol.....	31
Figura 8 - Sistema de descarregamento.....	32
Figura 9 - Difusor	34
Figura 10 - Sistema de embebição do difusor	35
Figura 11 - Desenho da corrente REXNORD	37
Figura 12 - Representação dos componentes e características físicas.....	37
Figura 13 - Motor elétrico e plaqueta de dados	38
Figura 14 - Redutor de velocidade e plaqueta de dados.....	39
Figura 15 - Acoplamento limitador de torque	39
Figura 16 - Blox pot das medidas encontradas por linha (mm)	43
Figura 17 - Histograma da espessura por linha (mm)	44
Figura 18 - Mapa de calor das espessuras (mm)	45
Figura 19 - Tração adotada pelo projeto do eixo de acionamento	46
Figura 20 - Medida do elo enviado para ensaio	48
Figura 21 - Conjunto montado para o ensaio de tração antes e após a ruptura	48
Figura 22 - Modelo 3D e malha gerada para análise de elementos finitos	49
Figura 23 - PINO: Força = 1859,8 kN.....	50
Figura 24 - BLOCO INTERNO: Força = 1859,8 kN e Espessura = 88 mm.....	51
Figura 25 - PLACA EXTERNA: Força = 1859,8 kN e Espessura = 88 mm.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das classificações da pesquisa	27
Tabela 2 - Dados elétricos do motor utilizado.....	38
Tabela 3 - Dados técnicos do redutor utilizado	39
Tabela 4 - Dados técnicos do acoplamento limitador de torque.....	40
Tabela 5 - Dados técnicos da roda dentada	40
Tabela 6 - Propriedades mecânicas do aço SAE 4140	41
Tabela 7 - Dureza e energia de impacto do aço SAE 4140 após os tratamentos térmicos	41
Tabela 8 - Propriedades de aços e ligas temperadas.....	42
Tabela 9 - Dados gerais da amostragem (mm)	43
Tabela 10 - Informações CASE 2.....	47
Tabela 11 - Informações CASE 3.....	47
Tabela 12 - Informações da malha	49
Tabela 13 - Constantes	49
Tabela 14 - Resistências	50
Tabela 15 - Parâmetros de vida de tensão	50
Tabela 16 - Elasticidade isotrópica.....	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	OBJETIVOS DE PESQUISA	2
1.2.1	Objetivo geral	2
1.2.2	Objetivos específicos	2
1.3	JUSTIFICATIVA	3
1.4	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	3
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1	MANUTENÇÃO	5
2.1.1	Evolução da Manutenção	6
2.1.1.1	Primeira Geração	6
2.1.1.2	Segunda Geração	6
2.1.1.3	Terceira Geração	7
2.1.1.4	Quarta Geração	8
2.1.1.5	Quinta Geração	8
2.1.2	Tipos de Manutenção	9
2.1.2.1	Manutenção Corretiva	9
2.1.2.2	Manutenção Preventiva	10
2.1.2.3	Manutenção Preditiva	11
2.2	MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE (MCC)	12
2.2.1	Questões Básicas da MCC	14
2.2.2	Implantação da MCC	16
2.3	MODELAGEM NUMÉRICA	17
2.3.1	Idealização de Sistemas	18
2.3.1.1	Sistemas Contínuos	18
2.3.1.2	Sistemas Discretos	18
2.3.2	Tipos de Modelos Discretizados	19
2.3.2.1	Estruturas Reticuladas	19
2.3.2.2	Elementos Estruturais Conectados Continuamente	19
2.3.3	Análise Matricial de Estruturas	20
2.3.4	Leis Fundamentais	21
2.3.4.1	Lei do Equilíbrio de Forças	21
2.3.4.2	Lei da Compatibilidade de Deslocamentos	22
2.3.4.3	Lei de Comportamento do Material	22
2.3.5	Método dos Elementos Finitos	23
2.3.6	Aplicação do MEF	24
3	METODOLOGIA	26
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	26
3.2	TÉCNICAS DE COLETA DE DADOS	27
3.3	TÉCNICAS DE ANÁLISE DE DADOS	27
3.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	28
4	RESULTADOS	30
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA	30

4.2	MAPEAMENTO DA REALIDADE EMPRESARIAL	30
4.3	RECEPÇÃO, PREPARO E EXTRAÇÃO (RPE)	31
4.3.1	Difusor.....	33
4.4	PROPOSTAS DE MELHORIA	36
4.4.1	Informações dos Equipamentos	37
4.4.1.1	Corrente de Acionamento do Difusor	37
4.4.1.2	Motor Elétrico	38
4.4.1.3	Redutor de Velocidade.....	38
4.4.1.4	Acoplamento Limitador de Torque.....	39
4.4.1.5	Roda Dentada.....	40
4.4.2	Características Mecânicas dos Materiais do Elo	40
4.4.2.1	Pino e Bucha	40
4.4.2.2	Placa Externa e Bloco Interno	41
4.4.3	Desgaste Real	43
4.4.4	Simulação pelo Método dos Elementos Finitos	46
4.4.4.1	Case 1: Esforços de Projeto	46
4.4.4.2	Case 2: Esforço Real de Operação.....	46
4.4.4.3	Case 3: Esforço Máximo de Operação com Limitador.....	47
4.4.4.4	Case 4: Esforço Máximo de Operação Sem Limitador	47
4.4.4.5	Case 5: Esforço de Ruptura do Ensaio IPT.....	48
4.4.5	Modelagem do Conjunto	49
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
5.1	CONCLUSÕES DO TRABALHO	53
5.2	LIMITAÇÕES DO ESTUDO.....	53
5.3	TRABALHOS FUTUROS	54
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Numa época em que questões voltadas à segurança, proteção ambiental, a necessidade de alta produtividade e, respectivamente, do lucro afligem todas as instituições, torna-se necessária a utilização de todos os meios técnicos disponíveis para a sobrevivência das empresas, com maior eficiência nas operações e sem aumentar o risco geral envolvido.

Por outro lado, a grande competitividade existente no mercado sucroenergético impulsiona as indústrias para uma otimização constante de seus processos produtivos. Nesse contexto, cada vez mais se busca uma maior eficiência de seus equipamentos, máxima disponibilidade para operação e custos de manutenção adequados. Inclusive pelo fato de o setor possuir um processo produtivo que envolve muitas etapas e equipamentos, onde requer diversos procedimentos de controle ao longo de toda a cadeia produtiva. Castro (2018) salienta que, para se ter triunfo nesse setor é necessário ter êxito na sequência de operações realizadas, já que ela é diretamente proporcional a eficiência da empresa.

Diante dessa preocupação é percebida que a manutenção feita em intervalos e voltada para o reparo, isto é, a manutenção preventiva e corretiva precisa evoluir rapidamente. Surge assim neste meio a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC), que de acordo com Deshpande e Modak (2002), essa metodologia oferece uma estrutura capaz de reduzir as atividades de manutenção e os custos relacionados a elas ao mínimo possível, sem afetar o desempenho da planta, a qualidade do produto e a segurança ou a integridade ambiental.

Segundo Ribeiro e Fogliatto (2009), a dificuldade dessa metodologia, que devido à redução dos custos de manutenção se mostra importante em todos os setores, está na sua implantação em virtude da demanda de uma equipe dedicada para esse propósito, junto a um sistema de coleta e análise de dados eficiente que visa à construção de uma base histórica de dados de confiabilidade na empresa.

Além da dificuldade de implantação, dentre todas as etapas do processo produtivo desse setor, a extração do caldo, processo que fornece a matéria prima (caldo) para os processos subsequentes, se destaca como uma das principais e mais importante, onde se faz necessário a implantação dessa metodologia devido sua relevância. De acordo com Payne (1989) "a extração ou moagem é basicamente um exercício de separação de materiais", onde em linhas gerais é a extração dos sólidos solúveis da cana de açúcar. Ela pode ser realizada por meio de duas técnicas: a prensagem, que emprega o uso de moendas ou ternos de rolos e a extração por

solvente que utiliza o difusor, equipamento pelo qual a sacarose é extraída basicamente pelo processo de lixiviação, que nada mais é do que o arraste da sacarose contida nas células através de sucessivas lavagens.

Na empresa estudada a extração é realizada pelo difusor, sendo o mesmo diante o exposto, o grande responsável pela boa eficiência de todos os outros setores da produção, já que a eficiência dos setores está diretamente ligada a ele. Por conseguinte, se destaca seu sistema de acionamento que movimenta todo colchão de cana desfibrada, com a corrente de arraste incumbida de suportar essa tarefa.

Esse componente como qualquer outro possui uma vida útil já especificada de fábrica, que vai de certa forma em contramão ao conceito de confiabilidade. Para Dhillon (2006), a confiabilidade é a probabilidade de um item realizar a função que lhe é atribuída satisfatoriamente para um determinado período de tempo quando usado sob condições específicas.

Confrontando a vida útil da corrente especificada pelo fabricante e a afirmativa de Dhillon, é possível determinar uma vida útil distinta para esse componente sob condições de trabalho diferentes? Quantos homem-hora seria planejado e gasto a menos para a manutenção da mesma? Quanto de economia a empresa teria com a aplicação da MCC na corrente?

1.2 Objetivos de pesquisa

1.2.1 Objetivo geral

O desenvolvimento deste trabalho tem como objetivo introduzir a manutenção centrada em confiabilidade nas correntes instaladas no difusor com a finalidade de mensurar o desgaste real das correntes e utilizar o método dos elementos finitos para estimar seu limite de desgaste e vida útil.

1.2.2 Objetivos específicos

Para estimar a vida útil da corrente instalada no difusor, é necessário coletar e definir alguns pontos de suma importância para o estudo:

- Reunir informações dos equipamentos que compõe o sistema de acionamento do difusor, como também as características mecânicas dos materiais utilizados nos elos;

- Avaliar os esforços aplicados no conjunto por meio dos dados de operação e, assim definir a condição de esforço crítica aplicada no conjunto;
- Levantar a condição atual de operação dos elos da corrente;
- Fazer a modelagem numérica pelo método dos elementos finitos do elo da corrente utilizando uma das condições de esforço aplicável definidas.

1.3 Justificativa

A troca de cada uma das 12 linhas de corrente é realizada levando em consideração a vida útil já especificada pelo fabricante, no entanto o preço da mesma e o esforço para executar a atividade é bastante alto comparado a outros equipamentos. Essa troca afeta diretamente o orçamento e custo homem-hora disponível da entressafra. Em vista disso, é de suma importância a área de confiabilidade determinar com segurança a vida útil desse componente.

1.4 Delimitação do trabalho

O foco deste estudo é aplicar os conceitos da manutenção centrada em confiabilidade na corrente do difusor e assim avaliar a integridade da mesma e sua vida útil. O estudo se faz importante diante do custo monetário e homem-hora de manutenção do componente, onde é caro comparado a outros equipamentos críticos do processo.

Primeiramente foi considerado a vida útil especificada pelo fabricante, onde a estratégia utilizada foi coletar dados e informações acerca do processo de extração e determinar a espessura do elo por meio de amostras de cada linha do difusor com a intenção de avaliar o cenário em que a corrente se encontra.

O estudo será feito no ambiente da referida empresa, sendo aplicado em condições específicas da mesma, onde poderá ser replicado para as demais unidades mesmo que os resultados contenham variações com mudanças de ambiente. Não é o intuito desse trabalho abordar todas as questões possíveis sobre o tema, entretanto, as limitações dessa pesquisa servirão como indicações de trabalhos futuros.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em 5 (cinco) capítulos, que foram organizados da seguinte forma:

- Capítulo 1: Introdução; são abordados os tópicos de contextualização, os objetivos da pesquisa, a justificativa sobre a necessidade da pesquisa e a delimitação do trabalho;
- Capítulo 2: Fundamentação Teórica; são apresentados os conceitos utilizados para a condução deste estudo;
- Capítulo 3: Metodologia; apresenta-se a caracterização da pesquisa, a técnica de coleta de dados, a técnica de análise de dados e os procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa;
- Capítulo 4: Resultados; é feita a contextualização da empresa junto a definição da problemática, a proposta de melhoria, o levantamento e coleta dos dados, como também sua análise e por fim, a apresentação prévia dos resultados;
- Capítulo 5: Considerações Finais; são apresentados os resultados e suas avaliações acerca dele, junto a resposta da problemática anteriormente citada, a conclusão do estudo, as limitações encontradas durante a pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Manutenção

A manutenção possui diferentes definições dependendo do momento e do ambiente em que se encontra, apresentando elementos comuns que possibilitam identificar o conceito e sua função. Conceituá-la envolve vários aspectos, dentre eles disponibilidade, confiabilidade, função do sistema, segurança, meio-ambiente, custos, administração e supervisão, o que a torna parte fundamental dentro da organização.

Além disso, a área da manutenção tem sofrido muitas alterações, tendo em vista que a globalização trouxe oportunidades para as organizações e ao mesmo tempo ocasionou o aumento da competitividade entre elas. Para Viana (2002), essa competitividade ocasiona a aceleração da produção e, conseqüentemente, aumenta os danos nos equipamentos, necessitando de manutenções mais frequentes.

A princípio a manutenção é uma série de ações e serviços técnicos que devem ser realizados para manter o funcionamento normal e permanente dos equipamentos. Essas ações envolvem técnicas de prevenção, proteção, recuperação e correção.

De acordo com a ABNT NBR 5462 (1994), a manutenção é a “combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida”. Já para Ferreira (1999), a manutenção é definida como o “Ato ou efeito de manter-se as medidas necessárias para conservação ou permanência de alguma coisa ou situação”.

A princípio os sistemas de produção industriais estão sujeitos à deterioração em consequência do uso e vida útil, em que pode levar ao aumento dos custos de produção, menor qualidade e a possibilidade de um acidente (DOHI, et al., 2001). Assim o processo de manutenção é de suma importância para reduzir a probabilidade dessas ocorrências.

Dhillon (2006) apresenta uma definição mais moderna, onde segundo ele a manutenção são todas as ações necessárias para manter um ativo ou restaurá-lo para uma condição satisfatória, no qual se faz necessário definir essa condição, ou seja, determinar a função esperada deste equipamento.

Assim, mediante esse sentido, as organizações têm de aprimorar seus ativos tal qual essas modificações ou melhorias têm que evitar ou diminuir a ocorrência e reincidência de falhas, reduzir custos e aumentar a produtividade.

2.1.1 Evolução da Manutenção

Mesmo sem perceber a manutenção está presente na história humana há eras, desde o momento em que se começou a manusear instrumentos de produção.

Com o advento da Revolução Industrial no final do século XVIII, a sociedade humana começou a se agigantar no tocante a sua capacidade de produzir bens de consumo. Já no século XX as revoluções foram diversas, sendo peculiares as ocorridas no campo da tecnologia, cada vez mais rápidas e impactantes no modo de vida do homem (VIANA, 2002).

De acordo com Womack (2004), estes acontecimentos dão origem aos processos de manutenção, onde se busca cada vez mais evitar ocorrências de quebras e paradas de equipamentos ou máquinas, fazendo surgir assim os diversos tipos de manutenções.

Do mesmo modo a partir da década de 40, a manutenção tornou-se ainda mais importante, no qual se fez necessário o desenvolvimento de novas técnicas para o planejamento, organização e controle da mesma. Segundo Kardec e Nascif (2009), sua evolução pode ser dividida em cinco gerações.

2.1.1.1 Primeira Geração

Esta geração corresponde ao período anterior à Segunda Guerra Mundial se estendendo até o final da década de 50. A princípio a manutenção dispunha de um ponto de vista secundário em relação ao processo produtivo e não recebia tanta atenção, uma vez que os reparos nos equipamentos eram realizados apenas após a ocorrência da falha (TAVARES e SILVA FILHO, 2000).

Além do mais, em razão do superdimensionamento e simplicidade dos equipamentos na época, o desempenho não era um fator crucial permitindo tempos inativos do sistema, onde a confiabilidade era alta e de fácil reparação (MOUBRAY, 2001; SIQUEIRA, 2005). O trabalho das máquinas era lento e consumia bastante energia, sem contar as muitas paradas inesperadas que atrapalhavam a produção, de forma que as rotinas de manutenção também eram simples.

Assim, nessa geração, segundo Kardec e Nascif (2009), não havia manutenção sistematizada e contava apenas com serviços simples de limpeza e lubrificação, caracterizando como uma manutenção corretiva não programada.

2.1.1.2 Segunda Geração

A segunda geração da manutenção se passa entre os anos de 50 e 70, logo após a segunda grande guerra, no qual devido a ela o contingente de mão de obra industrial diminuiu consideravelmente.

Segundo Kardec e Nascif (2009), as pressões do período aumentaram as demandas por diversos tipos de produtos e suprimentos, fazendo com que as indústrias invistam na mecanização de seus métodos a fim de atender essa demanda. Como consequência dessas ações é demonstrado uma maior dependência do bom funcionamento dos equipamentos, naturalmente evidencia a necessidade de uma maior disponibilidade na busca para aumentar a produtividade e atender essa crescente demanda.

Tavares (2000) acrescenta que a busca por melhorias na produtividade incentivou as equipes de manutenção a trabalhar de forma mais padronizada e a não aceitar mais as paradas não programadas dos ativos, o que resultou no conceito de manutenção preventiva.

No entanto, essas técnicas preventivas consistiam em paradas programadas e trocas muitas vezes equivocadas de peças, o que elevou bastante os custos com manutenção nas indústrias. As equipes, então, passaram a pensar em maneiras de reduzir esses custos e prolongar a vida útil das peças e dos ativos.

2.1.1.3 Terceira Geração

A partir da década de 70, as técnicas de manutenção oriundas da primeira e segunda geração mostram-se pouco eficientes frente ao grande número de paralisações na produção, acarretando assim uma grande preocupação em virtude da diminuição da capacidade de produção e aumento dos custos que afetam a qualidade dos produtos.

Tendência e popularização dessa época, a metodologia Just in Time sofria um maior impacto devido à paralisação pela manutenção, já que no geral aumentava a eficiência, cortava gastos e reduzia o desperdício de tempo e recursos durante a produção, em razão dos estoques reduzidos e produção em andamento. Assim, a confiabilidade e disponibilidade se tornaram conceitos chave em vários setores (SIQUEIRA, 2005).

Conforme Moubray (2001), nessa geração aumenta a importância da disponibilidade e confiabilidade, onde os sistemas começam a ser dimensionados em conformação a seus limites operacionais, já sendo projetados para trabalhar com maior precisão visando elevar o padrão de produtividade e de qualidade.

Nesse sentido, a primordialidade da qualidade e funcionamento das instalações e máquinas trouxeram novas prioridades, uma vez que a necessidade do monitoramento de condições deu origem à manutenção preditiva, já facilitada pelo uso de tecnologias.

2.1.1.4 Quarta Geração

Segundo Kardec e Nascif (2009), os fatores almejados no decorrer da terceira geração, como disponibilidade, confiabilidade e manutenibilidade, ganham ainda mais importância na quarta geração.

Com seu início no final da década de 90 e com o objetivo de reduzir o número de interrupções da produção, as práticas de manutenção preditiva e o monitoramento das condições das máquinas se fortaleceram e conseqüentemente as atuações da manutenção preventivas foram minimizadas (KARDEC E NASCIF, 2009).

Além disso, essa geração se caracteriza também pela análise de falhas, preocupação com segurança e meio ambiente e o gerenciamento de ativos.

2.1.1.5 Quinta Geração

A quinta geração além de manter as práticas adotadas na quarta, tem como um novo enfoque um olhar sistemático da Gestão de Ativos por todas as áreas coordenadas, advindo de um maior perspectiva nos resultados empresariais, a fim de garantir a sobrevivência da empresa (KARDEC e NASCIF, 2009).

Com isso, a manutenção busca garantir a produção em sua capacidade máxima sem falhas não previstas, de modo que seja obtido o melhor retorno sobre os ativos. Em relação a essa gestão, ocorre segundo Kardec e Nascif (2009):

- Aumento da manutenção preditiva e monitoramento da condição on-line e off-line;
- Aprimoramento na relação entre departamentos;
- Domínio do ciclo de vida dos ativos, ou seja, participação efetiva no projeto, aquisição, instalação, comissionamento, operação e manutenção;
- Excelência em Engenharia de Manutenção;
- Consolidação da contratação por resultados;
- Monitoramento da performance de modo a garantir que os ativos operem dentro de sua máxima eficiência;
- Constante implementação de melhorias objetivando redução de falhas;
- Consolidação da necessidade da boa prática gerencial.

2.1.2 Tipos de Manutenção

Todas as manutenções realizadas visam estabelecer o funcionamento do equipamento, embora possam ser diferenciadas de acordo com seu tempo e meios de ação, mesmo que busquem o mesmo objetivo. Em outras palavras, visem colocar o equipamento o mais rápido possível em condições para produção.

Tradicionalmente a classificação da manutenção é realizada tanto em função da forma que a atividade é planejada, como também é levado em consideração o método de manutenção aplicado (SIQUEIRA, 2005). De mesmo modo pode ser realizada não somente de forma planejada, onde é executada sob um tempo e condições pré-estabelecidas, mas também de forma não planejada, ou seja, em função da necessidade (BRANCO FILHO, 2008; SIQUEIRA; 2005).

Conforme Viana (2002), os tipos de manutenção são as formas de encaminhar as intervenções nos instrumentos de produção, ou seja, nos equipamentos que compõem o processo. Em consonância, à ABNT NBR 5462 (1994) acrescenta que manutenção se divide pela maneira como é feita a intervenção do sistema, no qual pode assumir três formas, a manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva.

Contudo os objetivos e todos os métodos resumem-se na correção, eliminação e prevenção de falhas, sendo ou não realizadas de forma planejada.

2.1.2.1 Manutenção Corretiva

É a forma de manutenção mais antiga e também a mais utilizada, visto que ela pode ser empregada em qualquer empresa e em qualquer nível de planejamento da manutenção. De acordo com a ABNT NBR 5462 (1994), esse tipo de manutenção se caracteriza pelo serviço executado em caso de quebra do equipamento ou pane, com o destino de recolocar o mesmo em condições de executar sua função. Da mesma forma, Dillhon (2006) salienta que essa manutenção é toda a ação de reparo decorrente de uma falha ou defeito, restabelecendo um item a uma condição operacional satisfatória.

Santos (2007) acresce em poucas palavras que ela é feita após a interrupção da operação até que retorne ao seu estado normal e também possui o maior custo entre as manutenções, portanto é essencial que as organizações sejam capazes de reduzir a quantidade desse tipo de intervenção.

Já para Guimarães et al. (2012), a manutenção corretiva ocorre em duas situações específicas: quando o equipamento apresenta um desempenho abaixo do esperado, apontado pelo monitoramento, ou quando ocorre a falha do equipamento.

Nesse sentido, pode-se verificar que a principal função da manutenção corretiva é restaurar ou corrigir as condições de funcionamento de um determinado equipamento ou sistema. Segundo Kardec e Nascif (2009) ela pode ser dividida em duas categorias, a Manutenção Corretiva Não Planejada e a Manutenção Corretiva Planejada, que apesar de possuírem a mesma essência, existem grandes divergências.

A Manutenção Corretiva Não Planejada é definida pela NBR 5462 (1994) como “a manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida”. Sua característica de reação apenas após a falha pode causar grandes quedas, tanto na produção quanto nos índices de qualidade do produto, pois as paradas inesperadas de produção, não são adequadas ao mundo competitivo atual.

Já a Manutenção Corretiva Planejada é o tipo de manutenção onde a perda de produção é reduzida ou mesmo eliminada, além de o tempo de reparo e o custo serem minimizados. A potencial falha é conhecida antes de acontecer, através de um acompanhamento do equipamento, o que permite um certo planejamento para a realização da mesma (KARDEC e NASCIF, 2009).

2.1.2.2 Manutenção Preventiva

Este tipo de manutenção busca reduzir ou evitar paradas, falhas e queda no desempenho do equipamento obedecendo a um planejamento baseado em intervalos estabelecidos com tempo já determinado, onde geralmente esses tempos são definidos através das especificações com relação a vida útil dos componentes, sendo de suma importância para o acontecimento dessa manutenção (CASTELLA, 2001).

De acordo com a NBR 5462 (1994), a manutenção preventiva pode ser descrita como a “manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou degradação do funcionamento de um item”. Em linhas gerais, segundo Araújo e Santos (2004), consiste em um trabalho de prevenção de defeitos que possam originar a parada ou um baixo rendimento dos equipamentos em operação.

Por certo, esse tipo de manutenção proporciona maior qualidade ao processo, além de possibilitar um impacto positivo considerável com relação a produtividade em consideração a manutenção corretiva, já que visa evitar a falha do equipamento. Porém, a utilização da mesma

deve ser muito bem avaliada, visto que pode exigir altos custos que por vezes acabam tornando inviável sua aplicação.

2.1.2.3 Manutenção Preditiva

Também conhecida como manutenção baseada na condição, ela permite que os equipamentos operem por mais tempo, visto que a intervenção ocorre baseada em dados e não em suposições. Uma vez que de forma organizada, realiza as atividades de acompanhamento das possibilidades de modificações ou parâmetros que indicam o desempenho do equipamento.

Segundo a NBR 5462 (1994), ela é definida como a “manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva”.

Deste modo, a manutenção preditiva detecta as falhas antes mesmo delas se tornarem críticas, aproveitando ao máximo os elementos da máquina, havendo somente a substituição ou reforma das peças danificadas de forma planejada. Têm-se assim um maior controle e assertividade do planejamento.

Nepomuceno (2014) complementa essa afirmação, onde segundo ele, a manutenção preditiva baseia-se em medições, como vibrações, análise dos lubrificantes e termografia, que permitem definir as condições reais dos equipamentos. As medições podem ser executadas de maneira contínua ou levantadas em intervalos periódicos, dependendo da criticidade do equipamento e da probabilidade de impacto do problema.

Kardec e Nascif (2009) apresentam quatro técnicas bastante usadas nas indústrias que buscaram fazer uso da manutenção preditiva, sendo elas:

- **Análise de Vibração:** É o processo pelo qual as falhas em componentes móveis de um equipamento rotativo são descobertas pela taxa de variação das forças dinâmicas geradas, onde essas forças afetam o nível de vibração que pode ser avaliado em pontos acessíveis das máquinas, sem interromper o seu funcionamento. Identifica através da análise de espectros, falhas como deficiência de lubrificação, desbalanceamentos, cavitação e folgas. Para que esses espectros sejam coletados e posteriormente analisados é utilizado um equipamento conhecido como acelerômetro, onde a coleta é realizada e posteriormente os espectros divididos em deslocamento, velocidade e aceleração são estudados permitindo então a identificação de possíveis falhas.

- **Análise de Óleos Lubrificantes:** Permite realizar avaliações laboratoriais precisas sobre a condição do lubrificante utilizado nos equipamentos. Com essa análise é possível detectar tanto os desgastes das peças móveis dos equipamentos quanto a presença de substâncias contaminantes no óleo.
- **Ensaio por Ultrassom:** É um ensaio não destrutivo que tem por finalidade a detecção de defeitos ou descontinuidades internas presentes em materiais metálicos, sejam eles ferrosos ou não ferrosos e materiais não metálicos também. Da mesma forma, a medição de espessura por ultrassom é um método de mensuração de espessuras de materiais ferrosos e não ferrosos, paredes, chapas, tubos, tanques, vasos de pressão, entre outros. O método visa detectar perdas de espessuras nesses materiais, em razão de corrosões e processos abrasivos como também a perda de espessuras que pode ocorrer devido ao processo normal de trabalho.
- **Termografia:** Consiste na medição da temperatura superficial de diferentes materiais, equipamentos e maquinários através dos raios infravermelhos que eles emitem. A partir desta técnica é possível observar os padrões diferenciais de distribuição do calor sem haver a necessidade do contato físico com a parte inspecionada. Assim permite detectar falhas ou defeitos gerados por anomalias térmicas em estágios iniciais, sem haver a necessidade de interromper a produção.

2.2 Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC)

Inicialmente orientada para a indústria aeronáutica, a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC), do inglês *Reliability Centered Maintenance* (RCM) é uma abordagem criada no final da década de 60 com o propósito de direcionar os esforços da manutenção para componentes e sistemas onde a confiabilidade é fundamental. De mesmo modo, ela objetiva garantir o desempenho, a segurança e preservação do ambiente a um melhor custo-benefício (WANG e HWANG, 2004; SIQUEIRA, 2005).

Garza (2002) afirma que além da introdução de novos conceitos, a MCC demonstra um novo foco para a manutenção em relação ao modelo tradicional, embasando as suas ações em novos objetivos como também novas expectativas.

Já para Fogliatto e Ribeiro (2009), a MCC também pode ser definida como um programa que reúne várias técnicas de engenharia para assegurar que os equipamentos continuarão realizando suas funções de projeto. Além do mais possibilita que as organizações possam

alcançar a excelência nas atividades de manutenção, ampliando a disponibilidade dos equipamentos e reduzindo custos associados a acidentes, defeitos, reparos e substituições.

Dito isso, a eficácia da MCC está baseada em alguns pilares próprios desse programa, nos quais podem ser destacados:

- i.** Amplo envolvimento de engenheiros, operadores e técnicos de manutenção, caracterizando um ambiente de engenharia simultânea;
- ii.** Ênfase no estudo das consequências das falhas, que direcionam todas as tarefas de manutenção;
- iii.** Abrangência das análises, que consideram questões associadas à segurança, meio ambiente, operação e custos;
- iv.** Ênfase nas atividades proativas, envolvendo tarefas preditivas e preventivas;
- v.** Combate às falhas escondidas, que reduzem a confiabilidade do sistema.

Sob o mesmo ponto de vista, Moubray (2001) cita que essa metodologia consiste em um processo usado para determinar os requisitos de manutenção de qualquer item físico no seu contexto operacional. Ela visa estudar as diversas formas de como um componente pode vir a falhar, visualizando através disto as ações de bloqueios pertinentes a serem tomadas, assim sendo um importante instrumento para tomada de decisões gerenciais.

Além disso, é caracterizada por ser uma metodologia estruturada, que traça as melhores estratégias de manutenção nos sistemas ou equipamentos. Conforme Backlund (2003), é priorizada as necessidades do processo de produção e não do componente ou equipamento de maneira isolada, de forma a garantir a confiabilidade na eficácia de um sistema por meio de sua manutenção.

Essa confiabilidade é visível apenas com os resultados aparentes e não acontece repentinamente, onde é preciso desenvolver um longo trabalho para se chegar a resultados eficazes de satisfação. Segundo Moubray (2001), quando implementada de forma correta, a MCC pode reduzir de 40 % a 70 % a rotina de tarefas de manutenção com uma série de vantagens e benefícios na segurança, logística, operação e administração da organização.

Mediante ao exposto, a fim de alcançar os objetivos desta metodologia é necessária a participação de todos envolvidos na execução do serviço de manutenção, com rigorosa observação e controle dos dados coletados sobre o sistema dedicado à manutenção. Para Leverette (2006), o resultado desse programa está diretamente relacionado com os objetivos de sua implantação, os recursos (tempo, mão-de-obra física e técnica) aplicados e do compromisso da organização durante sua execução.

2.2.1 *Questões Básicas da MCC*

Moubray (2001) afirma que existem sete questões básicas que devem ser contempladas pelos programas de MCC, onde essas questões são respondidas através do trabalho em uma sequência estruturada de etapas. Cada uma possui ferramentas de modelagem e análise de sistemas que documentam os critérios e dados utilizados na resolução de cada questão (BACKLUND, 2003; MOUBRAY, 2001).

- I.** Quais as funções e padrões de desempenho esperados para os equipamentos na operação?
 - Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), essa questão consiste em compreender o que é esperado de cada equipamento, ou seja, quais as funções que ele deve cumprir e o padrão de desempenho que deve ser mantido durante sua vida útil. Esta definição das funções e padrões de desempenho dos equipamentos fabris estabelece a base de trabalho do programa MCC.
- II.** De que modo os equipamentos podem falhar em cumprir suas funções?
 - Os modos de falha correspondem a eventos passíveis de ocorrer, que caracterizam falha em cumprir uma das funções especificadas para o componente. A identificação correta do modo como os equipamentos podem falhar exige a participação ativa tanto do pessoal de manutenção como do pessoal operacional. De modo que a identificação das causas de cada falha funcional é extremamente importante, já que as ações preventivas não são direcionadas aos modos de falha e sim às suas causas.
- III.** O que causa cada falha funcional?
 - As causas da falha devem ser identificadas em suficiente detalhe para assegurar que as ações sejam dirigidas à raiz do problema e não aos sintomas que ele apresenta. Assim o envolvimento dos operadores, técnicos e mecânicos, que conhecem o dia a dia dos equipamentos é essencial para a correta identificação das causas.
- IV.** O que acontece quando cada falha ocorre?
 - É importante também reconhecer os efeitos de cada falha, explicitando o que acontece quando cada falha ocorre. Nesse sentido, a MCC aborda, o que pode ser observado quando a falha ocorre; o tempo que o equipamento irá permanecer parado na eventualidade da ocorrência da falha; os danos que a falha pode acarretar, incluindo possibilidade de perdas materiais, humanas ou ambientais;

e o que pode ser feito para reparar a falha. Assim os operadores podem indicar o que é observado quando a falha ocorre, os supervisores de linha possuem a informação referente ao tempo que o equipamento permanece parado, já os engenheiros podem prever os danos que a falha provoca e por fim o pessoal da manutenção geralmente possui conhecimento para indicar o que melhor pode ser feito no sentido de reparar a falha.

- V.** De que forma cada falha interessa?
- Essa questão está relacionada à análise das falhas, de forma a ficar claro que nem todas elas interessam, onde o esforço dedicado a evitar a ocorrência de cada falha possível deve ser proporcional à consequência dessa falha. Uma vez que este é o aspecto-chave que orienta as ações preventivas, definindo a prioridade e intensidade das ações.
- VI.** O que pode ser feito para prevenir ou impedir cada falha?
- Essa questão é responsável por identificar o que pode ser feito para prevenir ou impedir cada falha, envolvendo assim a realização de tarefas proativas (conduzidas anteriormente à ocorrência de falhas, visando impedir que um componente falhe) e tarefas reativas (envolvem lidar com componentes que apresentaram falhas).
- VII.** O que deve ser feito quando não pode ser determinada uma atividade proativa apropriada?
- Nos casos em que a consequência da falha é considerada grave e não é possível empreender atividades preventivas ou preditivas, pode ser necessário empreender atividades de procura de falhas ou decidir pelo redesenho de subsistemas (permitindo o uso de redundância e alarmes que antecipem a falha potencial). A procura de falhas é uma atividade que envolve a verificação periódica de funções escondidas visando determinar se elas apresentam falha ou não, já o redesenho envolve alterações em componentes, conjuntos ou subsistemas.

Essas questões são respondidas através do trabalho em uma sequência estruturada de etapas, onde cada uma possui ferramentas de modelagem e análise de sistemas que documentam os critérios e dados utilizados na resolução de cada questão (BACKLUND, 2003; MOUBRAY, 2001).

2.2.2 *Implantação da MCC*

Na literatura são apresentadas diferentes versões para aplicação da MCC, podendo variar no número de etapas, ordem de implantação e ferramentas utilizadas. Apesar disso, todas são movidas pela necessidade do processo ou pela experiência do autor/analista, embora em sua essência possuem uma abordagem e objetivos similares.

Segundo Siqueira (2005), o processo de implantação da MCC na manutenção de um equipamento ou sistema pode ser resumido em sete etapas:

- **Identificação das Funções do Sistema:** Objetiva identificar e documentar o sistema ou processo que será submetido à análise;
- **Análise dos Modos de Falha e Efeitos:** Nesta etapa são identificadas e documentadas todas as funções e seus modos de falha, assim como os efeitos adversos produzidos por elas, para isso é utilizando a ferramenta de Análise de Modo e Efeito de Falha (FMEA);
- **Seleção das Funções Significantes:** Consiste em um processo estruturado para analisar cada função identificada na etapa anterior e determina se uma falha tem efeito significativo, ao considerar o impacto nos pilares (segurança, meio ambiente, operação e economia do processo);
- **Seleção das Atividades Aplicáveis:** Determinam-se as tarefas de manutenção preventiva que sejam tecnicamente aplicáveis para prevenir ou corrigir cada modo de falha ou amenizar suas consequências;
- **Avaliação da Efetividade das Atividades:** É um processo estruturado para determinar se uma atividade de manutenção preventiva é efetiva para reduzir, a um nível aceitável, as consequências previstas para uma falha;
- **Seleção das Atividades Aplicáveis e Efetivas:** Consiste em um processo estruturado para determinar a melhor tarefa;
- **Definição da Periodicidade das Atividades:** Estabelece os métodos e critérios para definição da periodicidade de execução das atividades selecionadas, assim como o planejamento e estruturação do processo de implantação da metodologia na empresa.

É importante ressaltar que a implantação da MCC não termina na formulação e implantação do plano de manutenção. É necessário um banco de dados adequado para todas as informações, já que se trata de um processo contínuo onde o plano é periodicamente revisado em função dos dados de falhas e de reparos que devem ser continuamente coletados e analisados (PINTO e LIMA, 2006).

2.3 Modelagem Numérica

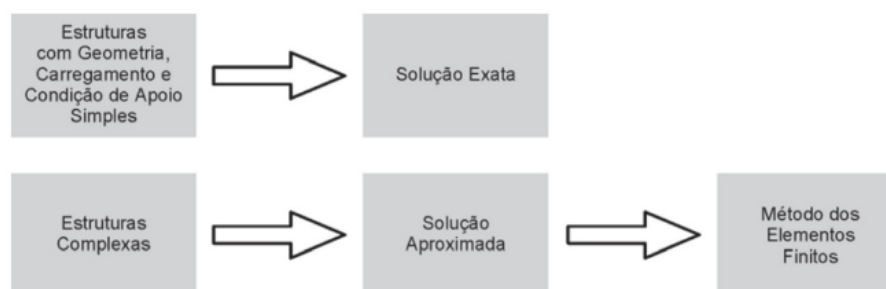
Diante de problemas de análise estrutural, alguns mais simples e outros mais complexos, o propósito é sempre resolvê-los de forma satisfatória. Para isso é necessário garantir que a estrutura objeto de análise não estará sujeita a falhas sob diversas condições de operação. Onde os subsídios para essa tarefa geralmente são obtidos a partir da resistência dos materiais apoiado no Teoremas da Mecânica Geral.

Para o desenvolvimento dos cálculos, além do conhecimento técnico, o sucesso está principalmente no entendimento da natureza física do fenômeno que se propõe a resolver, onde é necessário formular um esquema de cálculo para essa estrutura em que ela é idealizada para que se possa analisá-la (ALVES FILHO, 2013). A Figura 01 representa de forma esquemática os principais passo para essa análise.

De acordo com Nicoletti e Presoto (2018), os métodos analíticos clássicos possibilitam o cálculo exato dos deslocamentos, deformações e tensões na estrutura em todos os seus pontos, isto é, nos seus infinitos pontos. Mas tais soluções são somente conhecidas para problemas de baixa complexidade. Alves Filho (2013) complementa a afirmação, onde os métodos analíticos clássicos permitem o cálculo da resposta exata em seus infinitos pontos, porém essas soluções são somente conhecidas para alguns casos.

Diante disso, se faz necessário o desenvolvimento de procedimentos aproximados que possam ser aplicados em caráter geral, não dependendo da forma da estrutura e das condições de carregamento, dentro da precisão aceitável na engenharia (ALVES FILHO, 2013). Este caminho alternativo dá origem ao Método dos Elementos Finitos, onde a Figura 1 esquematiza as duas abordagens.

Figura 1 - Esquema dos Métodos Clássicos e do Método dos Elementos Finitos



Fonte: Alves Filho, 2013

Portanto, a análise numérica de acordo com Vieira (2018), são técnicas que contam com ferramentas capazes de resolver de forma exata ou aproximada problemas matemáticos complexos que se fossem resolvidos de forma analítica seriam extremamente complicados ou impossíveis.

2.3.1 Idealização de Sistemas

Considerando que a compreensão de diversos processos e fenômenos se torna simplificada quando se estuda os mesmos de forma fracionada, fato esse característico à mente humana, onde subdividir sistemas em seus componentes individuais, ou em seus elementos é algo normal para problemas gerais do cotidiano. Nesse contexto, é possível entender o comportamento do conjunto por mais complexo que pareça ser, através do comportamento de cada elemento (NICOLETTI e PRESOTO, 2018).

De uma maneira geral, pode-se dizer que a ideia central dos métodos dos elementos finitos é discretizar o domínio da equação que descreve o fenômeno físico em sub-regiões, de geometria mais simples, denominado “elementos finitos”. Essas regiões têm dimensões finitas, ao contrário dos elementos infinitesimais utilizados no cálculo diferencial e integral, sendo possível achar sua solução aproximada.

2.3.1.1 Sistemas Contínuos

Segundo Alves Filho (2013), define-se o sistema contínuo como aquele que estuda o problema em sua totalidade, onde a solução é obtida para os infinitos pontos do objeto de análise por intermédio de uma função matemática.

Em outras palavras, o objeto de análise é tratado como um sistema contínuo pois a solução é obtida para todos os pontos que constituem o corpo.

2.3.1.2 Sistemas Discretos

A ideia da discretização de um sistema contínuo considera a divisão da estrutura em partes separadas distintas, conectadas entre si em pontos discretos, conforme pode ser observado o exemplo da viga na Figura 2.

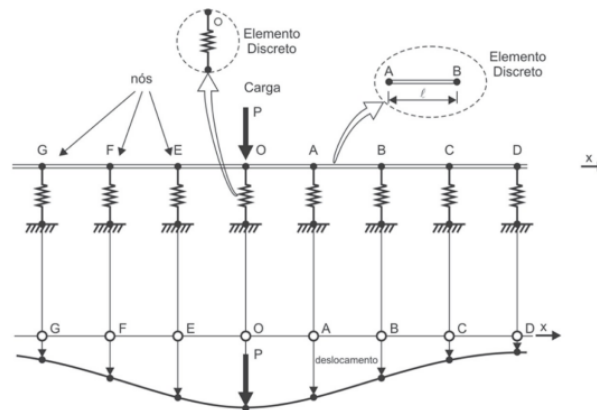
Neste sistema, conforme Alves Filho (2013), a solução aproximada simula a estrutura como uma montagem de vários elementos que possuem um comprimento finito, diferentemente

do sistema contínuo. Assim a estrutura inteira é modelada por um agregado de estruturas “simples”, onde os pontos de conexão entre os elementos são chamados de nós.

Portanto o sistema discretizado não pretende calcular nos infinitos pontos do modelo, como no caso contínuo, são apenas calculados o comportamento interno de cada elemento a partir dos deslocamentos dos nós. Porém é necessário julgar que a quantidade de pontos discretos ou nós escolhidos é suficiente para representar o conjunto inteiro de forma aproximada.

Diante disso, quanto mais bem especificado for esse comportamento interno, mais a solução do modelo se aproxima do comportamento real da estrutura, ou seja, o elemento discreto que represente um dado trecho dever ser muito bem definido (ALVES FILHO, 2009).

Figura 2 - Estrutura discretizada



Fonte: Alves Filho, 2013

2.3.2 Tipos de Modelos Discretizados

3.3.2.1 Estruturas Reticuladas

Para esses tipos de estrutura a interação entre os elementos ocorre apenas nas juntas, onde elas trocam forças entre si somente nesses pontos. Nessa classe de estruturas encontram-se vigas contínuas, grelhas, treliças planas e treliças espaciais.

3.3.2.2 Elementos Estruturais Conectados Continuamente

Para a representação aproximada de um corpo contínuo, além da imposição do equilíbrio e da compatibilidade apenas nos nós do modelo, algumas condições adicionais devem ser consideradas para que essa representação não seja grosseira, são elas:

- A malha de elementos finitos, isto é, a subdivisão da estrutura em elementos;
- A escolha do elemento apropriado para modelar a situação física.

A escolha do tamanho da malha depende exclusivamente do conhecimento das propriedades do elemento escolhido para a representação do problema. Tais propriedades são definidas para cada elemento adiante por intermédio de relações matemáticas adequadas, onde essa, constitui a principal diferença para uma estrutura reticulada.

2.3.3 *Análise Matricial de Estruturas*

As estruturas constituídas por elementos estruturais conectados continuamente estão sujeitas, como exposto anteriormente, aos procedimentos decorrentes da subdivisão artificial dos elementos. Onde se refere a questão dos contornos comuns e as dificuldades acerca de tentar estabelecer as condições de compatibilidade de deslocamento ao longo desses contornos comuns.

Em decorrência da estrutura real, os contornos reais estão “colados” entre si, diferentemente do modelo. Logo a análise desse sistema apresenta dificuldades acerca das forças de interação entre os elementos que agem nos nós do modelo, já que não apresentam uma correspondência direta com aquelas que atuam nos mesmos pontos da estrutura real.

Em vista disso, para elementos com extensão bi ou tridimensional é necessário definir a relação entre os deslocamentos nodais e deformações internas de modo que as condições de equilíbrio e compatibilidade sejam atendidas não somente nos nós, mas também nos contornos comuns (ALVES FILHO, 2003). Onde para o cálculo dos deslocamentos, considera-se apenas os deslocamentos dos nós do modelo para a representação da configuração deformada da estrutura interna.

Assim de acordo com Nicoletti e Presoto (2018), a análise matricial de estruturas e, em consequência, o Método dos Elementos Finitos possuem como fundamento inicial a relação entre forças e deslocamentos nodais para cada elemento individual, que está associada ao conceito de Rigidez.

O caso mais simples neste contexto ocorre com as molas, onde podemos observar a constante elástica da mola, representada através da relação entre a força aplicada e o deslocamento medido na extremidade da mola.

De forma análoga ao que ocorre com a mola, acontece em um elemento finito, todavia em caráter mais amplo. Na mola existe apenas o conceito de rigidez axial, pois ela transfere

apenas forças axiais. Em um modelo, por sua vez, podem estar presentes vários componentes de rigidez simultaneamente, como rigidez axial, rigidez a flexão, rigidez à torção e ao cisalhamento e isso fará a relação entre forças e deslocamentos contarem com uma maior complexidade, onde esses diversos componentes atuantes no elemento podem ser representados na forma de uma matriz coluna.

Portanto, temos que a equação (1) governa a análise matricial de estruturas, onde expressa a relação geral linear entre todas as forças externas e todos os deslocamentos nodais.

$$F = K \times U \quad (1)$$

Onde:

F é a matriz com todas as cargas nodais;

K é a Matriz Rigidez da Estrutura que relaciona as forças e os deslocamentos nodais;

U é a matriz coluna com os deslocamentos nodais.

Diante disso, é notório que o foco do problema é a compreensão e determinação da matriz de rigidez da estrutura.

2.3.4 *Leis Fundamentais*

Para Alves Filho (2003), a elaboração do modelo matemático que representa a estrutura de fora discreta, é realizada por meio da aplicação de importantes leis da mecânica estrutural, no qual segundo esse contexto, a estrutura deve satisfazer três princípios, a Lei do Equilíbrio de Forças, Lei da Compatibilidade de Deslocamentos e a Lei de Comportamento do Material.

3.3.4.1 *Lei do Equilíbrio de Forças*

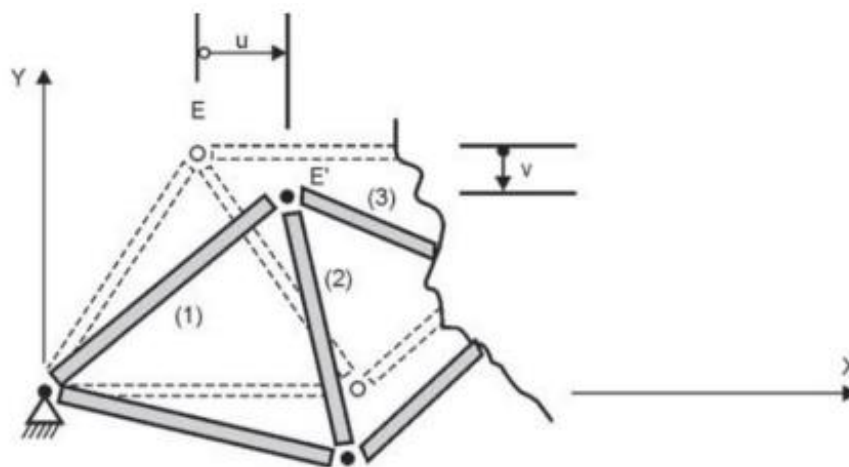
Considerando a condição de equilíbrio da estrutura, é possível aplicar as equações de equilíbrio (2) advindas da mecânica, a cada um dos elementos isoladamente. De forma que se os elementos estão em equilíbrio, a estrutura como um todo também estaria.

$$\sum_i F_i = 0 \quad i = x, y, z \quad (2)$$

3.3.4.2 Lei da Compatibilidade de Deslocamentos

Segundo Alves Filho (2003), essa lei impõe que todas as extremidades de elementos conectadas a um esmo nó, estão sujeitas aos mesmos componentes de deslocamentos, ou seja, a estrutura não “abre”. A Figura 3 representa essa ideia, onde os elementos (1), (2) e (3), conectados ao nó E se mantêm conectados no mesmo nó após a deformação da estrutura na posição E’.

Figura 3 - Ideia geral da Condição de Compatibilidade dos Deslocamentos



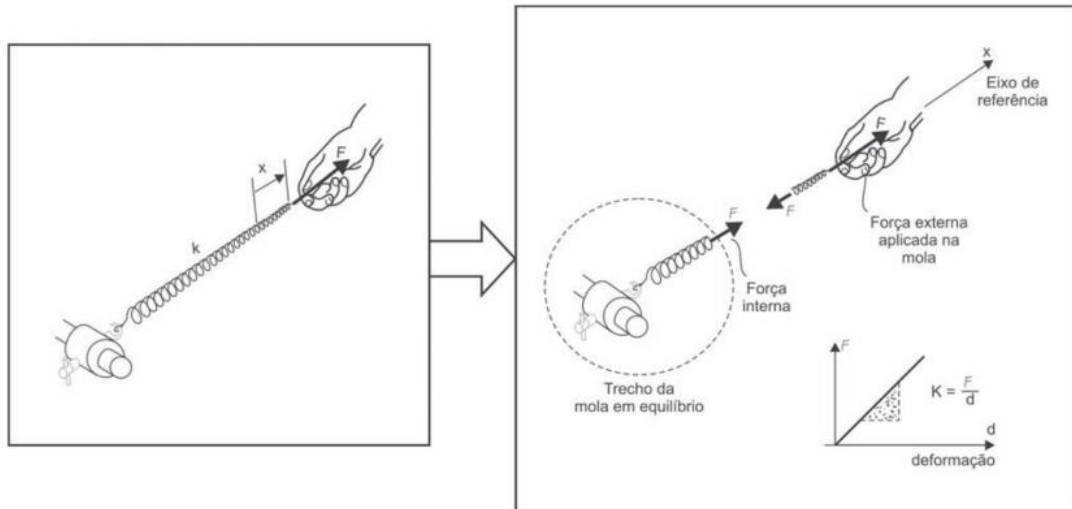
Fonte: Alves Filho, 2013

3.3.4.3 Lei de Comportamento do Material

Ao transmitir os esforços ao longo da estrutura, os elementos se deformam em virtude das forças internas (ALVES FILHO, 2003). Essas forças quando não muito elevadas crescem proporcionalmente às deformações, onde esta relação linear comum no estudo da resistência dos materiais, constitui a conhecida Lei de Hooke.

No Método dos Elementos Finitos, admite-se que os elementos respeitam essa condição conforme pode ser observado no exemplo da Figura 4, que representa uma mola sob a ação de uma força externa, onde a mola se deforma e transmite o esforço aplicado pela ação de uma força interna.

Figura 4 – Observação em relação às forças internas



Fonte: Alves Filho, 2013

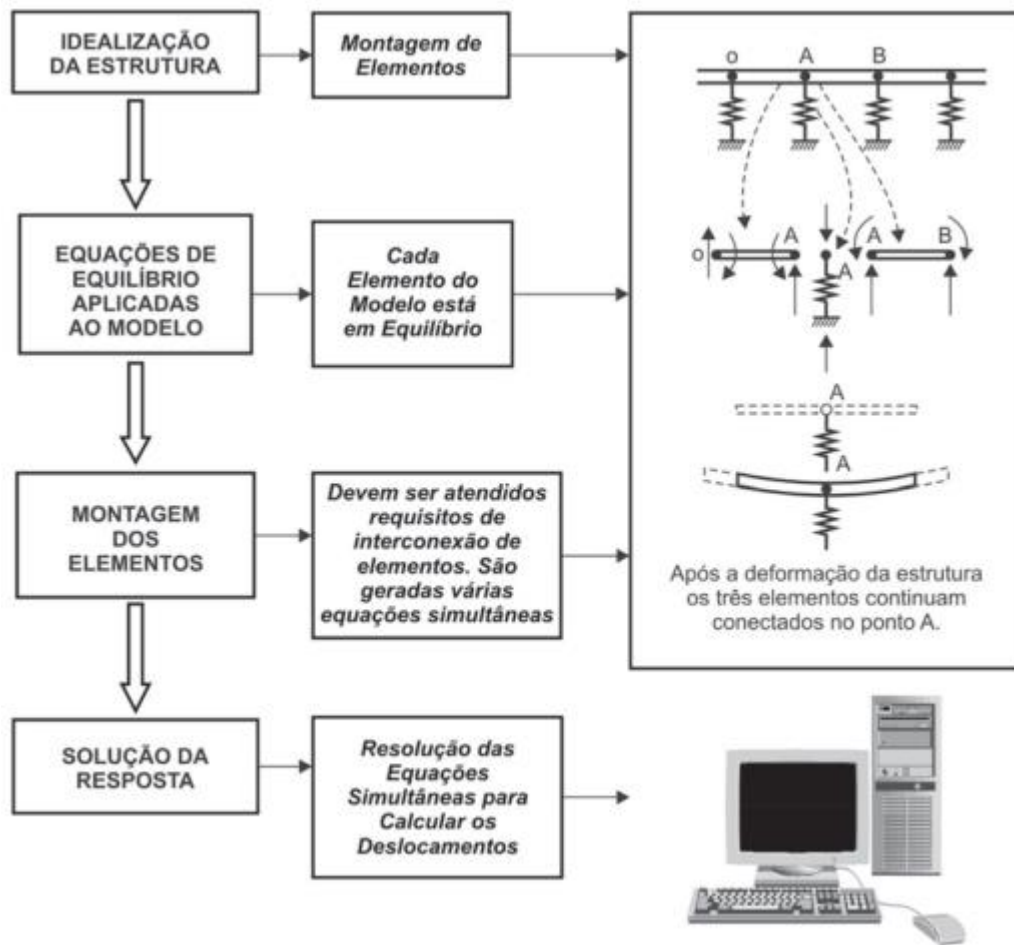
A representação algébrica desses esforços internos e externos estão relacionados entre si, onde as intensidades são iguais, porém as representações matemáticas não. Portanto é preciso não confundir o significado físico do sinal atribuído a cada uma delas.

2.3.5 Método dos Elementos Finitos

A partir do conceito geral de discretização, é possível introduzir a definição do método dos elementos finitos, no qual é basicamente um método aproximado de cálculo de sistemas contínuos. De forma geral, o corpo é subdividido em um número finito de partes conectadas entre si por nós, visto que a montagem do modelo matemático tem seu comportamento especificado por um número finito parâmetros, sendo eles os deslocamentos nodais que são as incógnitas do problema (ALVES FILHO, 2013).

A Figura 5 resume o processo de discretização.

Figura 5 - Método para análise de sistemas discretos



Fonte: Alves Filho, 2013

2.3.6 Aplicação do MEF

O conceito de Método dos Elementos Finitos (MEF), que embora seja simples de enunciar, seu grande problema está na complexidade e o volume de cálculos que devem ser feitos. Segundo Vieira (2018), apesar da dificuldade, o método se tornou relativamente fácil de aplicar, devido a evolução da capacidade de processamento dos computadores e a disponibilidade de programas comerciais de análise. Mas o usuário deve compreender muito bem como utilizar esta ferramenta e os conceitos por trás das análises, para evitar erros grosseiros e os resultados se mostrarem significativos e próximos a realidade.

Como exposto anteriormente, a resolução dos problemas pelo MEF segue uma ordem lógica, onde se inicia com a modelagem geométrica do problema, na sequência divide-se a geometria em uma malha de elementos, define as condições de contorno do problema, executa o processamento dos dados e coleta os resultados obtidos.

Os elementos podem ser de linha, superfície e volume, onde a escolha de cada um deles depende da característica do problema a modelar. Com cada nó dos elementos podendo apresentar 1, 2, 3 ou 6 graus de liberdade com possibilidade de variação de propriedades como consequência das condições de contorno.

Sobre a malha quanto maior a quantidade de elementos maior tende a ser a precisão dos resultados, mas acarreta em um grande aumento de tempo computacional.

A definição de condições de contorno são as restrições que se aplica em um componente. É uma tarefa complexa e pode conduzir a uma solução razoável ou ruim para o problema. Já o processamento dos dados consiste em resolver as equações que regem o fenômeno analisado para cada nó de todos os elementos, onde é montado em forma matricial e assim resolvido.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização da Pesquisa

Uma pesquisa pode ser classificada de variadas formas de acordo com a maneira em que é analisada, podendo ser caracterizada por: natureza, abordagem do problema, objetivo e procedimentos (GONZALES et al., 2018). Gil (2008), destaca que a pesquisa é uma atividade racional e sistemática, exigindo que as ações por ela produzidas sejam planejadas em todas suas etapas.

Já para Silva e Menezes (2005), um método de pesquisa constitui-se de um conjunto de etapas ordenadas que aliadas ao conhecimento, propiciam a investigação de um fenômeno científico. Essas etapas compreendem a escolha do tema, o planejamento da investigação, o desenvolvimento metodológico, a coleta e a tabulação de dados, a análise dos resultados, a elaboração das conclusões e finalizando a divulgação de resultados.

Para a realização deste trabalho optou-se por uma pesquisa de natureza aplicada, já que se busca uma solução da problemática, que pode ser aplicada na prática ou proposta uma melhoria de caráter quantitativo. Segundo Gil (2008), esse tipo de proposta tem o objetivo de verificar estatisticamente uma hipótese a partir da coleta de dados concretos e quantificáveis, traduzindo os resultados da pesquisa em números.

Além disso, o trabalho apresenta um enfoque exploratório, visando maior familiaridade com o problema, evidenciando-o e aplicando os conhecimentos gerados na investigação de uma situação real de análise (RIBEIRO e SILVA, 2004).

Quanto ao procedimento metodológico foi empregado o estudo de caso, descrito como uma estratégia de pesquisa para observar um tema dentro de um caso concreto. Visto que se propõe a identificar um problema, analisar as evidências, desenvolver argumentos lógicos, avaliar e propor soluções para um fenômeno com o método de investigação empírica, permitindo diagnosticar problemas baseados em dados confiáveis (WELTER et al., 2017).

Na Tabela 1 são mostradas as etapas de caracterização desta pesquisa de forma resumida, onde foram destacadas em negrito as classificações que se enquadram nesse trabalho.

Tabela 1 - Resumo das classificações da pesquisa

CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA			
Natureza	Problema	Objetivos	Procedimentos
			- Bibliográfica
			- Documental
			- Experimental
			- Levantamento
Básica	Quantitativa	Exploratória	- Estudo de caso
Aplicada	Qualitativa	Explicativa	- Ex-post-facto
		Descritiva	- Pesquisa-ação
			- Participante
			- Modelagem e simulação
			<ul style="list-style-type: none"> - Axiomática - Normativa axiomática - Descritiva empírica - Normativa empírica - Descritiva

Fonte: Os autores, 2022

3.2 Técnicas de Coleta de Dados

O tipo de investigação determina os métodos e técnicas para a coleta de dados. Para o presente trabalho tem-se por objetivo trazer um maior entendimento sobre o objeto da pesquisa, ou seja, mensurar o desgaste real das correntes determinando a espessura mínima que a mesma ainda possa realizar suas funções de projeto e sua vida útil.

Assim o desenvolvimento do estudo de confiabilidade acerca da problemática será feito a partir da coleta de dados baseada em observações em campo, informações sobre os componentes que influenciem no equipamento, banco de dados de histórico de falhas, planos de manutenção documentados e revisão de literaturas técnicas.

3.3 Técnicas de Análise de Dados

No presente trabalho, foi levantada a condição atual de operação das correntes do difusor por meio de medições da espessura dos elos, visando quantificar o desgaste atual do equipamento. Foram realizados ao todo a medição de 587 elos distribuídos pelas 12 linhas.

Foi usada como técnica de análise a Distribuição Normal (Gaussiana), já que a mesma combina a variação natural do sistema como erros aleatórios da observação, ou seja, isso significa que a média e a variância fundem erros de medida com a variação inerente dos processos. Sinclair e Blackwell (2006) destacam que essas distribuições são particularmente úteis para lidar com os vários tipos de erros, especialmente, aqueles em análise e amostragem, onde adentra para o caso estudado.

3.4 Procedimentos Metodológicos

A primeira etapa para o desenvolvimento deste estudo se deu pelo levantamento de informações acerca do equipamento. Assim, foram observadas informações no que diz respeito ao conjunto de acionamento – motor elétrico, redutor de velocidade, acoplamento e roda dentada (responsável pela transmissão de potência do conjunto) – e os dados de operação, que são as condições de esforços aplicáveis no sistema.

Após a coleta e observação desses dados, foi verificada a condição atual de operação das correntes do difusor por meio de medições da espessura dos elos, com o intuito de quantificar o desgaste atual do equipamento. Como citado anteriormente foram 587 elos, medidos utilizando o Medidor de Espessura de Chapas por Ultrassom - KR220 (Figura 6), distribuídos pelas 12 linhas.

Em vista de ser um equipamento eletrônico muito sensível, foi adotado que a cada 50 medições, sua recalibração seria feita, onde consistia basicamente em ajustar a velocidade da onda para o material medido. Em concordância com a empresa, foi realizado apenas uma medição por elo, com um erro de $\pm 0,1$ mm resultante do próprio equipamento.

Figura 6 - Medidor de espessura por ultrassom



Fonte: Manual produtos eletrônicos Akrom, 2019

Também se faz necessário conhecer as características mecânicas de todos os materiais utilizados, ou seja, sua resistência mecânica, onde os dados foram obtidos diretamente dos fornecedores. Embora para alguns materiais não foi possível obter suas propriedades, deste modo foi realizada uma revisão bibliográfica de ensaios de resistência deste material com diferentes condições de têmpera, temperatura e tempo de revenimento, podendo assim adotar estas informações com grande precisão.

Por último foi realizada a análise utilizando o Método dos Elementos Finitos no conjunto. Assim foram identificados os pontos de maior concentração de tensão para que se pudesse entender o comportamento do conjunto diante do carregamento.

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização da Empresa

A empresa foi formada em 2019 a partir da união dos negócios de bioenergia e açúcar, crescendo tanto em dimensões quanto em propósitos. Atua diretamente no mercado de agronegócio, alimentos e ingredientes e bioenergia, onde conta com aproximadamente 8.500 colaboradores diretos em 11 unidades agroindustriais, em 5 estados e 6 mil parceiros entre profissionais indiretos e fornecedores.

Possui um modelo de negócio integrado e comprometido com um presente e futuro sustentável, no qual trabalha sempre dedicado a segurança e ética. Conferindo, assim, uma identidade sólida e exemplar a empresa, que reflete também nos seus conceitos estratégicos, que são eles:

- Missão é cultivar a energia sustentável que move o mundo;
- Visão é ser referência mundial em energia sustentável;
- Valores focados na segurança, integridade, respeito, “ser um time” e excelência.

A empresa não só dispõe da flexibilidade de produzir um mix de etanol e açúcar, como também gerar eletricidade renovável a partir de bagaço da cana por meio de suas unidades de cogeração. Assim, sustenta suas 11 unidades localizadas nas regiões Sudeste, Norte e Centro-Oeste do Brasil com 32,4 milhões de toneladas de capacidade de moagem combinada por ano e vende a eletricidade excedente à rede elétrica brasileira.

A unidade estudada se situa na cidade de Frutal no estado de Minas Gerais e possui, atualmente, um total de 652 colaboradores ativos, sendo 158 alocados na parte industrial. Local onde se localiza o ponto focal do estudo, situado no setor de extração de caldo.

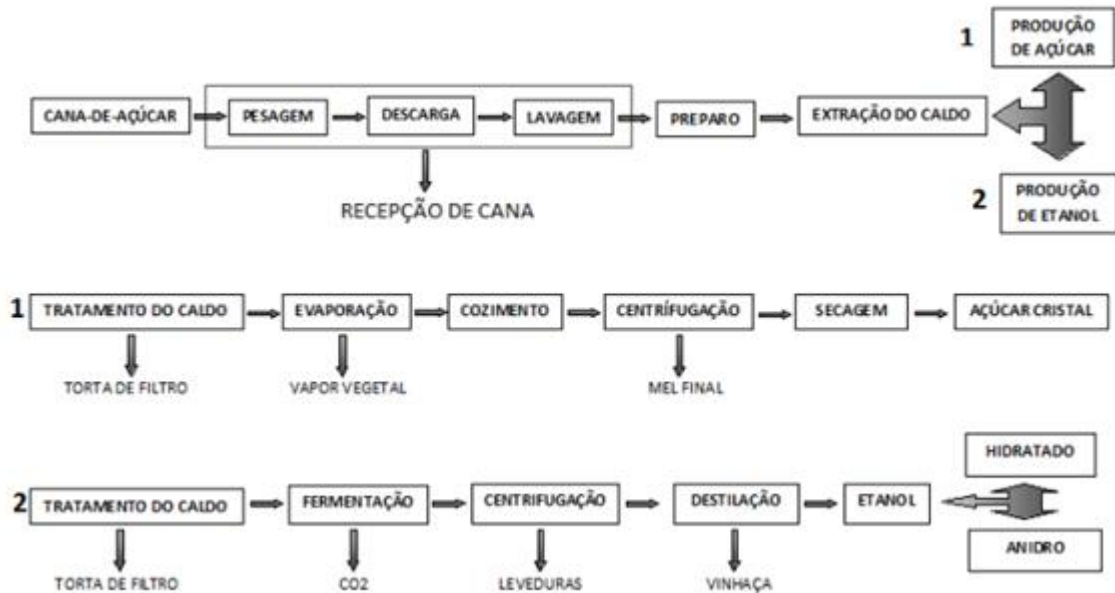
4.2 Mapeamento da Realidade Empresarial

Seu processo produtivo envolve um grande número de etapas e equipamentos, típico do setor bioenergético, que requer vários procedimentos de controle ao longo da cadeia produtiva. Isso torna a sequência das operações muito complexas, como também mais eficientes dependendo da eficácia delas.

Entre as várias etapas desse processo, a extração do caldo se destaca como uma das principais e mais importante etapa, uma vez que fornece a matéria prima (caldo) e também o

bagaço para as caldeiras. A seguir, a Figura 7 mostra o fluxograma de produção de açúcar e etanol desde a chegada da cana até seu produto final.

Figura 7 - Fluxograma de produção de açúcar e etanol



Fonte: Ushima et al., 1990

Mediante o exposto, serão detalhados os processos de recepção, preparo e extração (RPE). Além do equipamento e da corrente de acionamento do difusor, que é o objeto de estudo deste projeto.

4.3 Recepção, Preparo e Extração (RPE)

Atualmente, a recepção e preparo da cana se dão em 4 etapas: pesagem da cana, amostragem, recepção e o preparo.

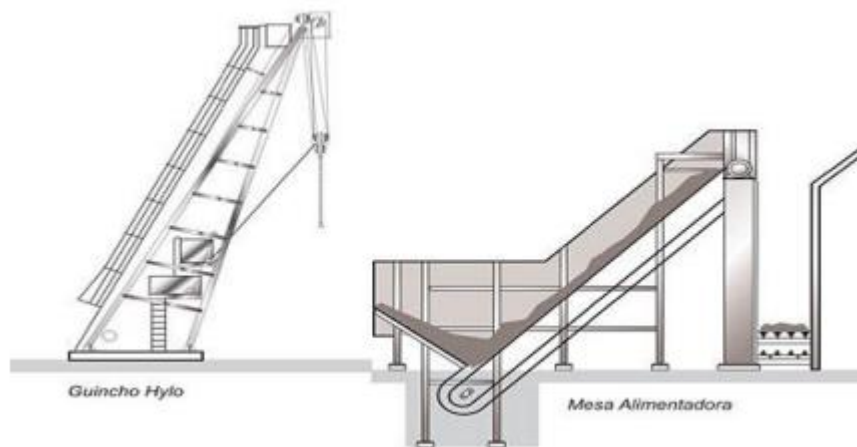
O recebimento da cana-de-açúcar se inicia com sua pesagem, que é rigorosamente executada, já que por meio dela o controle agrícola e industrial da unidade é feito. A pesagem incorreta acarreta em erro nos balanços e rendimentos globais da fábrica. Assim, os caminhões são pesados antes e após o descarregamento obtendo o peso real da cana pela diferença entre as duas medidas.

Na etapa de amostragem, são retiradas amostras da matéria-prima através de uma sonda oblíqua sendo enviadas ao laboratório, onde são analisadas em condições padronizadas. São determinados os teores de pol (porcentagem em massa de sacarose aparente), o brix

(porcentagem em massa de sólidos solúveis), umidade, fibras e impurezas. Esses dados são usados tanto para efetuar o pagamento de cana pelo teor de sacarose, como também são indicadores necessários para o cálculo da eficiência de extração e permite assim, averiguar a qualidade da matéria-prima inserida no processo.

Posteriormente no processo, a recepção ou descarga de cana é realizada através de um tombador tipo hilo diretamente sobre a mesa alimentadora que interliga a descarga com o esteirão de cana, que pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 - Sistema de descarregamento



Fonte: Ribeiro, 2003

Além da mesa ser o primeiro equipamento a entrar em contato com a matéria prima, ela tem a função de controlar a quantidade de cana sobre a esteira metálica. A mesa recebe as cargas da matéria prima diretamente dos caminhões através do hilo, transferindo-a para a esteira metálica que a conduzem até o difusor, passando antes pelo sistema de preparo.

A mesa alimentadora é um transportador de corrente dividida em dois conjuntos ou leitos. O primeiro conjunto que recebe a cana do hilo, tem angulação de 26° e controla o fluxo na mesa. O segundo conjunto com inclinação de 45°, usando correntes com taliscas tem a função de fornecer uma camada de cana uniforme na esteira metálica até o preparo. Essa etapa é importante, pois a alimentação possui uma quantidade correta, já que, com uma sobrecarga nos picadores e desfibradores pode ocorrer a formação de “buchas” e atrapalhar o processo.

A cana recebida da mesa alimentadora é transportada para o setor de preparo através da esteira metálica de cana, diretamente para o conjunto de picador e desfibrador de cana, nessa sequência.

Assim, o picador que é constituído por um jogo de facas, prepara a cana a ser enviada ao desfibrador. O picador é um equipamento rotativo de facas oscilantes que tem por finalidade aumentar a densidade da cana, cortando-a em pedaços menores e, assim, transforma os toletes em camadas uniformes e nivela as cargas colocadas na esteira, preparando-a para o trabalho do desfibrador.

Seguindo o processo, o desfibrador que tem como objetivo abrir as células da cana para aumentar a eficiência da extração do caldo, é formado por um tambor alimentador que compacta a cana à sua entrada e um rotor constituído por um conjunto de martelos oscilantes. Os martelos giram em sentido contrário à esteira forçando a passagem da cana por uma pequena abertura ao longo de uma placa desfibradora.

A extração do caldo consiste no processo físico de separação da fibra (bagaço), sendo feito, fundamentalmente, por meio de dois processos: um dos processos utiliza as moendas, que separam o caldo das fibras da cana por meio de sucessivas prensas. De acordo com Castro (2018), o processo com moendas é mais utilizado pelas usinas brasileiras do que o difusor, processo utilizado na empresa estudada. O difusor é basicamente um lixiviador de cana, que realiza essa separação pelo processo de difusão e lixiviação.

4.3.1 Difusor

Na maioria dos casos, o difusor tem sido o equipamento escolhido para os processos de extração das novas plantas industriais em solo brasileiro, isso se deve indubitavelmente a elevada extração que pode superar 98 %, sendo este o principal trunfo desta tecnologia. Sob o mesmo ponto de vista, Biagi (2013) acrescenta que a extração por meio de difusores aumenta significativamente a eficiência da operação, já que apresenta diversas vantagens em comparação a um conjunto de moendas, no qual se pode citar:

- Maior extração de sacarose;
- Menores investimentos em equipamentos e instalações;
- Custos de manutenção reduzidos;
- Aumento da flexibilidade operacional.

O processo de extração funciona resumidamente com a cana desfibrada sendo conduzida pela esteira de arraste em meio a uma série de telas móveis em chapas perfuradas (calhas), onde recebe água de embebição e caldo prensado provenientes das calhas de distribuição.

O caldo percolado pelo colchão de cana é coletado em uma série de captadores situados sob o difusor e bombeados para o estágio precedente, promovendo embebição do colchão de cana em contracorrente ao movimento do colchão de cana. O caldo dos estágios 1 e 2 são aquecidos externamente por um conjunto de aquecedores casco e tubo, a uma temperatura em torno de 90 °C, onde esse caldo aquecido é, então, reintroduzido no difusor na entrada da cana.

Dois conjuntos com nove roscas afoadoras cada promovem a descompactação do colchão favorecendo a percolação. É introduzido também vapor vegetal de baixa pressão ao longo do difusor para manter a temperatura interna ao redor de 80 °C. O caldo extraído pela difusão e lixiviação do primeiro estágio é recalcado para uma peneira rotativa e, em seguida, transferido para um tanque de caldo peneirado e o megaço é descarregado na esteira de saída do difusor através de um descarregador rotativo.

Mediante o exposto, observa-se que o difusor (Figura 9) funciona basicamente por meio de dois processos de maneira a separar o caldo da fibra. Tem-se primeiro o processo predominante, a lixiviação, que é o arraste da sacarose e dos sólidos solúveis contidos nas células abertas pela água. Em outras palavras, é um processo de lavagem repetitiva passando por diluição para a solução de menor concentração. Além disso, a extração dispõe também de um processo com menos predominância, a difusão, já que é relativa apenas às células não rompidas da cana. A difusão é basicamente a migração das moléculas de um meio mais concentrado para um meio menos concentrado (osmose), onde esse processo necessita de temperatura mais elevada e de um tempo maior de residência para que a membrana se torne permeável e possibilite essa movimentação.

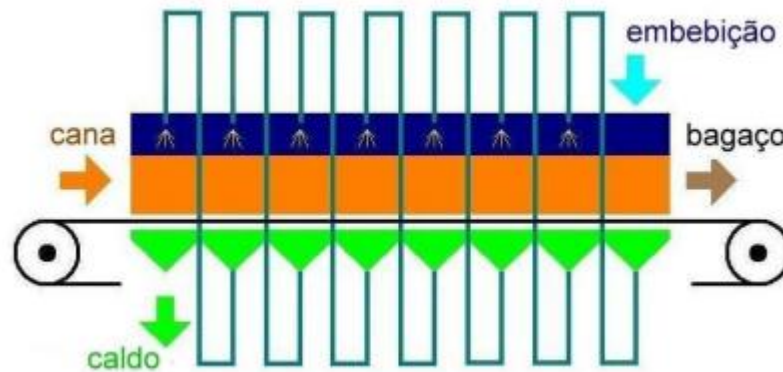
Figura 9 - Difusor



Fonte: Autoria própria, 2022

Portanto o processo de extração da sacarose depende exclusivamente da porcentagem de células rompidas efetuadas no preparo da cana e também da possibilidade de acesso do líquido de extração a estas células, ou seja, o processo de embebição que é demonstrado na Figura 10.

Figura 10 - Sistema de embebição do difusor



Fonte: Bastos Neto, 2008

Em vista disso, o caldo aumenta sua concentração gradualmente até atingir seu máximo no captador situado junto à entrada da cana no difusor, de onde é bombeado para peneiramento e daí para o processo. Analogamente, o bagaço que segue em direção à parte final do difusor tem sua concentração de sacarose diminuída gradualmente.

Além disso o difusor mantém constante seu desempenho numa faixa entre 40 e 120 % de sua capacidade nominal. Isto se deve, pois ele permite variações da velocidade das correntes, da altura do colchão de cana, da quantidade de água de embebição e do perfil interno de temperatura, assim o operador tem um leque de combinações que permite encontrar uma solução ideal para cada momento.

Segundo colaboradores que trabalham na área da empresa estudada, a maioria dos componentes e os equipamentos que compõem o difusor são robustos e garantem para esta tecnologia menores custos de manutenção e maior flexibilidade operacional.

Estas afirmações ocasionam uma indagação. Já que o difusor pode operar numa faixa entre 40 e 120 % da capacidade nominal, com a organização tendo um leque de soluções ideais acerca de cada momento da produção, isso implica que o esforço empregado aos equipamentos que compõem o difusor é variável e pode ser afetado por vários fatores.

Assim, a corrente que promove o movimento no difusor tem sua vida útil ligada ao esforço aplicado pelo colchão de cana desfibrada. Hutchings (2017) explica que a resistência

encontrada por um corpo em movimento sobre outro, ou seja, o atrito, se faz necessário a aplicação de uma força para mover este corpo sobre a superfície, no qual a relação entre esta força e a carga normal é dada pelo coeficiente de atrito. Portanto, quanto maior o coeficiente de atrito, maior deverá ser a força para vencer a resistência do atrito ao movimento do corpo.

De acordo com Bhushan (2000), desgaste é definido como o fenômeno de remoção de material da superfície devido à interação com a outra superfície, não sendo uma propriedade dos materiais, mas sim uma resposta do sistema. Quando uma superfície desliza sobre a outra ocorre o desgaste em uma ou ambas, dependendo exclusivamente da pressão de contato entre as superfícies, como também de sua temperatura.

Portanto, a vida útil da corrente se altera dependendo do quão grande é a força normal aplicada pelo colchão de cana desfibrada na corrente, onde já dito anteriormente, essa força normal é diretamente ligada ao coeficiente de atrito, já que quanto maior ele for, maior deverá ser a força para vencer a resistência do atrito ao movimento do corpo.

Dessa maneira a decorrente necessidade de produção da organização é diretamente responsável pela vida útil do equipamento, já que quanto mais material no colchão maior a força normal na corrente, necessitando assim de uma maior potência do conjunto de acionamento para que o colchão se movimente e, respectivamente, exercendo uma maior tensão nos elos.

Diante disso, a vida útil especificada pelo fabricante não é fixa, e sim uma estimativa.

4.4 Propostas de Melhoria

De acordo com o fabricante e prezando pela maior segurança, a vida útil das correntes instaladas no difusor é de 10 anos, o que vai em desacordo com as várias definições da confiabilidade apresentadas no trabalho. Para confrontar e averiguar esta informação, por meio da tensão von-mises, foi estimado o desgaste máximo e por conseguinte a vida útil da corrente pelo método dos elementos finitos (MEF). Onde por meio de 5 condições de esforços retiradas das informações operacionais do equipamento, foi determinada a mais crítica para assim ser usada como critério de tensão de von Mises.

Essa teoria afirma que um material dúctil começa a escoar em um local onde a tensão de von Mises se torna igual ao limite de tensão. Nesse sentido, a condição de esforço que possuir a maior força de tração na corrente, será usada como limite de tensão.

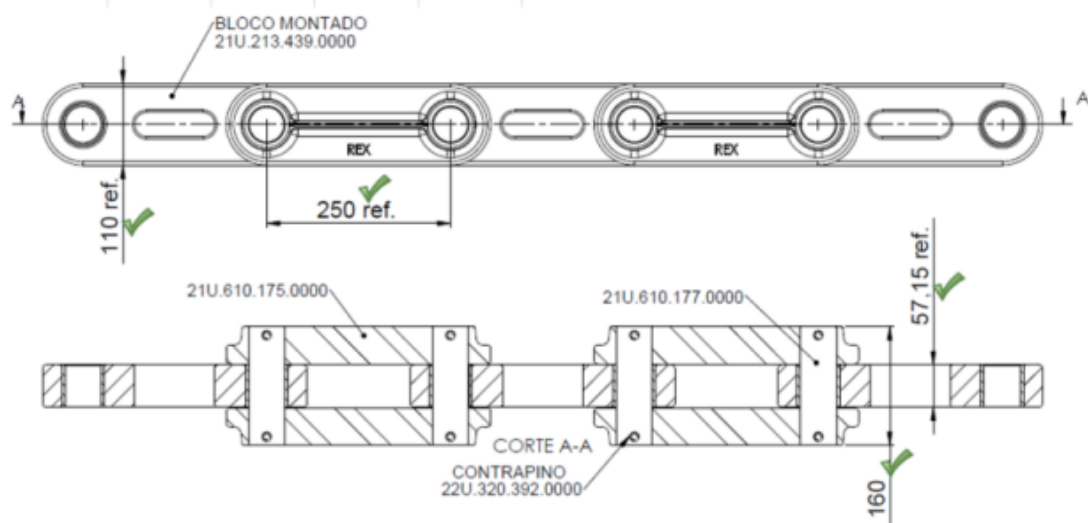
Para tal fim foi primordial levantar as informações dos equipamentos, as características mecânicas dos materiais utilizados na corrente e mensurar o desgaste real de cada conjunto por meio de medições em campo.

4.4.1 Informações dos Equipamentos

4.4.1.1 Corrente de Acionamento do Difusor

A corrente instalada na unidade é de fabricação da REXNORD, de modelo REX 10FF CSS FORJADA, com as medidas apresentadas na Figura 11.

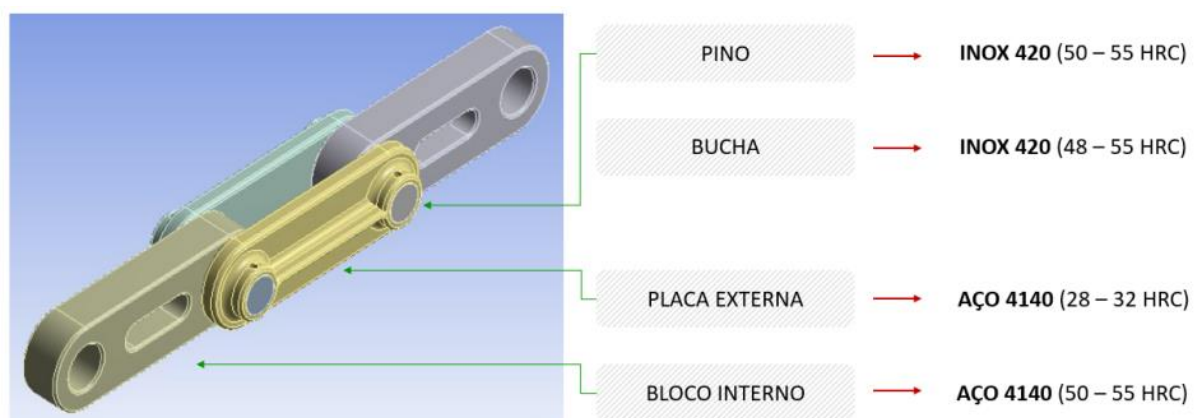
Figura 11 - Desenho da corrente REXNORD



Fonte: Base de dados empresa estudada, 2022

A Figura 12 apresenta a indicação dos quatro componentes que constituem o conjunto, assim como a indicação do material de fabricação e dureza.

Figura 12 - Representação dos componentes e características físicas



Fonte: Base de dados empresa estudada, 2022

4.4.1.2 Motor Elétrico

O conjunto de acionamento é composto pelo motor de acionamento WEG 315 S/M de 200 CV. O motor e sua plaqueta de dados são apresentados na Figura 13 e o detalhamento dos dados do motor utilizado pode ser visto na Tabela 2.

Figura 13- Motor elétrico e plaqueta de dados



Fonte: Autoria própria, 2022

Tabela 2 - Dados elétricos do motor utilizado

Carcaça	WEG 315S/M
Potência	200 HP/150 kW
Nº de polos	6
Tensão nominal	220/380/440 V
Corrente nominal	496/287/248 A
Rotação nominal	1185 rpm
Rendimento	94,20 %
Conjugado Nominal	1203 N.m
Conjugado máximo	2 %

Fonte: Autoria própria, 2022

4.4.1.3 Redutor de Velocidade

Além do motor elétrico, o conjunto de acionamento também é composto por um redutor planetário SEW X4PH25/B de fator de redução de 3016 vezes. A Figura 14 apresenta o redutor de velocidade e sua plaqueta de dados.

Figura 14 - Redutor de velocidade e plaqueta de dados



Fonte: Autoria própria, 2022

O detalhamento dos dados técnicos do redutor utilizado é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados técnicos do redutor utilizado

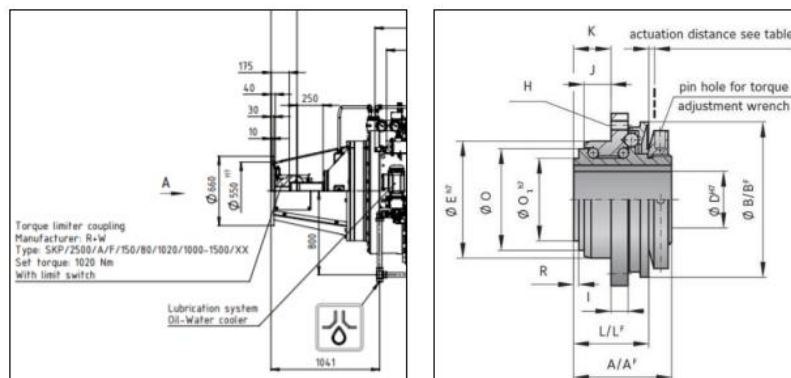
Ano de fabricação	2015
Rotação de entrada (n1)	1185 rpm
Rotação de saída (n2)	0,4 rpm
Redução (i)	3016
Fator de serviço	1,41

Fonte: Autoria própria, 2022

4.4.1.4 Acoplamento Limitador de Torque

A transmissão de potência entre o motor elétrico e o redutor de velocidade é feita através do acoplamento limitador de torque, que desarma com a aplicação de um torque acima do valor limite especificado. A Figura 15 mostra detalhes acerca do acoplamento.

Figura 15 - Acoplamento limitador de torque



Fonte: Base de dados empresa estudada, 2022

O detalhamento dos dados técnicos desse acoplamento é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados técnicos do acoplamento limitador de torque

Fabricante	R + W
Modelo	SKP
Torque limite (Clmt)	1020 N.m

Fonte: Autoria própria, 2022

4.4.1.5 Roda Dentada

A transmissão de potência do conjunto de acionamento é transmitida às 12 linhas de corrente através de roda dentada com especificações apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados técnicos da roda dentada

Número de dentes	8
Passo	250 mm
Diâmetro primitivo	1281,5 mm

Fonte: Autoria própria, 2022

4.4.2 Características Mecânicas dos Materiais do Elo

Para que se possa realizar uma boa representação do modelo aproximado, depende principalmente de dois fatores, a malha dos elementos finitos e a escolha do elemento apropriado para modelar a situação física. Onde a escolha do tamanho da malha depende exclusivamente do conhecimento das propriedades do elemento escolhido para a representação do problema. Assim, para que a solução MEF seja satisfatória, é necessário levantar e ter conhecimento das características mecânicas dos materiais utilizados nos elos.

4.4.2.1 Pino e Bucha

No caso do pino e bucha, a REXNORD especifica que o material utilizado para a sua fabricação é o Aço Inox 420, tratado termicamente com têmpera, com dureza de 48 a 55 HRC.

Para este material temperado e revenido com dureza superficial de 55 HRC, foi obtido o valor de 1,334 GPa de limite de escoamento e 1,586 GPa de limite de ruptura com o fornecedor.

4.4.2.2 Placa Externa e Bloco Interno

A REXNORD especifica que o material utilizado para a sua fabricação é o aço 4140, tratado termicamente com têmpera e com dureza de 50 a 55 HRC, sendo que o núcleo do bloco interno possui dureza de 28 a 32 HRC.

Não foi possível obter as propriedades físicas do aço 4140 nessas condições com fornecedores. Assim para estipular essas informações foi feita uma revisão bibliográfica acerca de ensaios de resistência deste material com diferentes condições de têmpera, temperatura e tempo de revenimento. Onde as propriedades mecânicas do aço 4140 após diferentes tratamentos térmicos pode ser observado nas Tabelas 6 e 7 respectivamente.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas do aço SAE 4140

Corpo-de-prova	Tratamento Térmico	σ_{LE} [MPa]	σ_{LR} [MPa]	ϵ [%]
CP-1	M1	1362	2112	10
CP-3	M17	902	1074	14
CP-5	M5	1034	1197	14
CP-6	M11	1034	1141	12
CP-8	M7	1194	1939	8
CP-9	M13	998	1578	5

Fonte: Rocha et. al., 2004

Tabela 7 - Dureza e energia de impacto do aço SAE 4140 após os tratamentos térmicos

Tratamento Térmico		Amostra	Dureza [HRC]	Energia Charpy [J]
Têmpera e/ou Trat. Intercrítico	Temperatura do Revenido [°C]			
Têmpera 900°C / 2h (Resfriamento em óleo)	não revenida	M1	54,70 ± 0,50	23
	200	M2	54,30 ± 0,60	34
	300	M3	48,25 ± 0,35	17
	400	M4	48,20 ± 0,50	18
	500	M5	39,82 ± 0,41	79
	600	M6	31,10 ± 0,70	130
Têmpera 900°C / 2h acrescido de Recozimento Intercrítico 766 – 767°C / 1h (Resfriamento em óleo)	não revenida	M7	47,20 ± 0,80	47
	200	M8	45,00 ± 1,00	27
	300	M9	35,00 ± 0,27	26
	400	M10	43,90 ± 3,50	36
	500	M11	31,35 ± 0,33	86
	600	M12	21,80 ± 0,90	144
Recozimento Intercrítico 766 – 767°C / 2h (Resfriamento em óleo)	não revenida	M13	46,90 ± 0,60	38
	200	M14	48,20 ± 0,40	16
	300	M15	44,25 ± 0,40	21
	400	M16	36,90 ± 1,00	34
	500	M17	32,30 ± 0,40	116
	600	M18	24,10 ± 0,60	150

Fonte: Rocha et. al., 2004

Considerando os valores apresentados no estudo, pode-se observar que as características mecânicas do aço 4140 não diferem dos valores fornecidos no catálogo da REXNORD para aços e ligas temperados conforme a Tabela 8. Assim podem estas serem adotadas com grande precisão.

Tabela 8 - Propriedades de aços e ligas temperadas

C 150 kg	A 60 kg	D 100 kg	15-N 15 kg	30-N 30 kg	45-N 45 kg	Diamond Pyramid Hard- ness 10 kg	Knoop Hard- ness 500 g & over	Brinell Hard- ness 3000 kg	Tensile Strength Approx. Only	
ROCKWELL			SUPERFICIAL			Diamond Pyramid Hard- ness 10 kg	Knoop Hard- ness 500 g & over	Brinell Hard- ness 3000 kg	ksi	MPa
BRALE	BRALE	BRALE	N BRALE	N BRALE	N BRALE					
65	84.0	74.5	92.0	82.0	72.0	820	846	-	-	-
64	83.5	74.0	-	81.0	71.0	789	822	-	-	-
63	83.0	73.0	91.5	80.0	70.0	763	799	-	-	-
62	82.5	72.5	91.0	79.0	69.0	739	776	-	-	-
61	81.5	71.5	90.5	78.5	67.5	716	754	-	-	-
60	81.0	71.0	90.0	77.5	66.5	695	732	614	314	2160
59	80.5	70.0	89.5	76.5	65.5	675	710	600	306	2110
58	80.0	69.0	-	75.5	64.0	655	690	587	299	2060
57	79.5	68.5	89.0	75.0	63.0	636	670	573	291	2010
56	79.0	67.5	88.5	74.0	62.0	617	650	560	284	1960
55	78.5	67.0	88.0	73.0	61.0	598	630	547	277	1910
54	78.0	66.0	87.5	72.0	59.5	580	612	534	270	1860
53	77.5	65.5	87.0	71.0	58.5	562	594	522	263	1815
52	77.0	64.5	86.5	70.5	57.5	545	576	509	256	1765
51	76.5	64.0	86.0	69.5	56.0	538	558	496	250	1720
50	76.0	63.0	85.5	68.5	55.0	513	542	484	243	1675
49	75.5	62.0	85.0	67.5	54.0	498	526	472	236	1630
48	74.5	61.5	84.5	66.5	52.5	485	510	460	230	1585
47	74.0	60.5	84.0	66.0	51.5	471	495	448	223	1540
46	73.5	60.0	83.5	65.0	50.0	458	480	437	217	1500
45	73.0	59.0	83.0	64.0	49.0	446	466	426	211	1460
44	72.5	58.5	82.5	63.0	48.0	435	452	415	205	1415
43	72.0	57.5	82.0	62.0	46.5	424	438	404	199	1375
42	71.5	57.0	81.5	61.5	45.5	413	426	393	194	1335
41	71.0	56.0	81.0	60.5	44.5	403	414	382	188	1295
40	70.5	55.5	80.5	59.5	43.0	393	402	372	182	1255
39	70.0	54.5	80.0	58.5	42.0	383	391	362	177	1220
38	69.5	54.0	79.5	57.5	41.0	373	380	352	171	1180
37	69.0	53.0	79.0	56.5	39.5	363	370	342	166	1145
36	68.5	52.5	78.5	56.0	38.5	353	360	332	162	1115
35	68.0	51.5	78.0	55.0	37.0	343	351	322	157	1080
34	67.5	50.5	77.0	54.0	36.0	334	342	313	153	1050
33	67.0	50.0	76.5	53.0	35.0	325	334	305	148	1020
32	66.5	49.0	76.0	52.0	33.5	317	326	297	144	990
31	66.0	48.5	75.5	51.5	32.5	309	318	290	140	965
30	65.5	47.5	75.0	50.5	31.5	301	311	283	136	935
29	65.0	47.0	74.5	49.5	30.0	293	304	276	132	910
28	64.5	46.0	74.0	48.5	29.0	285	297	270	129	885
27	64.0	45.5	73.5	47.5	28.0	278	290	265	126	865
26	63.5	44.5	72.5	47.0	26.5	271	284	260	123	850
25	63.0	44.0	72.0	46.0	25.5	264	278	255	120	830
24	62.5	43.0	71.5	45.0	24.0	257	272	250	117	810
23	62.0	42.5	71.0	44.0	23.0	251	266	245	115	795
22	61.5	41.5	70.5	43.0	22.0	246	261	240	112	775
21	61.0	41.0	70.0	42.5	20.5	241	256	235	110	760
20	60.5	40.0	69.5	41.5	19.5	236	251	230	108	745

Fonte: Catálogo REXNORD, 2014

Embasado nas informações levantadas, serão adotadas as tensões de ruptura abaixo:

- Placa Externa: 1,7 GPa;
- Bloco interno (superfície): 1,7 GPa;
- Bloco interno (núcleo): 0,8 GPa.

4.4.3 Desgaste Real

O elo possui espessura nominal de 110 milímetros, onde para levantar a condição atual de operação das correntes do difusor, foi realizada medição de sua espessura para quantificar o desgaste atual do componente. Como já citado anteriormente, foi realizado a medição de 587 elos distribuídos pelas 12 linhas, onde os dados já tratados podem ser observados na Tabela 9.

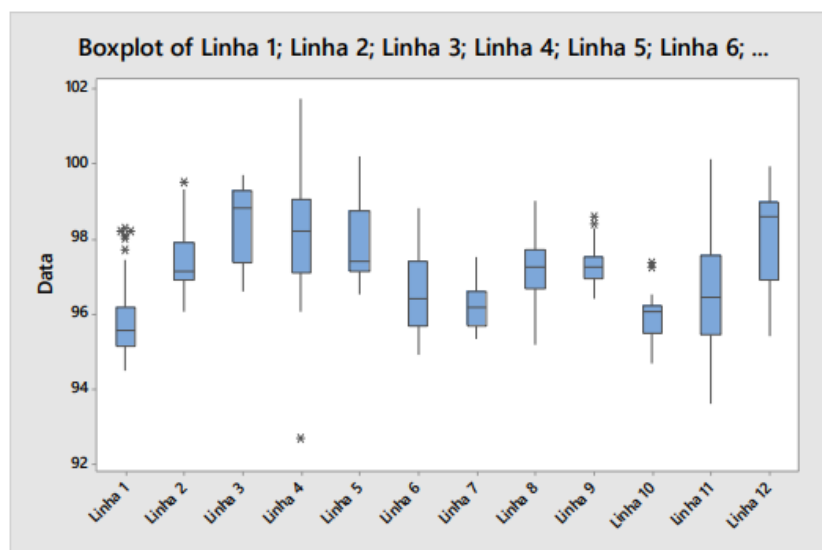
Tabela 9 - Dados gerais da amostragem (mm)

Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
Linha 1	48	0	95,868	0,147	1,018	94,487	95,151	95,550	96,166	98,300
Linha 2	48	0	97,429	0,129	0,896	96,081	96,908	97,144	97,889	99,500
Linha 3	48	0	98,437	0,140	0,972	96,613	97,384	98,820	99,272	99,700
Linha 4	48	0	97,974	0,204	1,413	92,700	97,100	98,204	99,059	101,720
Linha 5	48	0	97,780	0,140	0,972	96,506	97,144	97,400	98,740	100,200
Linha 6	47	0	96,608	0,147	1,011	94,912	95,700	96,400	97,400	98,800
Linha 7	47	0	96,205	0,0857	0,588	95,337	95,700	96,188	96,613	97,500
Linha 8	50	0	97,189	0,106	0,746	95,200	96,692	97,251	97,700	99,000
Linha 9	51	0	97,261	0,0739	0,527	96,400	96,932	97,251	97,500	98,600
Linha 10	47	0	95,911	0,0790	0,542	94,700	95,500	96,081	96,200	97,357
Linha 11	48	0	96,496	0,191	1,322	93,600	95,458	96,450	97,570	100,123
Linha 12	57	0	98,056	0,164	1,235	95,400	96,916	98,600	98,976	99,910

Fonte: Autoria própria, 2022

Além disso, foi feito também o gráfico box plot (Figura 16) para se ter a indicação de como os valores das espessuras estão distribuídas para cada linha. De acordo com o gráfico é possível verificar a amplitude das medições, como também identificar a existência de outliers no conjunto.

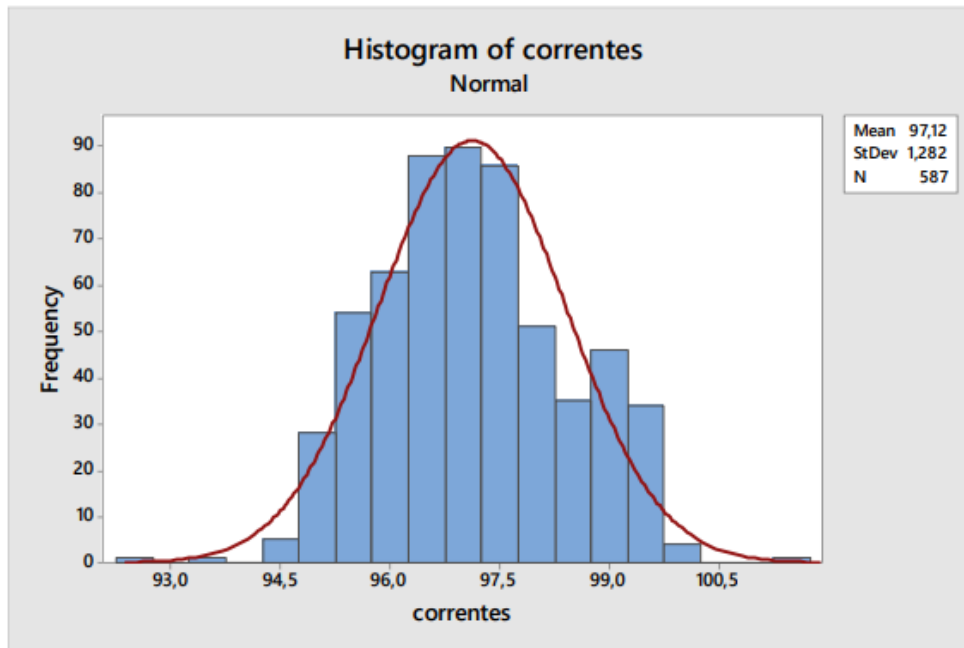
Figura 16 - Blox pot das medidas encontradas por linha (mm)



Fonte: Autoria própria, 2022

Já na Figura 17, o histograma fornece uma melhor representação gráfica do conjunto de dados, tornando mais fácil a visualização de onde a maioria desses valores se concentra. Assim é possível observar que a característica de desgaste dos elos apresenta comportamento normal.

Figura 17 - Histograma da espessura por linha (mm)



Fonte: Autoria própria, 2022

A pequena elevação da quantidade de amostras com valores de espessura próximas à 99 mm se deve a substituição de elos ao longo dos 14 anos de operação da corrente, não havendo histórico detalhado da quantidade de elos substituídos.

Por outro lado, uma melhor visualização dos valores de desgaste encontrados, é obtida na Figura 18, que apresenta o mapa de calor das 12 linhas da corrente do difusor.

Figura 18 - Mapa de calor das espessuras (mm)

Linha 1	Linha 2	Linha 3	Linha 4	Linha 5	Linha 6	Linha 7	Linha 8	Linha 9	Linha 10	Linha 11	Linha 12
94,8	96,5	97,4	96,7	97,0	95,8	96,3	95,2	96,9	96,2	97,5	98,8
95,3	96,9	97,3	96,3	96,9	96,3	96,0	96,6	97,1	97,3	97,3	99,6
95,2	96,5	98,0	97,5	97,4	95,7	96,0	95,9	97,4	95,5	97,5	99,3
95,7	97,0	97,3	97,3	97,5	96,6	96,6	97,5	97,0	96,4	97,0	99,7
96,2	97,9	97,9	96,4	96,6	95,5	96,2	96,9	97,1	95,1	97,8	99,1
95,8	96,2	98,0	96,2	97,1	95,2	96,2	96,7	96,7	95,4	97,9	98,8
94,9	97,3	98,0	97,4	97,1	96,8	96,3	97,5	97,4	96,1	97,6	99,7
95,9	97,1	97,3	96,1	97,6	96,3	96,4	97,0	96,7	96,2	97,5	99,9
95,3	96,6	97,1	96,9	97,1	95,7	95,7	97,1	97,0	96,1	98,4	99,5
94,9	96,9	96,6	96,6	97,1	95,3	95,8	97,3	96,7	95,4	100,1	98,8
94,9	97,0	97,8	96,6	96,5	96,3	95,3	97,0	97,5	94,7	97,8	98,7
96,1	97,0	97,5	97,1	97,1	96,0	96,1	97,0	96,9	95,3	97,9	98,7
95,1	96,9	97,3	98,8	99,1	97,9	95,7	96,4	97,0	96,2	97,6	99,3
94,9	96,6	99,6	98,8	98,8	98,0	95,4	96,0	97,4	96,1	97,8	99,2
95,4	96,1	99,5	98,8	99,1	97,9	96,3	96,4	97,5	96,5	97,6	99,0
95,2	97,0	99,3	99,1	98,7	98,3	96,4	96,6	97,0	96,4	97,8	99,6
94,8	96,7	99,5	99,0	99,0	98,0	96,6	98,0	96,9	96,4	97,9	98,4
95,5	97,1	99,3	98,2	98,7	97,6	96,6	98,0	97,4	96,1	98,0	98,8
96,0	96,7	99,2	99,2	99,1	98,2	96,1	97,4	98,0	96,2	94,6	98,6
95,1	97,0	99,1	99,2	99,0	97,9	96,5	97,9	97,5	97,4	94,9	98,8
96,3	96,4	99,2	97,8	96,7	94,9	96,4	97,5	97,9	96,4	94,5	99,8
94,9	97,1	97,8	97,3	96,7	96,6	97,0	97,8	97,3	96,2	94,6	99,1
95,1	96,3	99,1	99,3	97,1	97,0	95,5	97,1	97,3	95,5	95,3	99,0
95,4	97,1	98,7	99,5	96,7	96,5	95,4	97,5	96,9	96,0	95,8	98,4
95,3	97,1	99,2	99,2	97,5	96,7	95,3	97,3	97,6	95,8	97,8	98,8
95,5	97,6	98,3	99,5	96,9	95,5	95,4	96,6	97,4	96,3	94,8	98,4
94,9	97,9	99,1	99,1	97,1	95,5	95,5	97,3	96,7	96,2	95,4	98,7
95,2	97,9	99,5	99,1	97,0	96,5	95,8	96,7	97,0	95,5	95,7	97,3
95,5	97,4	99,3	101,7	97,3	95,3	95,4	96,2	97,3	95,1	96,0	96,7
94,5	96,9	99,5	99,6	97,1	96,1	96,7	97,4	96,6	96,1	95,8	95,4
95,2	97,9	99,6	99,3	97,8	95,5	96,5	97,3	96,5	95,5	95,1	97,0
95,5	99,3	99,2	97,1	97,3	96,2	96,1	97,3	96,5	95,7	95,8	96,3
97,5	98,8	99,0	96,5	97,4	95,6	96,2	98,0	96,4	95,4	97,5	97,4
98,1	99,2	97,1	98,2	97,2	96,3	95,7	97,9	96,4	95,0	96,8	96,3
97,7	99,5	97,1	98,6	97,4	96,4	95,9	97,1	97,2	95,6	95,2	96,7
98,3	98,7	96,8	98,1	97,1	96,8	97,2	96,4	97,5	95,3	95,7	96,6
98,2	97,2	98,9	98,9	97,4	97,4	96,4	95,2	97,5	95,2	95,5	96,5
98,0	97,4	99,4	98,7	98,7	96,4	95,8	97,6	96,4	96,2	97,1	96,5
98,2	98,4	99,1	98,3	97,6	95,7	95,5	97,6	98,0	95,8	96,1	96,9
95,7	98,2	99,6	99,1	98,2	97,2	97,2	97,7	97,4	95,8	95,9	96,7
95,8	98,6	99,6	98,6	98,4	96,6	95,8	98,0	96,9	96,2	96,8	95,4
96,8	99,3	99,4	97,1	96,8	96,6	96,8	97,7	97,2	95,3	95,1	96,6
95,8	99,3	99,7	97,1	97,4	95,8	97,4	97,4	97,0	95,5	95,8	97,2
96,1	97,4	97,2	98,5	99,3	96,3	97,1	97,5	98,3	96,1	95,3	96,9
95,8	97,4	97,1	97,0	99,1	98,8	97,5	97,8	97,5	96,4	96,1	95,9
96,3	96,8	98,3	97,0	99,6	98,6	97,1	99,0	98,0	96,3	95,8	97,4
96,1	97,2	98,3	97,5	99,7	98,3	96,4	97,6	98,6	96,4	96,8	96,4
96,5	96,9	97,6	97,2	100,2			98,3	97,4		93,6	97,6
							96,4	98,3			97,5
							98,1	97,8			97,5
								98,4			97,2
											98,6
											98,8
											98,1
											99
											99,3
											98,7

Fonte: Autoria própria, 2022

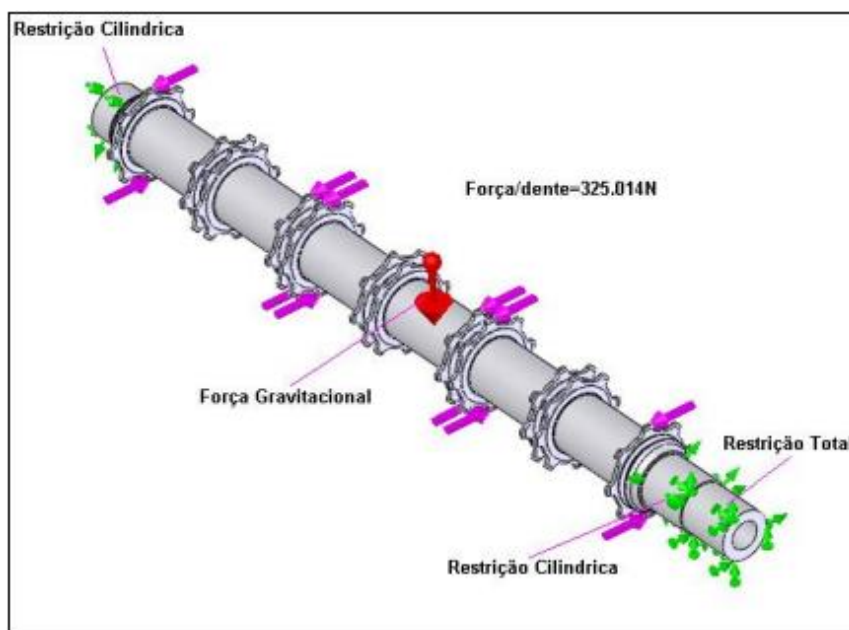
4.4.4 Simulação pelo Método dos Elementos Finitos

Para realizar a simulação pelo MEF na corrente de acionamento do difusor, além de determinar sua geometria, as propriedades de seus materiais e as condições de contorno, foram consideradas 5 condições (case) de esforço aplicáveis nos elos da corrente para determinar a carga mais crítica para, assim, ser usada como critério de tensão de von Mises.

4.4.4.1 Case 1: Esforços de Projeto

Para esta condição foram considerados os esforços adotados no projeto de eixo de acionamento do difusor (Figura 19). Essa condição leva em consideração os esforços gerados pela movimentação das correntes e colchão de bagaço, e o atrito destes componentes com as guias e chapas perfuradas, sendo a carga total aplicada à metade das linhas de corrente. O carregamento adotado nas análises estruturais realizadas pela empresa foi de 325,01 kN.

Figura 19 - Tração adotada pelo projeto do eixo de acionamento



Fonte: Base de dados empresa estudada, 2022

4.4.4.2 Case 2: Esforço Real de Operação

Nesta condição foi necessário utilizar as informações dos equipamentos empregados no conjunto de acionamento, motor elétrico e redutor de velocidade, apresentadas na Tabela 10.

Foi obtido o valor de corrente de operação do motor de acionamento do conjunto a partir do histórico de operação da Safra 2021, este valor foi cruzado com a curva Corrente x Conjugado fornecida pelo fabricante do motor, sendo esta ampliada proporcionalmente ao fator de redução do redutor de velocidade.

Tabela 10 - Informações CASE 2

Corrente média de saída	121 A
C/Cn	0,85
Conjugado nominal (Cn)	1203 N.m
Redução (i)	3016
Diâmetro primitivo	1281,5 mm

Fonte: Autoria própria, 2022

Assim com relação as informações da tabela, foi adotado o momento C2 de 3084,01 kN.m e a força em cada linha F2 de 401,09 kN.

4.4.4.3 Case 3: Esforço Máximo de Operação com Limitador

Foi considerado o esforço máximo que poderá ser aplicado até a atuação do acoplamento limitador de torque, instalado na união entre motor elétrico e redutor de velocidade. As informações do limitador estão contidas na Tabela 11.

Para esta condição, foi adotado o momento C3 de 3076,32 kN.m no eixo acionado do difusor e a força em cada linha F3 de 400,09 kN.

Tabela 11 - Informações CASE 3

Torque limite	1020 N.m
Redução (i)	3016
Diâmetro primitivo	1281,5 mm

Fonte: Base de dados empresa estudada, 2022

4.4.4.4 Case 4: Esforço Máximo de Operação Sem Limitador

Foi considerado o esforço máximo que poderá ser aplicado sem a atuação do acoplamento limitador de torque, instalado na união entre motor elétrico e redutor de velocidade.

Onde para essa condição, foi adotado o momento C4 igual a 7982,15 kN.m de torque no eixo acionado do difusor e F4 de 1038,12 kN.

4.4.4.5 Case 5: Esforço de Ruptura do Ensaio IPT

Para esta condição foi considerado o valor de ruptura encontrado no ensaio de tração do segmento de corrente enviado para análise, realizado pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas). Importante ressaltar que o conjunto ensaiado apresentava 96,1 mm de largura de elo, havendo apenas a ruptura do pino no ensaio (elemento mais frágil do conjunto).

As Figuras 4.19 e 4.20 demonstram respectivamente sua medida antes do ensaio e a consequente ruptura do elemento mais frágil do conjunto.

Figura 20 - Medida do elo enviado para ensaio



Fonte: IPT, 2022

De acordo com o ensaio, o esforço máximo de ruptura (F5) atingido pelo conjunto foi de 1859,8 kN.

Figura 21 - Conjunto montado para o ensaio de tração antes e após a ruptura



Fonte: IPT, 2022

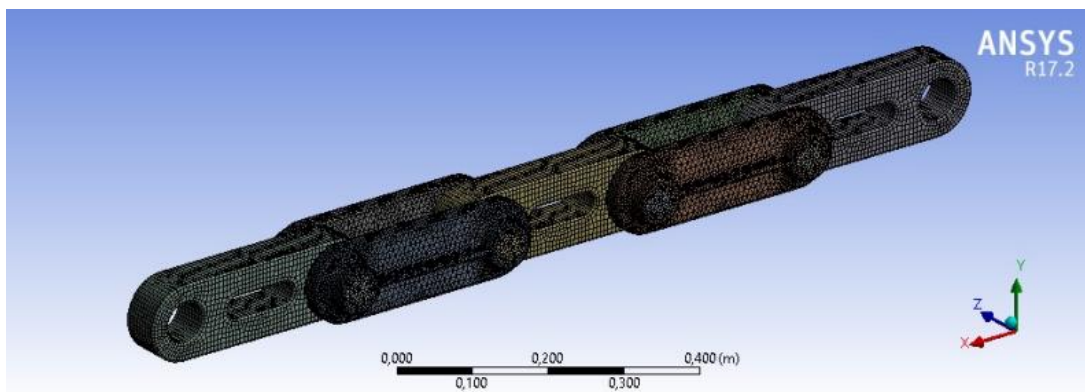
4.4.5 Modelagem do Conjunto

É importante ressaltar que os valores são referentes ao conjunto sem desgaste (110 mm de espessura), sendo o modelo refeito e gerado uma nova malha para cada uma das simulações de desgaste, não sendo relevante a inclusão do detalhamento para todas as malhas geradas neste trabalho. As simulações numéricas foram realizadas no software Ansys Workbench.

Para a simulação foi realizado o desenho da geometria tridimensional de 2,5 elos no software, como pode ser observado na Figura 22. Onde uma das extremidades está fixada e na extremidade oposta foi aplicado o carregamento.

Na Tabela 12, pode ser observado a quantidade de elementos e nós da malha, como também nas tabelas posteriores informações acerca das propriedades mecânicas e estruturais do modelo.

Figura 22 - Modelo 3D e malha gerada para análise de elementos finitos



Fonte: Relatório técnico empresa estudada, 2022

Tabela 12 - Informações da malha

Nós	381556
Elementos	235275

Fonte: Relatório técnico empresa estudada, 2022

Tabela 13 - Constantes

Density	7850, kg m ⁻³
Coefficient of Thermal Expansion	1,2e-005 C ⁻¹
Specific Heat	434, J kg ⁻¹ C ⁻¹
Thermal Conductivity	60,5 W m ⁻¹ C ⁻¹
Resistivity	1,7e-007 ohm m

Fonte: Relatório técnico empresa estudada, 2022

Tabela 14 - Resistências

Compressive Yield Strength	2,5e+008 Pa
Tensile Yield Strength	2,5e+008 Pa

Fonte: Relatório técnico empresa estudada, 2022

Tabela 15 - Parâmetros de vida de tensão

Strength Coefficient	9,2e+008 Pa
Strength Exponent	-0,106
Ductility Coefficient	0,213
Ductility Exponent	-0,47
Cyclic Strength Coefficient	1,0e+009 Pa
Cyclic Strain Hardening Exponent	0,2

Fonte: Relatório técnico empresa estudada, 2022

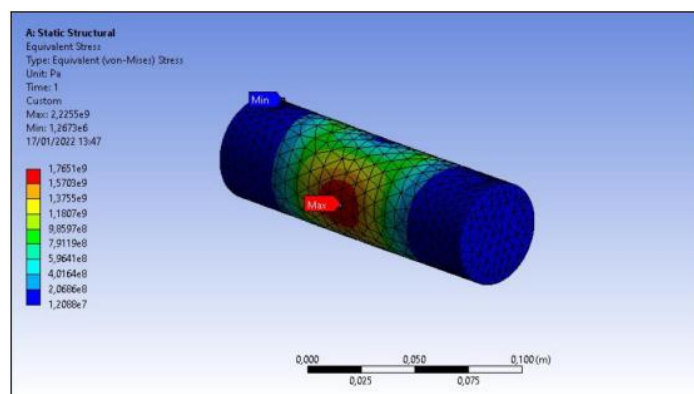
Tabela 16 - Elasticidade isotrópica

Temperature C	Young's Modulus Pa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus Pa	Shear Modulus Pa
	2,e+011	0,3	1,6667e+011	7,6923e+010

Fonte: Relatório técnico empresa estudada, 2022

Mediante os estudos de cada caso, a condição de carregamento das análises do IPT possui uma força maior sobre o conjunto. Assim este case foi escolhido para as simulações.

Além disso, a Figura 23 apresenta a distribuição e tensão equivalente (von-Mises) no pino da corrente REXNORD com a condição de ensaio realizado pelo IPT, que valida o valor de tensão de ruptura mencionado, onde a tensão equivalente von-Mises observada na imagem (1765,1 MPa) é igual a realizada no ensaio pelo IPT.

Figura 23 - PINO: Força = 1859,8 kN

Fonte: Relatório técnico empresa estudada, 2022

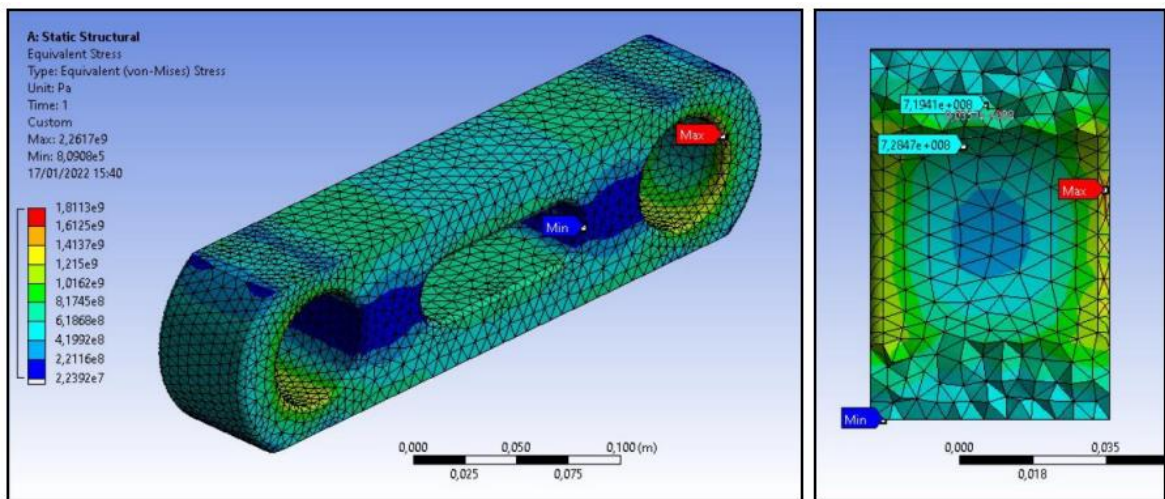
Como mencionado anteriormente, o ensaio do IPT entrega a tensão de ruptura do pino, o ponto mais fraco da corrente. Ou seja, independente do desgaste dos componentes da corrente, nenhum deles irá falhar antes do pino, mesmo ele não apresentando desgaste, já que o pino sempre vai ser o elemento mais fraco. Assim o desgaste do bloco interno e placa externa não limita a resistência da linha.

Portanto, o objetivo é incrementar a cada simulação o desgaste no bloco interno e placa externa até que um deles se torne o ponto mais fraco da corrente e, assim, falhe antes do pino. Em outras palavras, usando a força de tração do IPT, à medida que a área do componente diminui conforme se tem o desgaste, sua tensão aumenta. No qual se a tensão equivalente de von-Mises for maior que a tensão limite obtida pelo IPT, o componente irá falhar.

Como resultado, ao usar a força de tração da condição 5 e reduzir a espessura dos componentes do elo a cada simulação, o bloco interno se torna o ponto mais fraco do conjunto na espessura de 88 mm.

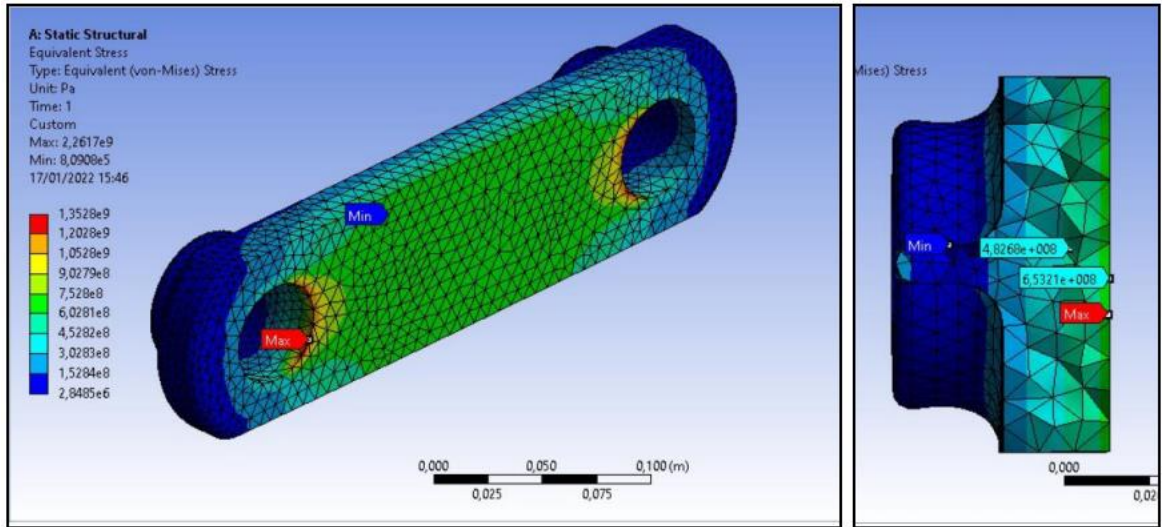
Conforme pode ser observado na Figura 24, a tensão equivalente de von-Mises (1811,3 MPa) no bloco interno excede o limite de tensão de ruptura do IPT, assim, o limite de desgaste do elo é de 88 mm. Embora a placa externa possua a mesma espessura, representado na Figura 25, sua tensão equivalente de von-Mises (1322,8 MPa) não excede o limite de tensão.

Figura 24 - BLOCO INTERNO: Força = 1859,8 kN e Espessura = 88 mm



Fonte: Relatório técnico empresa estudada, 2022

Figura 25 - PLACA EXTERNA: Força = 1859,8 kN e Espessura = 88 mm



Fonte: Relatório técnico empresa estudada, 2022

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões do Trabalho

O presente trabalho apresentou um estudo de caso que, por meio da aplicação das definições de confiabilidade foi capaz de confrontar a vida útil das correntes do difusor já definidas preventivamente, permitindo assim uma redução de custos relevante para a instituição. Isso só foi possível devido a conversão dessa atividade que era preventiva, ou seja, baseada em intervalos estabelecidos pelo fabricante para preditiva, fundamentada em sua condição.

A operação de troca das correntes baseada em sua condição gerou efeitos relevantes não só para a unidade estudada, mas para todas as demais. Isso se deve aos resultados significativos acerca da economia gerada, uma vez que se destacou:

- O bloco interno irá falhar antes do pino, ou seja, se torna o componente do elo menos resistente aos carregamentos aplicados, com valores de desgaste próximos a 22 mm, sendo 11 mm de cada lado;
- A corrente possui taxa de desgaste média de 1 mm/ano, possuindo assim, 5 anos de vida remanescente para operação até as condições determinadas no item anterior.
- Acerca da taxa de desgaste anual, foi instalado DESLIZATEC nas guias do difusor, onde houve a redução da corrente de operação do acionamento do difusor de 157 A na safra 2020, para 121 A na safra 2021. Esta alteração resulta em menor atrito e, conseqüentemente, menor desgaste das correntes.

Para a manutenção deste equipamento, seguindo a filosofia da Manutenção Centrada em Confiabilidade, foi sugerido a unidade a marcação e implementação de monitoramento anual dos pontos de menor espessura das 12 linhas de corrente, realizando a substituição das linhas mais críticas em pares.

5.2 Limitações do Estudo

O trabalho abrangeu o desgaste real das correntes instaladas no difusor e, assim estimou o limite de desgaste da mesma, onde pode-se verificar a vida útil do elo e seus respectivos componentes.

Dito isso, o estudo se limitou pela não execução das medidas de todos os elos, onde para a manutenção deste equipamento seguindo a filosofia da Manutenção Centrada em Confiabilidade é necessário saber a espessura das mesmas e assim implementar manutenção.

Isso se deve a pequena quantidade disponível de colaboradores para executar essa atividade, já que a maioria estava designada para as atividades da entressafra.

5.3 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros se faz necessário trabalhar as limitações deste estudo e melhorias acerca do planejamento da entressafra, alocando mais colaboradores para as atividades ligadas à confiabilidade.

Há também a oportunidade de realizar um estudo aprofundado quanto a taxa de desgaste anual do equipamento visando a melhoria da mesma. Dessa forma será possível identificar suas causas e criar ações de correção a fim de evitar que aconteçam, melhorando a confiabilidade e disponibilidade do mesmo.

Portanto com o sucesso deste trabalho, o mesmo poderá se estender para todas as unidades da empresa estudada. A partir dessa ação é possível reduzir consideravelmente o custo da manutenção, como também o homem-hora alocado para as unidades que utilizam difusor.

REFERÊNCIAS

- Akrom Produtos Eletrônicos. **Manual de instruções medidor de espessura por ultrassom KR220**, 2019. Brasil. Disponível em: <<http://www.akrom.com.br/manuais/kr220-01-0615.pdf>>. Acesso em: 19 ago. 2022.
- ALVES FILHO, Avelino. **Elementos Finitos–A base da tecnologia CAE**. Saraiva Educação SA, 2013.
- BACKLUND, Fredrik. *Managing the introduction of reliability-centred maintenance, RCM: RCM as a method of working within hydropower organisations*. 2003.
- BASTOS NETO, A. O. Aspectos da Extração de Sacarose da Cana-de-Açúcar por Difusão. **Sertãozinho: Boletim Uni-systems**, 2008.
- BHUSHAN, Bharat. *Modern tribology handbook, two volume set*. CRC press, 2000.
- BIAGI, Luiz Lacerda. **O processo da extração do caldo através da difusão**, 2013. Brasil. Disponível em: <<https://sucroenergetico.revistaopinioes.com.br/revista/detalhes/6-o-processo-da-extracao-do-caldo-atraves-da-difus/>>. Acesso em: 12 jul. 2022.
- BRANCO FILHO, Gil. **A organização, o planejamento eo controle da manutenção**. Ciência Moderna, 2008.
- CASTELLA, Marco César et al. Análise crítica da área de manutenção em uma empresa brasileira de geração de energia elétrica. 2001.
- CASTRO, T. M. O et al. Comparação da Eficiência de Extração da Sacarose da Cana de Açúcar Entre a Moenda e o Difusor. 2018.
- DESHPANDE, V. S.; MODAK, J. P. *Application of RCM to a medium scale industry*. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 77, n. 1, p. 31-43, 2002.
- DHILLON, Balbir S. *Maintainability, maintenance, and reliability for engineers*. CRC press, 2006.
- DOHI, T. et al. *Optimizing the repair-time limit replacement schedule with discounting and imperfect repair*. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, 2001.
- FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Aurélio século XXI: o dicionário da língua portuguesa**. In: Aurélio século XXI: o dicionário da língua portuguesa. 1999.
- FOGLIATO, Flávio; RIBEIRO, José Luís Duarte. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Elsevier Brasil, 2009.
- GARZA, Luis. *A case study of the application of reliability centered maintenance (RCM) in the acquisition of the advanced amphibious assault vehicle (AAAV)*. NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA, 2002.

- GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. Editora Atlas SA, 2008.
- GONZALES, Katia Guerchi Katia Guerchi; NEVES, Tatiani Garcia; DOS SANTOS, Cintia Melo. Abordagens metodológicas de pesquisa: algumas notas. **Revista de Ensino, Educação e Ciências Humanas**, v. 19, n. 2, 2018.
- GUIMARÃES, Leonardo Miranda; NOGUEIRA, Cássio Ferreira; DA SILVA, Margarete Diniz Brás. Manutenção industrial: implementação da manutenção produtiva total (TPM). **e-xacta**, v. 5, n. 1, 2012.
- HUTCHINGS, Ian; SHIPWAY, Philip. ***Tribology: friction and wear of engineering materials***. Butterworth-Heinemann, 2017.
- KARDEC, Allan; NASCIF, Júlio. **Manutenção-função estratégica**. Qualitymark Editora Ltda, 2009.
- LEVERETTE, J. C. *An Introduction to the US Naval Air System Command RCM Process and Integrated Reliability Centered Maintenance Software*. **The Reliability Centred Maintenance Managers**, 2006.
- MOUBRAY, John. ***Reliability-centered maintenance***. Industrial Press Inc., 2001.
- NBR, A. B. N. T. 5462-TB116: Confiabilidade e manutenibilidade. **Rio de Janeiro**, 1994.
- NEPOMUCENO, Lauro Xavier. **Técnicas de manutenção preditiva-vol. 1**. Editora Blucher, 2014.
- NICOLETTI, Renato Silva; PRESOTO, Adilson Eduardo. Equacionamento do método dos elementos finitos através da álgebra linear e suas aplicações na análise estrutural. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, v. 5, n. 3, 2018.
- PAYNE, John Howard. **Operações unitárias na Produção de Açúcar**. NBL Editora, 1989.
- PINTO, Renzo Guedes e LIMA, Carlos Roberto Camello. Reflexões sobre a integração do rcm em um ambiente de tpm. **XIII Simpósio de Engenharia de Produção**, 2006.
- RIBEIRO, Fernanda; SILVA, Armando Malheiro da. A avaliação de informação: uma operação metodológica. **Páginas a&b**, n. 14, 2004.
- RIBEIRO, Paulo Roberto. A usina de açúcar e sua automação. **Smar Equipamentos Industriais Ltda**, 2003.
- ROCHA, Marcos Antônio de Carvalho et al. Análise das propriedades Mecânicas do aço SAE 4140 com estrutura bifásica. 2004.
- SANTOS, Wagner Baracho dos; MOTTA, Sergio Brandão da; COLOSIMO, Enrico Antonio. Tempo ótimo entre manutenções preventivas para sistemas sujeitos a mais de um tipo de evento aleatório. **Gestão & Produção**, v. 14, 2007.

SILVA, Edna Lucia da; MENEZES, Estera Muszkat. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. **UFSC, Florianópolis**, 4a. edição, v. 123, 2005.

SINCLAIR, Alastair J.; BLACKWELL, Garston H. *Applied mineral inventory estimation*. Cambridge University Press, 2006.

SIQUEIRA, Iony Patriota. **Manutenção centrada na confiabilidade: manual de implementação**. Qualitymark, 2005.

TAVARES, Lourival Augusto; SILVA FILHO, Aristides A. A Manutenção como uma Atividade Corporativa. In: **15º Congresso Brasileiro de Mnautenção**. 2000.

USHIMA, A. K. et al. Conservação de energia na indústria do açúcar e do álcool. **São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas**, 1990.

VIANA, Herbert Ricardo Garcia. **PCM-Planejamento e Controle da manutenção**. Qualitymark Editora Ltda, 2002.

VIEIRA, Welington Hilário et al. Modelagem numérica de estruturas de concreto com variação de temperatura. 2018.

WANG, Cheng-Hua; HWANG, Sheue-Ling. *A stochastic maintenance management model with recovery factor*. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, 2004.

WOMACK, James P. **A máquina que mudou o mundo**. Gulf Professional Publishing,