

Universidade Federal de São Carlos
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

**ANÁLISE DE RISCO NO PROJETO DE SUBSTITUIÇÃO DE FILTRO EM
UMA USINA SUCROENERGÉTICA UTILIZANDO A METODOLOGIA DA
MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE (MCC)**

Vinicius Rodrigues Credendio



São Carlos - SP – 2022

Vinicius Rodrigues Credendio

**ANÁLISE DE RISCO NO PROJETO DE SUBSTITUIÇÃO DE FILTRO EM
UMA USINA SUCROENERGÉTICA UTILIZANDO A METODOLOGIA DA
MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE (MCC)**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki

São Carlos - SP – 2022



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEMec/CCET

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905

Telefone: (16) 33519703 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 41/2022/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

VINICIUS RODRIGUES CREDENDIO

ANÁLISE DE RISCO NO PROJETO DE SUBSTITUIÇÃO DE FILTRO EM UMA USINA SUCROENERGÉTICA UTILIZANDO A METODOLOGIA DA MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE (MCC)

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 14 de dezembro de 2022

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Sidney Bruce Shiki
Membro da Banca 1	Vitor Ramos Franco
Membro da Banca 2	Gustavo Franco Barbosa



Documento assinado eletronicamente por **Sidney Bruce Shiki, Docente**, em 14/12/2022, às 11:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vitor Ramos Franco, Docente**, em 14/12/2022, às 11:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Franco Barbosa, Professor(a) do Magistério Superior**, em 14/12/2022, às 11:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **0894853** e o código CRC **7EDEA804**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.042497/2022-95

SEI nº 0894853

Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Folha Aprovação, versão de 02/Agosto/2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pelas oportunidades concedidas nesta trajetória de vida e pela força para cada passo.

Dedico também aos meus pais por serem os pilares da construção da minha pessoa e estarem ao meu lado a todo momento com dedicação, carinho e amor.

A todos professores que contribuíram para meu aprendizado e minha formação, em especial, ao meu orientador, Bruce, por me nortear neste trabalho.

E por fim, à todas amizades que colhi nesses anos e forneceram todo o suporte para seguir em frente.

RESUMO

A evolução da engenharia e da manutenção transformou o cenário industrial exigindo cada vez mais das organizações uma maior qualidade e capacidade produtiva. Neste contexto, a disponibilidade dos ativos torna-se ponto estratégico para manter a permanência da companhia no mercado, intimamente ligada aos riscos associados aos equipamentos em operação. A manutenção centrada em confiabilidade (MCC) é uma metodologia que tem como objetivo a garantia da confiabilidade e segurança de tais equipamentos. Sendo assim, este trabalho propõe seguir os conceitos e implementar este método a fim de avaliar os riscos associados à substituição de filtros rotativos por modelos do tipo prensa no setor de fabricação de açúcar em uma usina sucroenergética. Pôde-se constatar que a análise de risco, associada à metodologia do MCC, foi eficaz no tratamento dos desvios encontrados no projeto ao identificar 637 riscos potenciais, sendo cerca de 20% com alto grau de severidade. Além disso, 50 melhorias foram identificadas e aprovadas para todos os sistemas e assim, alcançando uma maior confiabilidade dos equipamentos envolvidos, tornando a substituição dos filtros mais segura e eficiente.

Palavras-chaves: MCC; Confiabilidade; Manutenção; Risco; Filtro

ABSTRACT

The evolution of engineering and maintenance has transformed the industry, requiring greater quality and productive capacity from organizations. In this context, the availability of the assets, associated to the operational and equipments risks, becomes a strategic point to maintain the company's permanence in the market. Reliability centered maintenance (MCC) is a methodology that focuses on ensuring the safety and realibility of those equipments. Therefore, this work proposes on following the concepts of MCC and implementing this method to evaluate the risks associated with the replacement of rotary filters by press models in the sugar manufacturing sector. In the addition to identifying the project risks, it was observed that MCC was effective in the treatment of deviations found in the project and in suggesting improvements, achieving greater realibility of the assets. It was observed that the risk analysis, associated with the MCC methodology, was effective in the treatment of the deviations found in the project by identifying 637 risks, being about 20% with a high degree of severity. In addition, 50 improvements were identified and approved for all systems and thus achieving greater reliability of the assets involved, making the replacement of filter safer and more efficient.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Expectativas da manutenção durante gerações.....	17
Figura 2 - Evolução da manutenção	18
Figura 3 - Definição de Fronteiras	20
Figura 4 - Padrão de desempenho	22
Figura 5 - Funcionamento de um filtro rotativo à vácuo.....	25
Figura 6 - Funcionamento de um filtro prensa	26
Figura 7 - Classificação de risco.....	29
Figura 8 - Classificação de probabilidades de risco.....	29
Figura 9 - Sequência de execução da análise de risco	30
Figura 10 - Primeira revisão do sistema de lodo.....	31
Figura 11 - Segunda revisão dos sistemas.....	31
Figura 12 - Terceira revisão dos sistemas.....	32
Figura 13 - Risco de colisão	37
Figura 14 - Realocação de válvulas.....	38
Figura 15 - Melhorias no decantador	39

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Relação por tipo de riscos.....	35
Gráfico 2 – Relação por tipo de severidade.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise MCC para sistemas	34
Tabela 2 - Relação do tipo de risco envolvido	35
Tabela 3 - Relação das categorias de risco.....	36
Tabela 4 - Relação de melhorias para o projeto	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MCC: Manutenção Centrada em Confiabilidade

FMEA: *Failure Modes and Effects Analysis*

DFMA: *Design for Manufacture and Assembly*

RCFA: *Root Cause Failure Analysis*

NPR: Número de prioridade de risco

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1. Histórico da Manutenção.....	15
3.2. Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC).....	19
3.2.1 Função e Padrão de Desempenho	20
3.2.2 Falhas Funcionais.....	22
3.2.3 Modos de Falha	22
3.2.4 Efeito de Falha.....	22
3.2.5 Consequência da Falha	23
3.3. Análise de Modo e Efeito de Falha	23
3.4. Análise de risco.....	24
3.5. Sistema de filtração para recuperação de açúcar	24
4. METODOLOGIA	26
4.1. Controle de Informações da Análise de Risco	26
4.2. Definição dos sistemas e suas fronteiras	27
4.3. Execução preliminar da MCC.....	27
4.4. Identificação das funções de riscos	27
4.5. Classificação de Risco	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5.1. Fronteira dos sistemas.....	30
5.2. Resultados da análise.....	33
5.3. Sistema de Filtração	37
5.4. Sistema de Decantação	38

5.5. Pontos de melhoria	39
6. CONCLUSÕES.....	40
REFERÊNCIAS	42
APÊNDICES.....	44

1. INTRODUÇÃO

O cenário econômico atual busca, cada vez mais, uma maior produtividade nos seus processos devido à crescente competitividade do mercado. Do ponto de vista produtivo, isso se traduz em uma maior mecanização e automação dos processos associado ao desenvolvimento de novas tecnologias que entregam uma eficiência superior, tanto da produção como do produto. Tal visão cria uma dependência crescente da continuidade dos processos produtivos que reflete diretamente na preservação da integridade dos ativos físicos.

De acordo com Moubray (1997), além da interrupção dos serviços fornecidos pelo ativo, a falha pode significar uma ameaça à sobrevivência de um indivíduo. Estes são evidenciados, por exemplo, no caso *Chernobyl*, no qual erros humanos nos procedimentos de segurança e a falha do sistema de resfriamento ocasionaram uma das maiores tragédias nucleares da história. A partir disso, é notável a relação entre a continuidade operacional de um ativo e o risco associado à sua falha. Dessa maneira, o mapeamento dos riscos e registro das prováveis falhas se tornam ferramentas essenciais para o planejamento e controle da manutenção. De acordo com a norma ISO 31000, os efeitos causados pelas incertezas sobre os objetivos de uma organização, sejam por fatores internos ou externos, são conhecidos como riscos. Para Basson (2019), os riscos estão associados à probabilidade de ocorrências de vulnerabilidades, sejam financeiras ou físicas, que podem causar danos, lesões, ameaças ou perda de responsabilidade.

Uma estratégia de manutenção que vem sendo difundida nos últimos anos é a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) que tem por objetivo a preservação e confiabilidade dos ativos físicos de uma planta. Neste contexto, Moubray (1997) defende que a manutenção pode ser desenvolvida substancialmente ao abordar, de forma crítica e metódica, os conceitos de funções, os sistemas de proteção dos ativos e também à busca das falhas, com o objetivo de reduzir a ocorrência das falhas.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é avaliar a implementação da sistemática da metodologia da MCC para a realização de uma análise de risco de um projeto envolvendo a substituição de filtros rotativos por modelos prensa no setor de fabricação de açúcar de uma usina sucroenergética. O foco é identificar e categorizar os riscos associados à substituição desses filtros, avaliando o arranjo dos sistemas e equipamentos envolvidos para garantir que o projeto entregue uma planta com integridade operacional, alta confiabilidade e elevada segurança para com os colaboradores. Assim, os objetivos específicos a serem abordados são:

- Aplicação da metodologia MCC
- Identificação dos riscos presentes no projeto
- Identificação de falhas de projeto
- Avaliação da disposição da infraestrutura e dos equipamentos
- Identificação de possibilidades de melhorias no projeto

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção é apresentada um histórico de evolução da manutenção e a mudança na visão dos ativos além de toda fundamentação teórica sobre a manutenção centrada em confiabilidade e classificação de risco.

3.1. Histórico da Manutenção

Tavares (1999) apresenta a manutenção como um setor que acompanha a evolução do homem no meio industrial. Em meados dos anos 30, em decorrência dos primeiros passos da mecanização dos processos, a necessidade da realização de reparos se tornou uma pauta relevante nas fábricas. Nesta fase, a prevenção das falhas não era prioridade, uma vez que os equipamentos possuíam baixa complexidade e eram superdimensionados, tornando os reparos mais simples. Esta é conhecida como a primeira geração da manutenção que tinha por fundamento a execução de reparos, sendo conhecida nos dias de hoje como manutenção corretiva.

Os eventos da Segunda Guerra Mundial provocaram uma crescente mecanização industrial devido ao aumento da demanda de produção com uma menor força de trabalho. A segunda geração, trouxe a ideia de que falhas poderiam e

deveriam ser prevenidas, desenvolvendo o conceito de manutenção preventiva, a qual estabelece intervenções nos ativos em períodos pré-determinados. Além disso, com os custos de manutenção se elevando, a criação de sistemas de planejamento e controle de manutenção se tornou essencial para sustentar tais práticas (KARDEC e NASCIF, 2009).

A terceira geração se encaixa no meio de diversas mudanças da indústria. Nos setores de manufatura, os novos modelos baseados no “*just-in-time*”, amplificaram os efeitos de paralisações devido ao conceito de estoques reduzidos: pequenas pausas no fornecimento de produtos poderiam provocar uma paralisação total da indústria. Essa preocupação se demonstrou cada vez maior dentro das organizações criando novas expectativas da manutenção industrial tornando conceitos de confiabilidade e disponibilidade dos ativos como pontos focais da manutenção. Com isso, novas técnicas de manutenção e metodologias foram desenvolvidas como por exemplo, metodologias de decisão como FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) que define uma sistemática para análise e ocorrência de falhas, design com foco em manufatura e montagem, também conhecida por DFMA (*Design for Manufacturing and Assembly*) e monitoramento de condições conhecida como manutenção preditiva (MOUBRAY, 1997).

Por fim, a quarta geração é uma extensão evolutiva da terceira geração que se dá em meados dos anos 2000. Os conceitos de monitoramento dos ativos e análises de falha são cada vez mais utilizados tendo como prioridade a minimização dos riscos, consolidando assim, três pilares para as atividades de engenharia de manutenção: confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade (KARDEC e NASCIF, 2009). Para Basson (2019), a quarta geração traz a mesma visão de mudança das gerações passadas em uma velocidade exponencialmente maior, sistematizada e conectada, nos conduzindo para uma maior produtividade, qualidade, confiabilidade e segurança. Além disso, apresenta uma visão orientada à possibilidade da regulamentação de ativos críticos por meio da legislação, tornando o gerenciamento de riscos um ponto de extrema importância para as organizações. As expectativas da manutenção citadas são apresentadas pela Figura 1.

Figura 2 - Evolução da manutenção

EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO				
	Primeira Geração	Segunda Geração	Terceira Geração	Quarta Geração
Ano				
Aumento das expectativas em relação à Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • Conserto após a falha 	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidade crescente • Maior vida útil do equipamento 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior confiabilidade • Maior disponibilidade • Melhor relação custo-benefício • Preservação do meio ambiente 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior confiabilidade • Maior disponibilidade • Preservação do meio ambiente • Segurança • Influir nos resultados do negócio • Gerenciar os ativos
Visão quanto à falha do equipamento	<ul style="list-style-type: none"> • Todos os equipamentos se desgastam com a idade e, por isso, falham 	<ul style="list-style-type: none"> • Todos os equipamentos se comportam de acordo com a curva da banheira 	<ul style="list-style-type: none"> • Existência de 6 padrões de falhas (Nowlan & Heap e Moubray) Ver Capítulo 5 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzir drasticamente falhas prematuras dos padrões A e F (Nowlan & Heap e Moubray) Ver Capítulo 5
Mudança nas técnicas de Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • Habilidades voltadas para o reparo 	<ul style="list-style-type: none"> • Planejamento manual da manutenção • Computadores grandes e lentos • Manutenção Preventiva (por tempo) 	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoramento da condição • Manutenção Preditiva • Análise de risco • Computadores pequenos e rápidos • Softwares potentes • Grupos de trabalho multidisciplinares • Projetos voltados para a confiabilidade • Contratação por mão de obra e serviços 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento da Manutenção Preditiva e Monitoramento da Condição • Minimização nas Manutenções Preventiva e Corretiva não Planejada • Análise de Falhas • Técnicas de confiabilidade • Manutenibilidade • Engenharia de Manutenção • Projetos voltados para confiabilidade, manutenibilidade e Custo do Ciclo de Vida. • Contratação por resultados

Fonte: (KARDEC e NASCIF, 2009).

3.2. Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC)

A Manutenção Centrada em Confiabilidade é, de acordo com Moubray (1997), uma metodologia sistemática que, quando aplicada à um equipamento ou a um sistema qualquer, torna-se uma ferramenta determinante para a definição de requisitos operacionais e da manutenção (MOUBRAY, 1997).

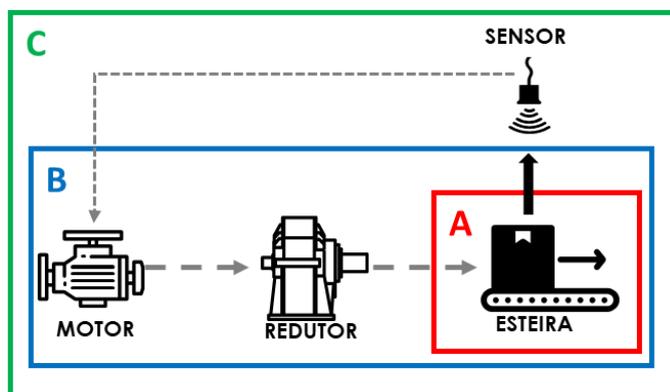
De acordo com Moss (1985), as teorias de confiabilidade começaram a se difundir na época de 1950 dentro da indústria militar na forma de requisitos específicos para desenvolvimento de sistemas de mísseis. Inicialmente, a visão disseminada sobre confiabilidade era relativa à taxa de sucesso de um componente. Os primeiros sinais do desenvolvimento de um conceito de confiabilidade surgiram, ainda segundo Moss (1985), a partir de um projeto de míssil alemão durante a Segunda Guerra Mundial que apresentou explosão prematura durante o voo e baixa precisão. Durante as análises de causa raiz, foi identificado que as falhas eram causadas por mais de um componente, porém esses mesmos componentes não falhavam, necessariamente, ao mesmo tempo. Isso alimentou a ideia de que as causas das falhas não poderiam ser reduzidas à uma única causa raiz, mas à uma consequência das falhas de todo o conjunto que compõem o sistema. Dessa maneira a definição das fronteiras do objeto de estudo é uma etapa essencial para aplicação do MCC de forma efetiva uma vez que, assim identificados, todos os componentes que fazem parte do sistema podem ser classificados e separados de acordo com sua criticidade dentro da operação do conjunto. Na Figura 3, é apresentado um modelo simplificado de como a definição das fronteiras de um sistema pode impactar em uma análise de uma esteira:

- Na fronteira A, os limites definidos são mínimos. Ao olhar somente para a esteira perde-se informação dos demais componentes que são críticos para o funcionamento da esteira. Caso o motor elétrico ou o redutor falhem, a esteira também falha, porém nessa delimitação, não é possível enxergá-los.

- Na fronteira B, o cenário é ampliado, porém não é o ideal. O sensor responsável pelo controle de velocidade da esteira não é contemplado na fronteira. A esteira pode estar em falha com o motor e o redutor sem apresentar desvios, mas se sensor não está calibrado, a esteira não opera.

- Na fronteira C, atinge-se o ideal. Todos os sistemas críticos para o funcionamento da esteira estão mapeados e bem definidos.

Figura 3 - Definição de Fronteiras



Fonte: Autoria própria

A partir da definição das fronteiras, o MCC passa a se basear em 7 perguntas:

1. Quais as funções e a os padrões de performance do ativo?
2. De que maneira o equipamento falha em desempenhar sua função?
3. Qual a causa desta falha funcional?
4. O que acontece quando ocorre a falha funcional?
5. Quais as consequências destas falhas?
6. O que pode ser realizado para prevenção da falha?
7. O que deve ser realizado caso não exista uma tarefa proativa para mitigar

o problema

Estas perguntas serão melhor detalhadas nas seções a seguir.

3.2.1 Função e Padrão de Desempenho

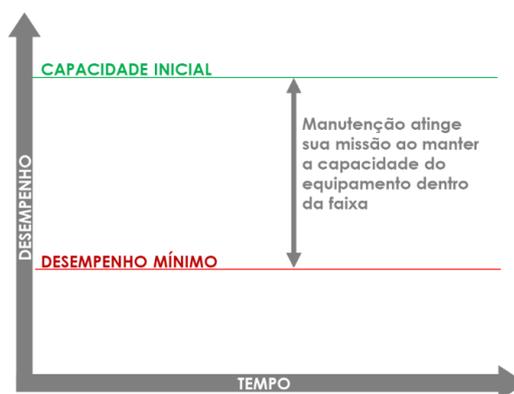
A primeira etapa do MCC é definir as funções do seu ativo e quais são seus padrões de desempenho. Nesta fase, tem-se as funções primárias e secundárias. As funções primárias são aquelas que levam à razão do ativo ser adquirido, as quais definem o equipamento. Por exemplo, a esteira da Figura 3 tem por função primária, o transporte de carga de um ponto A para o ponto B a uma determinada velocidade. Além disso, podemos apontar suas funções secundárias, que são complementares e apesar de não serem tão nítidas quanto as funções primárias elas podem possuir um

impacto direto nas funcionalidades do ativo. Para facilitar a observação destas funções, o MCC as divide em 7 categorias:

- Integridade ambiental: influenciam diretamente no ambiente, com possibilidade de promover impactos ou desastres ambientais
- Segurança e integridade estrutural: relativos à segurança de operadores e da infraestrutura
- Controle, contenção e conforto: contemplam indicadores do processo (rotação, velocidade, temperatura), contenção de substâncias e fluidos e características de ergonomia
- Aspecto Externo: pinturas anticorrosivas e cores chamativas que auxiliam a visibilidade
- Economia e eficiência: características que impactam no custo de funcionamento, disponibilidade e uso consciente de recursos
- Proteção : dispositivos de proteção e alarmes
- Supérfluos: componentes que não possuem impacto significativo. Geralmente, tornam-se obsoletos por modificações e melhorias no sistema.

Os padrões de desempenho são peças fundamentais na MCC. São eles que servirão como base para identificar as falhas funcionais. Inicialmente, o ativo possui uma capacidade de trabalho e durante sua vida, por deterioração natural dos seus componentes, o desempenho é reduzido até um limite , sendo este a performance mínima desejada definida pelo usuário. A missão da manutenção é manter a capacidade operacional dentro de uma faixa para qual o ativo foi designado. A referência de padrão de performance de um equipamento qualquer é ilustrada pela Figura 4.

Figura 4 - Padrão de desempenho



Fonte: Adaptado de MOUBRAY (1997)

3.2.2 Falhas Funcionais

Definido um padrão de desempenho, quando um ativo qualquer não realiza sua função ou opera abaixo do padrão estabelecido, estabelece que tal ativo está sob falha funcional. Ao dizer que a função da esteira da Figura 4, por exemplo, seja transportar caixas de chocolate a uma velocidade entre 2 a 4 metros por segundo. Caso a esteira se rompa e pare de funcionar, transporte abaixo de 2 ou acima de 4 metros por segundo, tem-se que esta esteira está em falha pois desempenha fora da faixa para qual foi designada.

3.2.3 Modos de Falha

Os modos de falha são quaisquer eventos que ocasionem uma falha funcional. Ainda no exemplo da esteira, tanto o rompimento da lona da esteira que ocasionaria a parada do transporte das caixas de chocolate como a quebra do acoplamento entre motor e redutor são exemplos de modos de falhas. A descrição correta dos modos de falhas pode ajudar a entender como a falha ocorre e quais ações são necessárias para corrigir o problema. Comumente, a Análise de Modo e Efeito de Falha, mais conhecido por FMEA (do inglês, *Failure Mode and Effect Analysis*) é uma das ferramentas mais utilizadas para a identificação dos modos de falha.

3.2.4 Efeito de Falha

O acontecimento resultante do modo de falha é o efeito de falha. Ela pode ser entendida facilmente como a resposta para “O quê” acontece quando seu ativo não

desempenha sua função, diferentemente da consequência de falha, que avalia como a falha importa no contexto da operação do seu equipamento.

3.2.5 Consequência da Falha

Como dito anteriormente, a consequência da falha trata de responder de que maneira a falha importa para o seu processo. Aumento na utilização de matéria prima ou consumo de energia, diminuição na qualidade do produto ou aumento no risco de causar acidente são alguns exemplos que se encaixam dentro da consequência. Tanto a natureza e gravidade desses efeitos serão avaliadas para a correta priorização e destinação de recursos a fim de criar um plano de ação. Se sua falha é capaz de gerar uma ameaça à vida de alguém esforços consideráveis serão alocados para a prevenção. Por outro lado, se sua falha tem consequências insignificantes, não seria necessário a criação de um plano para correção e a falha simplesmente é permitida a ocorrer sem que haja impacto negativo.

3.3. Análise de Modo e Efeito de Falha

A Análise de Modo e Efeito de Falha, é datada da época de 1960. Inicialmente, de acordo com Mikulak, Mcdermott e Beauregard (2008), a atenção da metodologia era voltada à segurança na indústria e hoje, seu objetivo se mantém na prevenção de acidentes.

De acordo com Kardec e Nascif (2009) a análise de modos e efeitos de falha “é uma abordagem que ajuda a identificar e priorizar falhas potenciais em equipamentos, sistemas e processos.” Sua aplicação serve de base para o desenvolvimento de técnicas como Análise das Causas-Raízes da Falha – RCFA ou *Root Cause Failure Analysis*. A metodologia FMEA é uma das principais ferramentas para prevenção de problemas e identificação de soluções considerando seu baixo custo e alta eficiência (SOUZA e ÁLVARES, 2007).

Para avaliação e classificação dos modos de falhas, se faz o uso do número de prioridade de risco (NPR) que relaciona severidade do efeito da falha em potencial, sua ocorrência ou probabilidade e a forma detecção da falha. Em muitos casos a detecção se torna uma variável difícil de mensurar. Nesse caso pode-se utilizar o NPR simplificado:

$$\text{NPR} = \text{Severidade} * \text{Probabilidade} \quad (1)$$

O NPR serve de referência para priorização das falhas mais críticas identificadas, sendo um parâmetro essencial na tomada de decisão para tratamento dos desvios.

Comumente, o diagrama de Ishikawa, conhecido também como espinha de peixe é uma ferramenta utilizada para auxiliar a identificação dos possíveis problemas.

3.4. Análise de risco

A análise de risco, foco deste estudo, visa estudar os principais desvios que podem afetar o padrão de desempenho de um sistema, equipamento ou que ameace a integridade de um indivíduo. Além disso, uma correta análise colabora para a mitigação de danos ou até mesmo sua prevenção.

Araújo (2018) desenvolve uma análise de risco, com base na metodologia FMEA, aplicado aos componentes de proteção de transformadores de alta potência e demonstra como uma sistemática de identificação de mapeamento de riscos e falhas pode ser útil no direcionamento da manutenção dos equipamentos, na criação de planos preventivos e no desenvolvimento de novos projetos. Para o gerenciamento de riscos em barragens de hidrelétricas, Mendes (2016) estrutura uma análise com base no FMEA para avaliar os impactos nas tomadas de decisão para mitigação de riscos e valida que, a aplicação de técnicas de análise de risco não somente permitem uma redução na subjetividade das decisões, mas também criam um maior senso de conhecimento técnico das estruturas, permitindo um maior controle do gerenciamento das falhas, uma vez que esses estão mapeados e definidos.

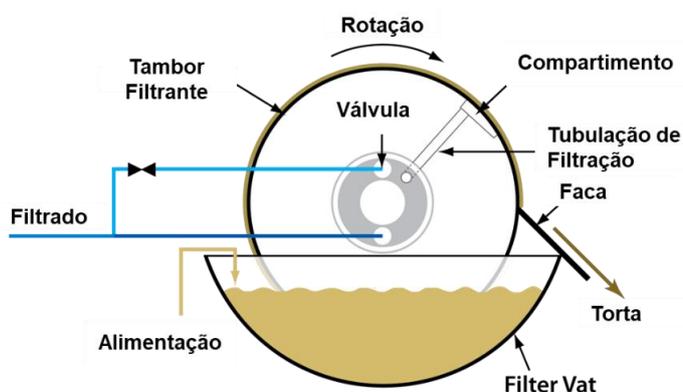
3.5. Sistema de filtração para recuperação de açúcar

Para se produzir o açúcar, é necessário um longo processo de produção. Inicialmente, a cana proveniente da colheita passa por um processo de lavagem. Posteriormente, ela é picada e desfibrada para que, durante a moagem, seja possível extrair o máximo de caldo da cana. Este caldo, denominado caldo misto, possui terra, areia e particulados de cana na sua composição e, por este motivo, ele é transferido

à uma peneira rotativa para separar tais impurezas. Logo, é levado para ser tratado. Uma etapa do processo é a decantação: o caldo é misturado com material flocculante para realizar a separação das impurezas, formando o lodo. Devido à característica natural do processo de decantação, é comum que uma parte de açúcar seja levado juntamente com o lodo, o que diminui a eficiência de produção. Dessa forma, é necessário realizar a recuperação deste açúcar que se dá pelo uso dos filtros.

O processo de filtração pode ser feito de diversas maneiras. O filtro rotativo à vácuo, equipamento a ser substituído neste projeto, possui um tambor dotado de uma malha filtrante em sua superfície que realizará a separação do sólido-líquido. O sistema é alimentado com o material e o tambor é parcialmente imerso enquanto realiza um movimento de rotação. A partir da produção de vácuo no interior do tambor, o líquido contido no material é extraído enquanto a parte sólida permanece na superfície do tambor, sendo denominada torta. A torta é transportada para lavoura como adubo e o caldo filtrado é retornado para o processo. O funcionamento é demonstrado pela Figura 5.

Figura 5 - Funcionamento de um filtro rotativo à vácuo

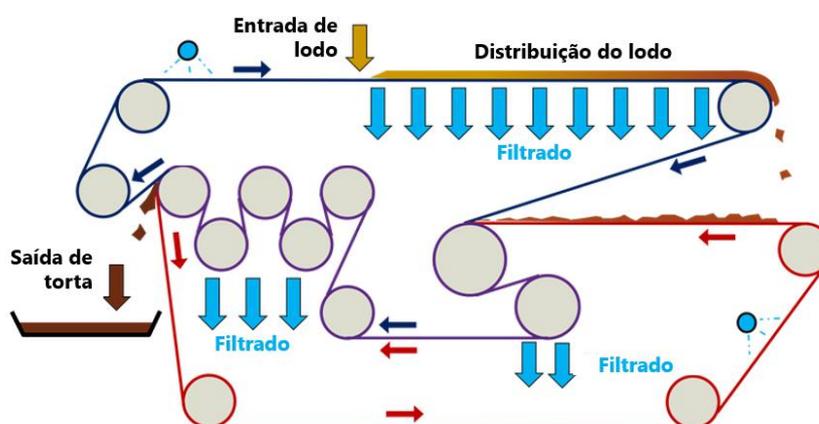


Fonte: Página oficial de Komline-Sanderson (<https://www.komline.com>)

Já na Figura 6, é possível ver o esquema de funcionamento de um filtro do tipo prensa, modelo que substituirá os filtros rotativos. O filtro é alimentado com lodo proveniente da decantação de caldo e um tambor distribui o lodo pela lona para ser embebido de água, com objetivo de dissolver o açúcar e aumentar a eficiência da

recuperação. No primeiro estágio a filtração é feita por ação da gravidade dando origem ao filtrado de embebição. Depois, é feita uma prensagem à baixa pressão e posteriormente, à alta pressão. O caldo filtrado extraído deste processo é retornado para o setor de produção de açúcar. Após as etapas de prensagem do lodo, é realizado uma lavagem da tela para desobstrução dos orifícios e retirada de elementos sólidos que possam prejudicar o ciclo de filtração.

Figura 6 - Funcionamento de um filtro prensa



Fonte: Adaptado de SLUDGEPROCESSING (<https://www.sludgeprocessing.com>)

4. METODOLOGIA

Nesta seção será apresentada as técnicas que compõem a metodologia deste trabalho bem como o modelo de registro e acompanhamento dos riscos.

4.1. Controle de Informações da Análise de Risco

As informações provenientes das discussões são elementos chave para o planejamento de um bom projeto. Por isso, é necessário a criação de um registro para acomodar todas informações relevantes do trabalho. Assim, isso, a primeira etapa foi a construção de uma planilha de controle contendo:

- Cronograma do projeto: definindo um período estimado para aplicação da análise em cada sistema;
- Análise de risco detalhada seguindo as diretrizes da metodologia MCC
- Critérios da classificação de risco;

- Organização dos sistemas envolvidos que se comunicam com o sistema de filtração a ser remodelado;
- Reunião de desvios de projeto a serem corrigidos;
- Relatório contendo a quantidade de funções e o número de falhas funcionais identificadas;

Para melhor visualização, a estrutura definida para aplicação do MCC durante a execução das análises é apresentada pelo Apêndice A.

4.2. Definição dos sistemas e suas fronteiras

Por se tratar de um sistema complexo, foi fundamental estabelecer as fronteiras. Como apresentado no item 3.4, a correta definição do tamanho dos sistemas tem grande influência na identificação de funções, falhas e modos de falha e principalmente nas estratégias de manutenção. Seguindo este conceito, a partir do mapa de comunicação dos ativos do processo e desenhos técnicos de projeto e dos equipamentos, foi realizado a divisão em 11 sistemas menores levando em consideração os diferentes conjuntos de equipamentos. Para se chegar a este resultado, foram examinados a comunicação entre motores, bombas, filtros, tanques, válvulas e principalmente, os fluidos transportados, sendo este o principal fator para delimitar as fronteiras de maneira mais precisa.

4.3. Execução preliminar da MCC

Com os sistemas bem definidos, a etapa seguinte foi levantar as funções (primárias e secundárias) e falhas funcionais dos ativos. Para cada um dos onze sistemas identificados, foi executado uma análise preliminar da MCC, identificando os ativos comuns que os sistemas compartilhavam como bombas e tanques. Dessa maneira, foi possível realizar um levantamento mais rápido das funções para depois serem adaptadas aos seus sistemas correspondentes. Esta etapa preliminar serviu como preparação para a realização das reuniões de projeto.

4.4. Identificação das funções de riscos

As reuniões foram elementos chaves para a análise do projeto sendo composta por mecânicos, engenheiros, líderes de processo, operadores e técnicos de

segurança. Como estímulo à identificação de falhas e pontos de melhorias, fluxogramas de processo e desenhos técnicos do projeto eram disponibilizados à equipe para facilitar a visualização e identificação dos desvios. Nesta etapa, a experiência dos operadores e o conhecimento sobre as especificações dos ativos e níveis de desempenho foram fundamentais para a identificação das funções e das falhas funcionais. A planilha de controle com as informações obtidas na etapa preliminar da MCC, apresentada no capítulo 4.3, foi apresentada para o time a fim de validar as funções identificadas previamente e abrir espaço para que novas informações fossem adquiridas.

4.5. Classificação de Risco

A classificação de risco das funções também foi realizada durante as reuniões. O modelo se baseou na classificação de risco da norma ISO 14224, que possui especificações e informações relacionadas à confiabilidade de ativos e gerenciamento de manutenção. Na Figura 7, é apresentada uma adaptação desta classificação que foi utilizada para a rotina do projeto. Nela, é abordada quatro tipos de consequências com quatro níveis de severidade, gerando para cada risco, uma classificação numérica para o cálculo do NPR.

- Segurança: tratará riscos relacionado à integridade física das pessoas envolvidas na operação e manutenção;
- Ambiental: envolvendo riscos com possibilidade de provocar impactos ambientais;
- Produção: riscos que influenciam a produtividade dos sistemas;
- Operacional: riscos que podem provocar aumento nas despesas de manutenção;

Figura 7 - Classificação de risco

	Catastrófica	Severa	Moderada	Menor
	Falha que resulta em morte ou perda no sistema (p.e.>USD 1.000.000)	Severa(o) lesão, doença ou dano no sistema principal (p.e. <USD 1.000.000)	Menor lesão, doença ou dano no sistema (p.e. <USD 250.000)	Inferior à menor lesão, doença ou dano no sistema (p.e. <USD 50.000)
Segurança	11 - Perda de vidas - Sistemas críticos à segurança vital inoperantes	7 - Lesões pessoais graves - Potencial de perda de funções de segurança	5 - Lesões que requerem tratamento médico - Efeito limitado nas funções de segurança	3 - Lesões que não requerem tratamento médico - Efeito menor sobre a função de segurança
Ambiental	11 Acidente ambiental maior	7 Acidente ambiental significativo	5 Algum acidente ambiental	1 Acidente ambiental inexistente ou desprezível
Produção	7 Parada extensa na produção/operação	5 Parada na produção acima do nível aceitável	1 Parada na produção abaixo do nível aceitável ou pequena	
Operacionais	5 Custo do reparo muito alto	3 Custo do reparo acima do normalmente aceitável	1 Custo do reparo abaixo do normalmente aceitável ou baixo	

Fonte: Adaptado de Norma ISO 14224

Na classificação de risco, além da severidade já abordada, a equipe discorria a respeito da probabilidade de ocorrência das falhas levando em consideração o histórico de acidentes em usinas e experiência dos operadores e dessa maneira, era obtido o NPR para cada falha. A Figura 8 apresenta os critérios de probabilidades utilizadas.

Figura 8 - Classificação de probabilidades de risco

	Desprezível	Muito baixa	Baixa	Média	Alta
	Ocorrência de acidente quase impossível ou depende de diversas variáveis	Acidentes ocorridos em empresas de outros setores ou não há registro de sinistros na usina	Acidentes ocorridos em empresas do mesmo setor	Há históricos de acidentes no grupo de até 5 anos	Acidentes ocorreram na última safra ou entressafra
Probabilidade	0	1	2	3	4

Fonte: Autoria própria

Como padrão, a sequência de abordagem utilizada neste trabalho em toda aplicação do MCC é apresentada na Figura 9. As falhas classificadas como catastróficas, severas ou que com NPR maiores do que 10 eram levadas, automaticamente, à análise como pontos críticos do projeto. Esta análise foi criada a fim de filtrar os pontos mais importantes do projeto agilizando o mapeamento de risco.

Figura 9 - Sequência de execução da análise de risco



Fonte: Autoria própria

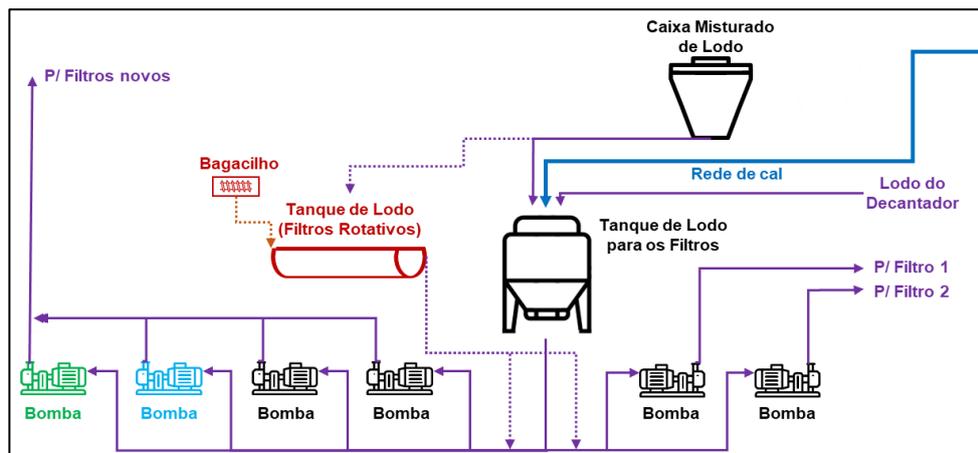
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção será apresentado e discutido os resultados da análise de risco realizada nos sistemas envolvidos no projeto de substituição dos filtros. Os riscos identificados, suas classificações e oportunidades de melhoria serão indicados com mais detalhes.

5.1. Fronteira dos sistemas

No Apêndice B pode ser visto a versão completa das fronteiras do sistema dos sistemas estudados. Devido à complexidade dos conjuntos e às alterações de projeto durante a fase de planejamento, foram necessárias 5 revisões desta etapa para acomodar de forma precisa os ativos que compõem cada sistema. A partir das figuras a seguir é possível notar a variação das fronteiras de alguns sistemas de acordo com o andamento da análise. A Figura 10 apresenta um modelo simplificado do arranjo de diversos ativos que, nesta primeira revisão, representam o “Sistema de Lodo”. No Apêndice C é apresentado o fluxograma real desta região. É possível observar, em roxo, as linhas de transporte de lodo e uma linha azul referente ao transporte de cal. As linhas pontilhadas e ativos, em vermelho, representam as desativações devido sua não utilização com os novos filtros prensa. A bomba verde trata-se de um ativo novo e a azul, um equipamento realocado de outro sistema.

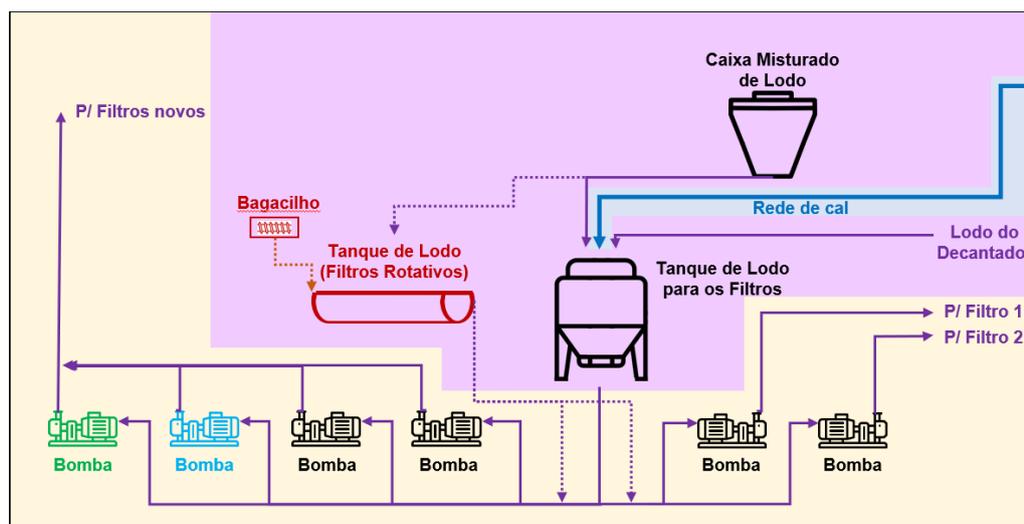
Figura 10 - Primeira revisão do sistema de lodo



Fonte: Autoria própria

Já na Figura 11, a segunda revisão trouxe uma abordagem mais detalhada. O sistema de bombeamento, de acordo com a equipe, por possuir uma comunicação mais direta e, conseqüentemente, um impacto maior nos filtros, deveria fazer parte do sistema de filtração. Dessa maneira, o “Sistema de Lodo” anterior passa a ser “Caixa misturadora de lodo” representado pela região roxa e em amarelo, a fronteira pertencente ao sistema de filtração. Em azul, manteve-se a região pertencente à rede de cal.

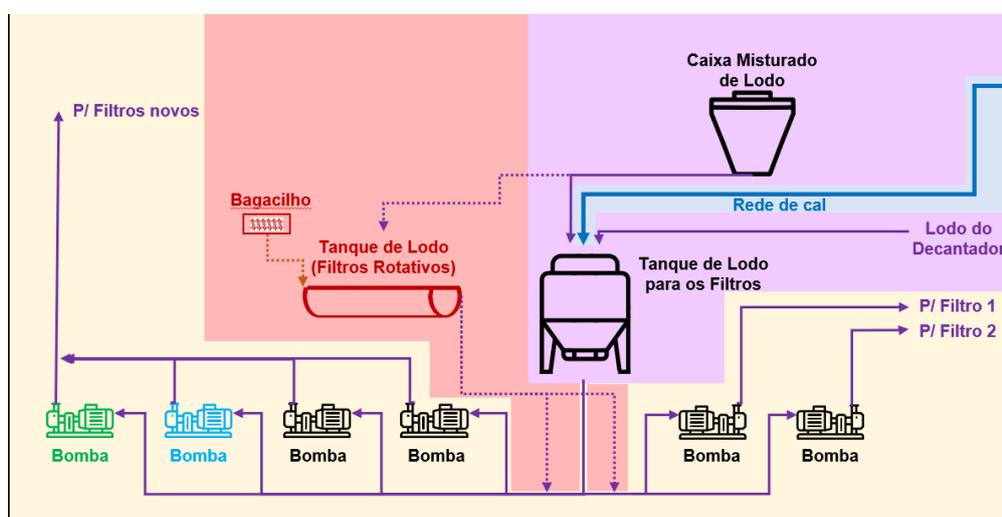
Figura 11 - Segunda revisão dos sistemas



Fonte: Autoria própria

Por fim, para estes sistemas, a terceira revisão foi suficiente para criar um detalhamento adequado para o estudo, sendo apresentado pela Figura 12. O sistema de tanque e bagacilho, que alimentavam os filtros rotativos, foram desconsiderados do sistema e da análise de risco e são representados pela região avermelhada. As fronteiras se tornaram mais bem definidas, acompanhando os ativos pertencentes à cada sistema. Vale ressaltar que as linhas de fluxo foram referência para separação dos sistemas, uma vez que tais linhas representam os fluidos transportados.

Figura 12 - Terceira revisão dos sistemas



Fonte: Autoria própria

Este modelo de definição seguiu para os demais sistemas. Como resultados, ao todo, foram definidos 11 sistemas, sendo eles:

1. Decantação de Caldo
2. Filtração de Torta
3. Armazenagem e Bombeamento de Água Quente para os Filtros
4. Armazenagem e Bombeamento de Caldo Filtrado
5. Armazenagem e Bombeamento de Polímero
6. Preparo e Bombeamento de Leite de Cal
7. Transporte de Torta
8. Controle dos Filtros
9. Armazenamento e Bombeamento de condensado
10. Caixa Misturadora de Lodo e Bombeamento

11. Predial

5.2. Resultados da análise

As reuniões foram um elemento crítico na identificação de funções e oportunidades de melhoria nos projetos. Pela Tabela 1, é possível identificar a relação de funções, falhas funcionais e a porcentagem relativa de falhas críticas para cada sistema obtidas seguindo o modelo do MCC. O maior percentual de falhas crítica se encontra no sistema de bombeamento de cal que contempla falhas que implicam diretamente na continuidade do processo e, majoritariamente, por questões de segurança dos colaboradores envolvidos durante processos de manutenção e no dia a dia.

Nota-se também, o sistema de decantação de caldo e filtração de torta são os que possuem maior número de funções classificadas uma vez que ambos possuem uma alta quantidade de ativos que os compõem. Ainda no sistema de decantação de caldo, é possível verificar que ele é o que possui a menor quantidade de falhas críticas. Isso se deve ao fato de que o projeto do decantador foi desenvolvido em paralelo com o desenvolvimento da análise de risco do MCC, que culminou na identificação de itens a serem reprojitados ainda na fase de planejamento e assim, corrigindo os riscos identificados previamente.

Tabela 1 - Análise MCC para sistemas

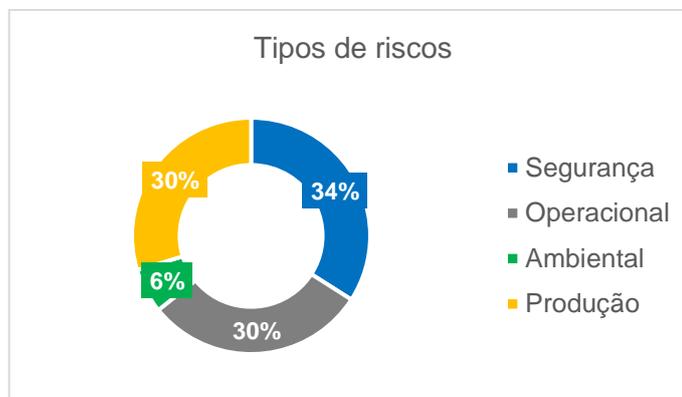
SISTEMA	Funções	Falhas Funcionais	% Falhas Críticas
Sistema de Decantação de Caldo	71	107	5%
Sistema de Filtração de Torta	70	94	12%
Sistema de Armazenagem e Bombeamento de Água Quente para os Filtros	61	90	11%
Sistema de Armazenagem e Bombeamento de Caldo Filtrado	42	61	9%
Sistema de Armazenagem e Bombeamento de Polímero para Filtros Prensa	45	61	11%
Sistema de Preparo e Bombeamento de Leite de Cal	55	73	16%
Sistema de Predial/Civil Filtração de Caldo	28	32	9%
Sistema de Transporte de Torta	29	34	8%
Sistema de Controle Filtros	-	-	0%
Sistema de Armazenamento e Bombeamento de Condensado e Água de Embebição	50	78	11%
Sistema da Caixa Misturadora de Lodo e Bombeamento	28	34	9%
	479	664	100%

Quanto à classificação de risco, na Tabela 2 é apresentado, por sistema, o volume do tipo de consequência. No gráfico 1, é representado a divisão dos riscos de acordo com a classificação estudada. Nota-se a alta quantidade de riscos relacionados à segurança, sendo uma das razões da implementação da análise de risco deste projeto. Um detalhe interessante é o número reduzido de ocorrências de riscos ambientais, sendo facilmente explicado pela presença de bacias de contenção e drenos instalados em posições estratégicas, práticas protetivas já instituídas na planta.

Tabela 2 - Relação do tipo de risco envolvido

SISTEMA	Segurança	Custo de Reparo	Ambiental	Produção
Sistema de Decantação de Caldo	21	8	20	48
Sistema de Filtração de Torta	24	51	5	14
Sistema de Armazenagem e Bombeamento de Água Quente para os Filtros	26	25	6	24
Sistema de Armazenagem e Bombeamento de Caldo Filtrado	29	19	3	10
Sistema de Armazenagem e Bombeamento de Polímero para Filtros Prensa	19	26	0	16
Sistema de Preparo e Bombeamento de Leite de Cal	26	16	0	31
Sistema de Predial/Civil Filtração de Caldo	21	3	0	0
Sistema de Transporte de Torta	14	9	1	10
Sistema de Controle Filtros	0	0	0	0
Sistema de Armazenamento e Bombeamento de Condensado e Água de Embebição	24	18	4	32
Sistema da Caixa Misturadora de Lodo e Bombeamento	13	17	0	4

Gráfico 1 – Relação por tipo de riscos



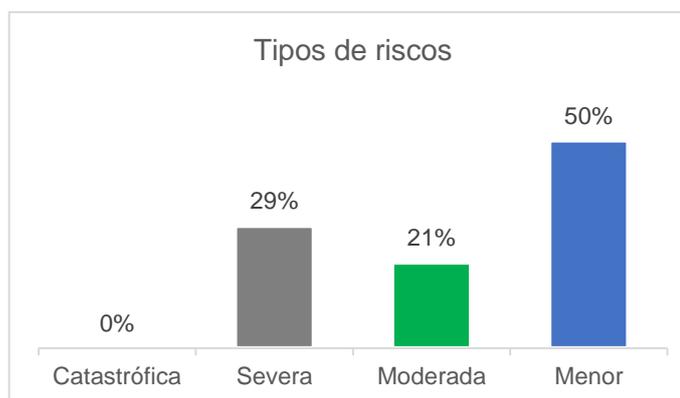
Fonte: Autoria própria

Já a Tabela 3 mostra a quantidade de funções categorizadas pela consequência (Catastrófica, Severa, Moderada ou Menor) para cada sistema apresentado. O resumo do total de severidades é indicado pelo gráfico 2.

Tabela 3 - Relação das categorias de risco

SISTEMA	Catastrófica	Severa	Moderada	Menor
Sistema de Decantação de Caldo	0	7	3	87
Sistema de Filtração de Torta	0	14	23	57
Sistema de Armazenagem e Bombeamento de Água Quente para os Filtros	0	13	29	48
Sistema de Armazenagem e Bombeamento de Caldo Filtrado	0	13	13	35
Sistema de Armazenagem e Bombeamento de Polímero para Filtros Prensa	0	14	16	31
Sistema de Preparo e Bombeamento de Leite de Cal	0	18	13	42
Sistema de Predial/Civil Filtração de Caldo	0	10	11	3
Sistema de Transporte de Torta	0	9	10	15
Sistema de Controle Filtros	0	0	0	0
Sistema de Armazenamento e Bombeamento de Condensado e Água de Embebição	0	15	20	43
Sistema da Caixa Misturadora de Lodo e Bombeamento	0	10	7	17

Gráfico 2 – Relação por tipo de severidade



Fonte: Autoria própria

Verifica-se que 123 funções do sistema foram classificadas como severas, o que levanta a preocupação a respeito do dimensionamento dos sistemas do projeto. Como a premissa de severidade, apresentada no capítulo 4.5, discorre que falhas funcionais classificadas como catastrófica ou severa são levadas para análise posterior independentemente do NPR calculado, assegura-se que tais desvios serão abordados e tratados.

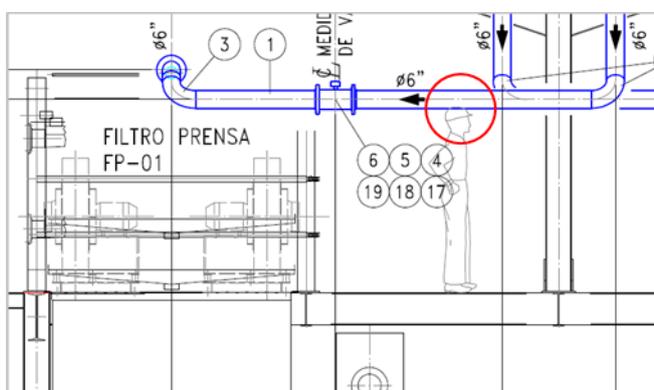
A classificação “menor” é a que apresenta o maior volume de falhas funcionais, entretanto, das 378 classificadas, apenas uma entrou na análise crítica: a medição

incorreta da vazão de água para os filtros. A probabilidade deste caso foi tratada como alta dado o histórico de ocorrências deste medidor.

5.3. Sistema de Filtração

O estudo dos desenhos de projeto facilitou a identificação dos riscos dos sistemas. Para os filtros prensa, é possível observar a possibilidade de risco de colisão do operador com a tubulação de alimentação de lodo, como apresentado pela Figura 13.

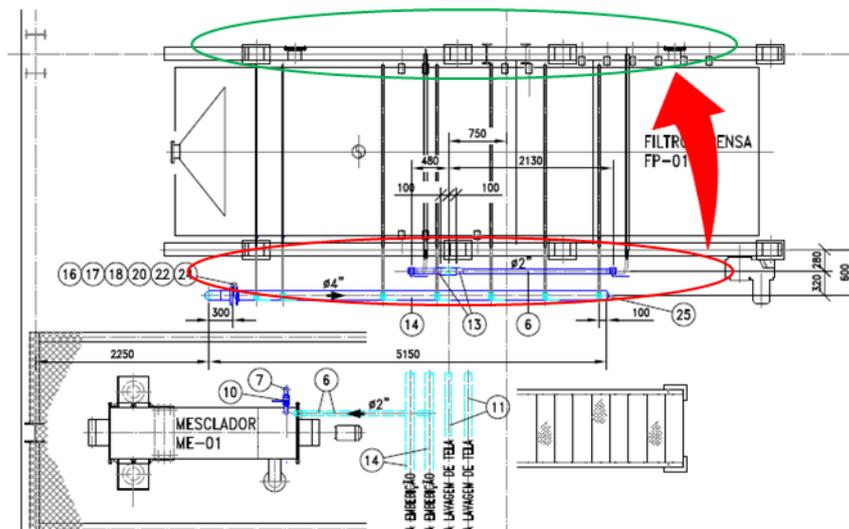
Figura 13 - Risco de colisão



Fonte: Autoria própria

Ainda, uma mudança no posicionamento de válvulas nos filtros foi sugerida, como indicada pela Figura 14. A razão desta alteração se baseou em 2 motivos: além do pouco espaço entre o filtro e o patamar do mesclador, que dificultava operação, inspeção ou manutenção destas válvulas também havia um risco de colisão do operador com o piso deste mesmo patamar.

Figura 14 - Realocação de válvulas



Fonte: Autoria própria

5.4. Sistema de Decantação

Este sistema passou por um projeto específico de dimensionamento e alinhado com o andamento da análise de risco do MCC, a metodologia se demonstrou bastante efetiva na identificação de riscos do sistema de decantação, uma vez que, o sistema de decantação é o primeiro colocado com maior número de riscos, reunindo cerca de 15% de todo o mapeamento, conforme apresentado na Tabela 2. Além disso, contempla cerca de 20% de todas alterações sugeridas durante este trabalho contribuindo, dessa maneira, para a qualidade operacional e garantindo a segurança dos colaboradores deste sistema. Algumas dessas mudanças foram:

- Instalação de válvula de bloqueio na entrada do decantador para isolamento do equipamento;
- Instalação de grade de proteção ao redor do topo do decantador evitando possibilidades de acidentes por contato com partes móveis, evidenciada na Figura 13;
- Abertura de uma nova porta de visita à média altura do decantador para facilitar inspeção e acesso ao interior do equipamento, apresentada na Figura 13;

Figura 15 - Melhorias no decantador



Fonte: Autoria própria

- Instalação de plataforma extra para facilitar acesso a válvulas de amostragem evitando assim a confecção de prolongadores para abertura das válvulas;
- Aumento da capacidade do tanque de água;
- Modificação no desenho padrão de bombas, acrescentando um carretel na sucção e recalque para facilitar desmontagem do equipamento. Esta modificação foi aplicada posteriormente para todos os sistemas;

5.5. Pontos de melhoria

Durante as discussões de projeto, foram coletadas sugestões de alterações nos projetos como comentados anteriormente. Toda as oportunidades de melhorias identificadas foram repassadas ao suporte técnico da manutenção e ao líder do projeto a fim de validar, tecnicamente, cada item proposto em termos de prioridade, severidade e estimativas de custos. Na Tabela 4 é apresentado o resumo quantitativo divididos pelo status de aprovação. É possível observar que houve uma quantidade significativa de adequações sugeridas para o projeto, o que demonstra a importância de uma análise crítica do projeto durante a fase de planejamento. Os pontos de melhorias na categoria de “Plano de Ação” são as modificações que foram

consideradas não críticas para o funcionamento do sistema e que poderiam ser implementadas posteriormente.

Tabela 4 - Relação de melhorias para o projeto

SISTEMA	Aprovadas	Reprovadas	Plano de Ação	Em avaliação
Decantação de Caldo	19	6	0	1
Armazenagem e Bombeamento de Água Quente para os Filtros	10	1	2	2
Armazenagem e Bombeamento de condensado e Água de Embebição	8	0	0	1
Sistema Predial e Civil	1	0	2	4
Armazenagem e Bombeamento de Caldo Filtrado	1	0	1	1
Caixa Misturadora de Lodo e Bombeamento	1	0	0	10
Filtração de Torta	6	4	5	6
Transporte de Torta	2	0	0	2
Armazenagem e Bombeamento de Polímero para os Filtros Prensa	2	0	1	2
Preparo e Bombeamento de Leite de Cal	0	0	1	7
	50	11	36	12

A relação de melhorias para cada sistema é apresentada pelo Apêndice D, indicando quais foram as ações necessárias para mitigação dos riscos encontrados.

6. CONCLUSÕES

Após o estudo das informações apresentadas, nota-se a importância de uma análise de risco criteriosa no desenvolvimento de projetos. É possível observar que os riscos se apresentam de diferentes formas, gravidades e localização, ou seja, são características inerentes à um ativo ou sistema. Portanto, sua coleta, estudo e registro destes são etapas importantes que contribuem para a tomada de decisão quanto à utilização e otimização dos recursos, à qualidade operacional e principalmente, à minimização de danos. Além disso, ao conhecer suas causas, tais informações podem ser utilizadas não somente na confecção de planos de manutenção, mas também no direcionamento da manutenção quanto à aquisição de novos ativos ou tecnologias que forneçam uma execução das atividades mais confiável e segura.

A metodologia do MCC, por possuir uma estrutura bastante definida, ao realizar o mapeamento dos princípios de funcionamento de um ativo e as comunicações com sistemas periféricos, fornece uma visão ampla do equipamento. Da mesma forma, ao relacioná-la com a análise de risco, ela apresenta como um forte auxílio na identificação de desvios, promovendo uma maior confiabilidade dos conjuntos analisados ao identificar, ainda na fase de planejamento e dimensionamento, os desvios que futuramente poderiam se tornar dificuldades para a operação. Vale ressaltar também que a metodologia não é capaz de identificar e solucionar todos os problemas e demanda uma alta carga de trabalho para ser implementada, porém, se aplicado de forma correta, não só traz frutos no campo de confiabilidade, como promove um pensamento crítico em manutenção, o que é indispensável para o gerenciamento de ativos, dos riscos e para a engenharia como um todo.

Ainda, o trabalho se demonstrou bastante eficaz ao estimular sugestões de melhorias do projeto se assemelhando aos conceitos de design para manufatura e montagem.

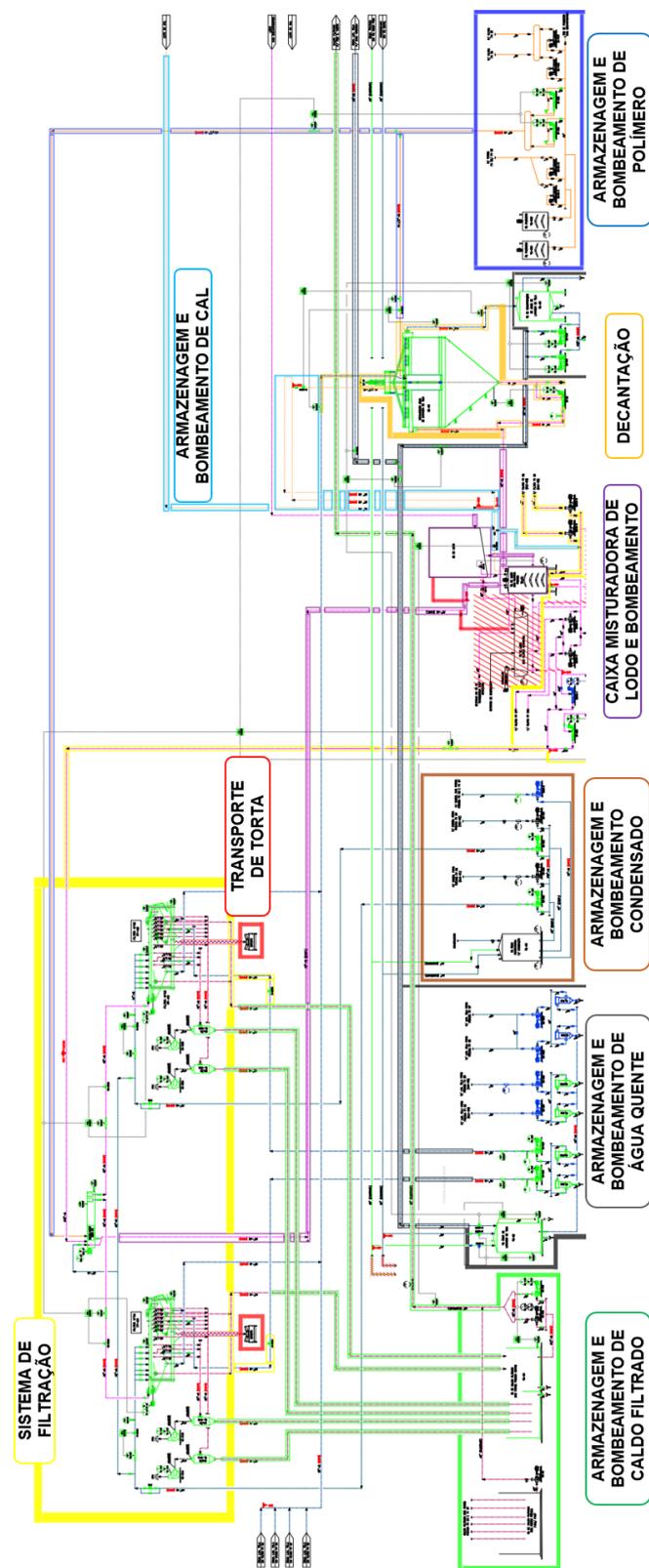
REFERÊNCIAS

- 14224, A. B. D. N. T. N. I. **Indústrias de petróleo e gás natural - Coleta e intercâmbio de dados de confiabilidade e manutenção para equipamentos**. São Paulo: [s.n.], 2011.
- ARAÚJO, E. B. B. M. **Análise FMEA em transformadores de alta potência**. SCHRAMM, V.B. 2018. p.59. TCC(Graduação) - Engenharia de Produção, Centro Acadêmia de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Campina Grande. Sumé,2018. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/5043>. Acesso em: 29 Nov 2022
- BASSON, M. **RCM3: Risk-Based Reliability Centered Maintenance**. 1. ed. Nova Iorque: Industrial Press, 2019.
- KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: Função estratégica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ed. Qualitymark, 2009.
- MATTOS, U. A. O.; MÁSCULO, F. S. **Higiene e Segurança do Trabalho**. 1. ed. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2011.
- MENDES, D. E. **Aplicação do Modelo FMEA/FMECA ao Gerenciamento de Riscos em**. Instituto IDD. Curitiba, p. 130. 2016. Disponível em: <https://www.idd.edu.br/downloads-idd/?tcc=12>. Acesso em: 24 Nov 2022
- MIKULAK, R. J.; MCDERMOTT, R.; BEAUREGARD, M. **The basics of FMEA**. 2. ed. Nova Iorque: CRC Press, 2008.
- MONCHY, F. **A Função Manutenção: Formação para a gerência da Manutenção Industrial**. 1. ed. São Paulo: Ed. Durban, 1987.
- MOSS, M. A. **Designing for minimal maintenance expense: the practical application of reliability**. 1. ed. Nova Iorque: CRC Press, 1985.
- MOUBRAY, J. **RCM II: Reliability Centered Maintenance**. 2. ed. Nova Iorque: Industrial Press, 1997.
- SOUZA, R. Q.; ÁLVARES, A. J. **FMEA AND FTA ANALYSIS FOR APPLICATION OF THE RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE METHODOLOGY: CASE STUDY ON HYDRAULIC TURBINES**. COBEM. Brasília: ABCM. 2007. p. 10.
- SOUZA, V. C. **Organização e Gerência da Manutenção: Planejamento, Programação e Controle de Manutenção**. 4. ed. São Paulo: All Print Editora, 2011.

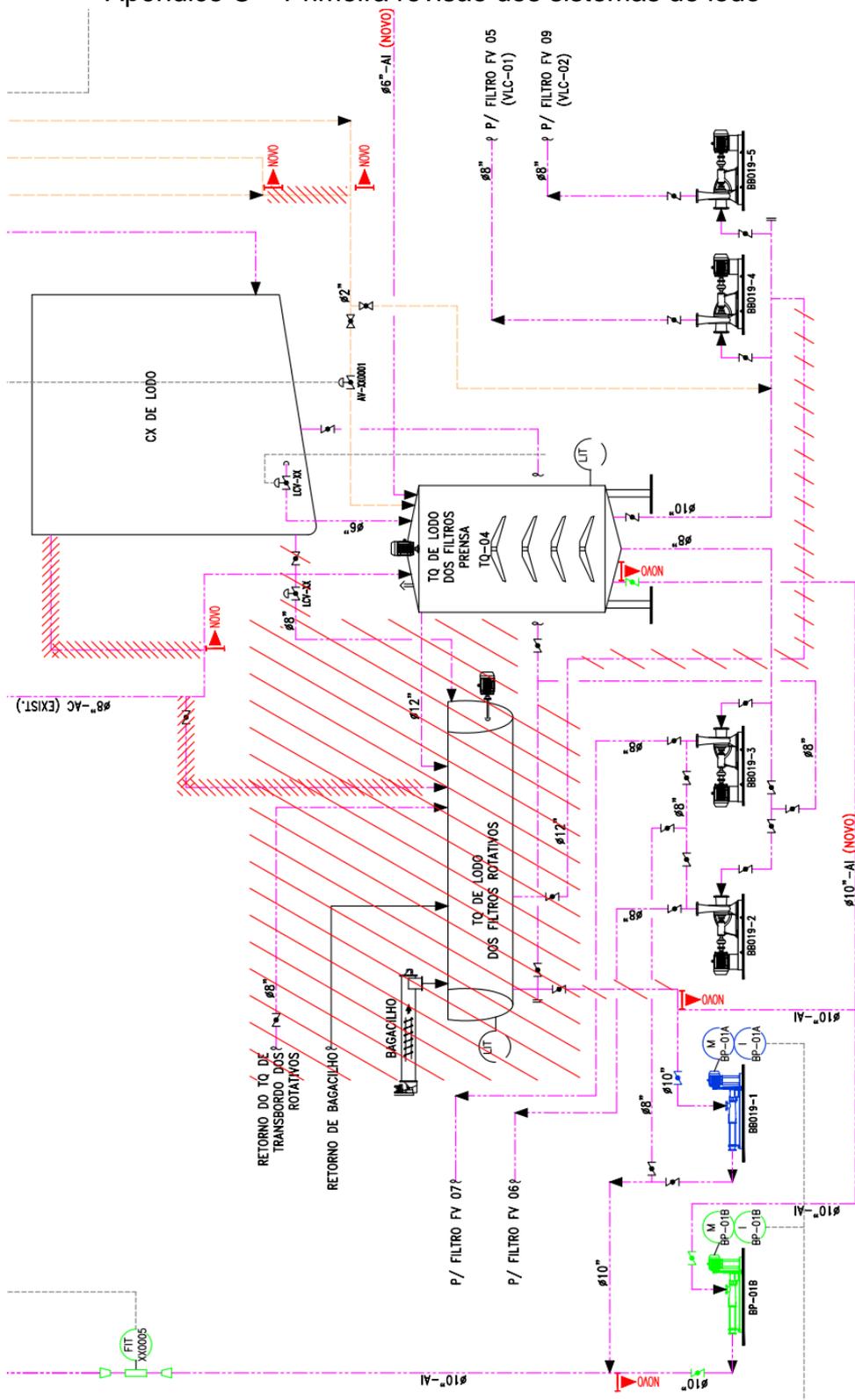
TAVARES, L. **Administração Moderna da Manutenção**. 1. ed. Rio de Janeiro: Pólo Publicações, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14224**: Indústrias de petróleo e gás natural – Coleta e intercâmbio de dados de confiabilidade e manutenção dos equipamentos. Rio de Janeiro, 2011.

Apêndice B – Conjunto dos sistemas do estudo



Apêndice C – Primeira revisão dos sistemas de lodo



Apêndice D – Plano de ação de melhorias e mitigação de falhas

Sistema	Plano de ação
Sistema de Decantação de Caldo	Abertura de canaletas que interligam à canaleta principal em pontos localizados abaixo dos drenos de bombas e tubulações para escoamento
Sistema de Decantação de Caldo	Elaboração de malha de controle como camada de proteção para mitigação de risco de transbordamento do decantador.
Sistema de Decantação de Caldo	Instalação de válvula de bloqueio na entrada do decantador para isolamento em caso de rasgo de tela do filtro.
Sistema de Decantação de Caldo	Instalação de válvula de bloqueio na entrada do tanque de água limpa para isolamento caso de do decantador verter água suja.
Sistema de Decantação de Caldo	Aumento da capacidade do tanque de água limpa (atualmente cerca de 5 a 8 m ³) para melhor controle em caso de entupimento da linha de saída de água ou falha da bomba de retirada de água.
Sistema de Decantação de Caldo	Instalação de válvulas de bloqueio individuais na saída de cada filtro com objetivo de isolamento caso ocorra algum rasgo de tela. As válvulas individuais evitarão comprometer a produção dos outros filtros.
Sistema de Decantação de Caldo	Instalação de grade de proteção ao redor do decantador para impedir contatos no raspador (elemento girante).
Sistema de Decantação de Caldo	Instalação de tela de proteção no suporte do redutor do raspador para evitar contato com elementos girantes.
Sistema de Decantação de Caldo	Adicionar uma boca de visita adicional na região do fundo do decantador para facilitar instalação de ventilação.
Sistema de Decantação de Caldo	Instalação de boca de visita na faixa localizada à média altura do decantador caso seja necessário realizar manutenção no raspador ou no cilindro que recebe a água suja de entrada.
Sistema de Decantação de Caldo	Adicionar canaleta ao redor do decantador comunicada com a canaleta geral de descarte de resíduos.
Sistema de Decantação de Caldo	Modificar a escada de acesso ao piso operacional e também a escada de acesso ao piso do redutor para escada com descanso e guarda corpo.
Sistema de Decantação de Caldo	Alteração dos desenhos de montagem de todos os bombeamentos de acordo com padrão prevendo carretel, dreno, suportes, dentre outros.
Sistema de Decantação de Caldo	Extensão de patamar para acesso às válvulas do decantador.
Sistema de Decantação de Caldo	Alteração do piso do patamar do redutor de piso gradeado para chapa xadrez de maneira a impedir queda de objetos no interior do decantador.
Sistema de Decantação de Caldo	Instalação de barra chata no guarda corpo próximo ao piso para impedir que componentes possam escapar pelos lados do patamar e cair dentro do decantador.
Sistema de Decantação de Caldo	Fabricação de "casinhas" de proteção para os motores e bomba para proteção.
Sistema de Decantação de Caldo	Para não imprimir carga excessiva nos flanges da bomba e auxiliar durante a desmontagem, adicionar suportes nas tubulações de sucção e recalque no bombeamento da bomba de lodo.
Sistema de Decantação de Caldo	Instalação nas tubulações de aço inox de identificação de sentido do fluxo e fluido passante.
Sistema de Armazenagem e Bombeamento de Água Quente para os Filtros	Nas montagens onde é instalada uma válvula de retenção adicionar ponto de dreno após a retenção para permitir

	esgotamento da linha em caso de manutenção de válvula de bloqueio.
Sistema de Armazenagem e Bombeamento de Água Quente para os Filtros	Alterar a montagem dos drenos para o padrão.
Sistema de Armazenagem e Bombeamento de Água Quente para os Filtros	Adicionar nova boca de visita para instalação de exaustão devido a ser espaço confinado. Aplicado ao tanque de água quente.
Sistema de Armazenagem e Bombeamento de Água Quente para os Filtros	Estender canaleta para atender possível descarga do extravasor. Aplicado ao tanque de água quente.
Sistema de Armazenagem e Bombeamento de Água Quente para os Filtros	Incluir ponto para instalação de poço termométrico no costado. Aplicado ao tanque de água quente.
Sistema de Armazenagem e Bombeamento de Água Quente para os Filtros	Estender respiro até próximo ao chão para evitar respingos de água quente nos operadores. Aplicado ao tanque de água quente.
Sistema de Armazenagem e Bombeamento de Água Quente para os Filtros	Inserir redundância de medição de temperatura.
Sistema de Armazenagem e Bombeamento de Água Quente para os Filtros	Pintura térmica no costado do tanque até meia altura e nas tubulações de entrada das bombas de maneira a prevenir queimaduras.
Sistema de Armazenagem e Bombeamento de Água Quente para os Filtros	Alterar junta de vedação de condensado de papelão hidráulico para junta metálica.
Sistema de Armazenagem e Bombeamento de Água Quente para os Filtros	Redirecionamento da tubulação de água devido à proximidade de subestação a fim de evitar riscos de acidentes.
Sistema de Armazenamento e Bombeamento de Condensado e Água de Embebição	Adicionar ladrão com direcionamento para a canaleta.
Sistema de Armazenamento e Bombeamento de Condensado e Água de Embebição	Instalar ponto para dreno no costado do tanque.
Sistema de Armazenamento e Bombeamento de Condensado e Água de Embebição	Realizar adequação do teto do tanque através de fechamento e instalar respiro de acordo com padrão.
Sistema de Armazenamento e Bombeamento de Condensado e Água de Embebição	Adequar tubulação de entrada para montagem com flanges.
Sistema de Armazenamento e Bombeamento de Condensado e Água de Embebição	Pintura com tinta térmica ou adicionar isolamento térmico no tanque.
Sistema de Armazenamento e Bombeamento de Condensado e Água de Embebição	Adequar boca de visita de acordo com padrão e realizar a abertura de nova boca de visita para instalação de exaustão.
Sistema de Armazenamento e Bombeamento de Condensado e Água de Embebição	Instalar meio de acesso para o topo do tanque através de escada com descanso e patamar para manutenção de válvulas.
Sistema de Armazenamento e Bombeamento de Condensado e Água de Embebição	Substituição das conexões de mangueiras de injeção de água de lavagem de tela dos filtros prensa por conexões roscadas ou flangeadas com objetivo de mitigar riscos de acidente por escape da mangueira.

Sistema de Predial/Civil Filtração de Caldo	Aumentar largura da escada de acesso ao piso operacional dos tanques para aprimorar o fluxo de operadores. Alto tráfego na região.
Sistema de Armazenagem e Bombeamento de Caldo Filtrado	Adicionar ladrão no tanque direcionando para canaleta. Há casos em outros tanques similares que, em caso de parada da bomba ou defeito do transmissor de nível, ocorre transbordamento do tanque.
Sistema da Caixa Misturadora de Lodo e Bombeamento	Adequar bacia de contenção da caixa de mistura de lodo, de maneira a impedir que, em caso de transbordamento, algum colaborador realizando manutenção nas bombas de lodo seja atingido.
Sistema de Filtração de Torta	Adicionar interligação das bombas de lodo com linhas de água quente para permitir lavagem em caso de entupimento/manutenção.
Sistema de Filtração de Torta	Prever pintura térmica/ isolamento térmico no tanque mesclador e em tubulações onde é possível o contato de colaboradores.
Sistema de Filtração de Torta	Alterar altura da tubulação de saída dos mescladores e entrada nos filtros para evitar riscos de colisão com a tubulação.
Sistema de Filtração de Torta	Alterar o piso do patamar do mesclador de chapa expandida para chapa xadrez, dessa maneira, em caso de vazamento, são menores as probabilidades de queimaduras de colaboradores.
Sistema de Filtração de Torta	Adicionar suportes a montante e jusante do medidor de vazão, atualmente, em caso de desmontagem não há suportes para as tubulações
Sistema de Filtração de Torta	Realocar válvulas do filtro prensa para o lado oposto do equipamento para maior manutenibilidade e menor risco de colisão com patamar do mesclador
Sistema de Transporte de Torta	Devido à alteração da bica de torta, adicionar um absorvedor de impacto na lona para reduzir desgaste e possibilidade de desalinhamento.
Sistema de Transporte de Torta	Adicionar proteção nos roletes (partes girantes) de acordo com o padrão.
Sistema de Armazenagem e Bombeamento de Polímero para Filtros Prensa	Adicionar válvula manual de bloqueio na linha que vai para o tanque mesclador, dessa maneira, caso seja necessário realizar manutenção no mesclador, é possível continuar a alimentação de polímero para o decantador.
Sistema de Armazenagem e Bombeamento de Polímero para Filtros Prensa	Avaliar a instalação de suportes com borrachas ou outros dispositivos para amortecimento de vibração.