



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

GLAUCIA GABRIELLA RODRIGUES LIMA

Análise de confiabilidade dos trocadores de calor tubulares aplicados na extração de alumina na área da digestão

São Luís
2022

GLAUCIA GABRIELLA RODRIGUES LIMA

Análise de confiabilidade dos trocadores de calor tubulares aplicados na extração de alumina na área da digestão.

Orientador: Prof. Dr. Glauber Cruz

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica
da Universidade Federal do Maranhão como pré-
requisito para obtenção do título de Engenheira
Mecânica

São Luís
2022

Lima, Glaucia Gabriella Rodrigues.

Análise de confiabilidade dos trocadores de calor tubulares aplicados na extração de alumina na área da digestão / Glaucia Gabriella Rodrigues Lima. - 2022.
60 p.

Orientador(a): Glauber Cruz.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Maranhão, São Luis, 2022.

1. FMEA. 2. MCC. 3. Trocas térmicas. I. Cruz, Glauber. II. Título.

Análise de confiabilidade dos trocadores de calor tubulares aplicados na extração de alumina na área da digestão.

Prof. Dr. Glauber Cruz (CCEM/UFMA)
Orientador

Prof. Dr. Dalmo Inácio Galdez Costa (CCEM/UFMA)
Membro interno

Prof. Me. Paulo Roberto Campos Flexa Ribeiro Filho (CCT/UEMA)
Membro externo

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por tudo e por cuidar tão bem de mim e me dar uma segunda chance de viver.

A minha mãe, meu pai e meu irmão por nunca deixarem nada faltar para mim e me apoiarem em todos os momentos da minha vida, por serem as pessoas que mais amo.

A minha amiga Iara Monteles, pelo encontro de alma que Deus proporcionou para nós, onde descobri uma amiga para toda vida.

Aos meus amigos, Gabriel e Davidson, o clube dos eternos Estagiários Inglórios. Os quais encontrei paciência para me escutarem e fazerem parte da caminhada pela vida.

As minhas amigas do projeto do Projeto Meninas OFF ROAD: Walderlanne, Byatriz, Rafaella, Fernanda e Nádia pelas risadas e figurinhas, adoro vocês.

Aos meus amigos da UFMA, que sempre eram motivadores para conclusão do curso “*ninguém solta a mão de ninguém*”, Walderlanne, Aysla, Marlon, Mauricio, Fernando e Mardiani vocês são um presente que a UFMA me deu.

Aos meus amigos de estágio João Gabriel, Laura, Karen, Jadna, Andressa e Vinicius pelos momentos divertidos e apoio na caminhada profissional.

Ao meu orientador Glauber Cruz pela paciência, e pelo apoio sempre.

Aos meus gestores e colegas da Alumar, em especial ao Engenheiro Mecânico Ighor Caetano Ferreira pelo suporte, conselhos, por ser um amigo querido e ser uma das minhas inspirações profissionais.

“O correr da vida embrulha tudo, a vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa, sossega e depois desinquieta. O que ela quer da gente é coragem.”

Grande Sertão: Veredas, Guimarães Rosa

RESUMO

Nas indústrias de processo de extração de alumina é constante a necessidade do estudo da confiabilidade dos ativos para garantir a disponibilidade destes e reduzir riscos ao negócio. O sistema de trocas térmicas não se mantém fora deste conceito, visto que este é necessário para aquecimento e resfriamento da matéria-prima (bauxita), tornando-se um dos sistemas mais importantes dentro da etapa da digestão, cuja eficiência da atividade é a responsável pela produção de alta qualidade. Deste modo, este estudo tem como objetivo desenvolver e implementar uma estratégia de manutenção de operação dos trocadores de calor tubulares focados em Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC), de uma empresa de extração de alumina na área da digestão do Processo Bayer. Com foco em desenvolvimento de estratégias de excelência operacional (REX) dos trocadores de calor, para atender ao time de Engenharia e os clientes, e melhorar as condições de operação, qualidade e performance de ativos importantes para o processo de produção de alumina. A metodologia usada foi a utilização de ferramentas como o FMEA, análise de custos e análise do sistema de aquecimento, que envolvem índices como o de incrustação dos trocadores da digestão voltada a manentabilidade deste sistema. Dentre os critérios adotados e confrontados com os dados disponibilizados pela organização fez-se necessária de uma forma adequada a análise de criticidade dos equipamentos, que fazem parte do sistema de aquecimento, em específico os trocadores de calor. Os resultados alcançados a partir da análise do FMEA demonstraram, que os trocadores de calor são de caráter crítico para o funcionamento da digestão, onde está é responsável pela produção de Alumina da empresa, causando perda de produção caso a mesma sofra paradas não programadas. Já os índices de incrustação de aproximadamente $0,00080 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ demonstraram uma total associação com a composição química e densidade da mistura de polpa de bauxita e licor, associado ao desempenho térmico da bancada de trocadores de calor, corroborando para formação da estratégia de manutenção desses equipamentos.

Palavras-chave: FMEA; MCC; trocas térmicas.

ABSTRACT

At alumina extraction process industries, there is a constant need to study the reliability of assets to ensure their availability and reduce business risks. When it comes to the maintenance analysis of assets allocated within the Bayer Process, each stage of the extraction system is responsible for the efficiency of the equipment used to develop a certain activity. The thermal exchange system is not left out of this concept, as it is necessary for heating and cooling the feedstock (bauxite), becoming one of the most important systems within the digestion stage, whose activity efficiency is responsible for a production high-quality. Thus, this study aims to develop and implement a maintenance strategy for the operation of tubular heat exchangers focused on Reliability Centered Maintenance (MCC), of an alumina extraction company in the Bayer Process digestion area. Focused on developing operational excellence strategies (REX) for heat exchangers, to serve the Engineering team and customers, and improve operating conditions, quality and performance of important assets for the alumina production process. The methodology used was the use of tools such as FMEA, cost analysis and analysis of the heating system, which involve indices such as the incrustation of the digestion exchangers aimed at the manageability of this system. Among the criteria adopted and confronted with the data made available by the organization, it was necessary to adequately analyze the criticality of the equipment, which are part of the heating system, in particular the heat exchangers. The results achieved from the FMEA analysis showed that the heat exchangers are critical for the functioning of the digestion, where it is responsible for the company's Alumina production, causing loss of production if it suffers unscheduled stops. The fouling indices of approximately $0.00080 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ showed a total association with the chemical composition and density of the mixture of bauxite pulp and liquor, associated with the thermal performance of the heat exchanger bench, corroborating for the formation of the maintenance strategy for such equipment.

Keywords: FMEA; RCM; thermal exchange.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Grãos de Alumina em uma granulometria muito fina cerca de 0,3 microns.	18
Figura 2: Diagrama de blocos do fluxo de processos da produção de alumina na Refinaria...20	20
Figura 3: Trocador de calor tubular utilizado em uma planta de produção de alumina.	21
Figura 4: Unidade 1 de Digestão: esquema de aquecimento da polpa e da mistura polpa + licor.....	21
Figura 5: Unidade 1 de Digestão: esquema de aquecimento do licor fraco e resfriamento do licor verde.	22
Figura 6: Fluxograma de classificação dos principais tipos de trocadores de calor.....	23
Figura 7: Exemplo de um trocador de calor de tubo duplo.	24
Figura 8: Representação esquemática de um trocador de calor do tipo multitubular.....	24
Figura 9: Modelo de uma serpentina fabricada em material cobre e conexões nas extremidades.....	25
Figura 10: Arranjo de tubos dispostos em um trocador de calor, conforme norma TEMA: a) arranjo triangular (30°), b) arranjo triangular (60°), c) arranjo quadrado (90°) e d) arranjo quadrado rodado (45°).	26
Figura 11: Trocador de calor operando com correntes paralelas.....	28
Figura 12: Trocador de calor operando com correntes em contrafluxo.	28
Figura 13: Métodos de Manutenção Planejada.....	30
Figura 14: Passos simplificados para criação do FMEA.....	32
Figura 15: Vista explodida de trocador de calor do tipo casco-tubos	34
Figura 16: Imagem ilustrativa dos trocadores de calor do tipo casco e tubo utilizados na multinacional: a) modelo completo com casco a mostra e b) modelo com tubos e flange a mostra.	34
Figura 17: Bancadas de aquecedores: esquema de aquecimento de um licor fraco da digestão II.	36
Figura 18: Esquema descritivo do Processo de mistura de licor + polpa de bauxita na digestão.	37
Figura 19: Tampa de saída de um lavador com sinais de incrustação.....	38
Figura 20: Incrustações em tubos de aquecedor tubular.....	38
Figura 21: Tela de funcionamento da Digestão.....	39
Figura 22: Feixe tubular de um trocador de calor industrial	40

Figura 23: Disposição dos trocadores de calor em bancada.....	40
Figura 24: Bancada de trocadores de calor.....	41
Figura 25: Consumo do prédio de troca térmica dos trocadores de calor da Digestão.	43
Figura 26: Análise das Falhas Funcionais (AFF).	44
Figura 27: Esquema de Construção da Estratégia de Manutenção EMS.	45
Figura 28: Modelo adaptado de FMEA retirado do EMS.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Questionário para metodologia do MCC.....	31
Tabela 2: Relação de Temperaturas para troca térmica na Digestão.....	41
Tabela 3: Ativos do /sistema de troca térmica da Digestão.....	46

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área
C_p	Calor específico à pressão constante
C_f	Taxa de Capacidade calorífica do fluido frio
C_q	Taxa de Capacidade calorífica do fluido quente
C_{\min}	Taxa que apresentar menor valor entre C_f e C_q
C_r	Taxa que apresentar menor valor entre C_f e C_q dividido pela taxa que apresenta maior valor
D	Diâmetro
D_h	Diâmetro hidráulico
D_{e_i}	Diâmetro externo do tubo interno
D_i	Diâmetro interno
D_e	Diâmetro externo
ε	Efetividade
h_i	Coefficiente de película do tubo interno
h_e	Coefficiente de película do tubo externo
h_o	Coefficiente externo de transmissão de calor convectivo
h_i	Coefficiente interno de transmissão de calor convectivo
i	Índice de incrustação
k	Condutividade térmica
k_m	Condutividade do metal
L	Comprimento do tubo
m	Vazão mássica
q	Taxa de troca de Calor
q_{\max}	Máximo calor trocado
R_d	Fator de incrustação ou <i>fouling</i>
R_{di}	Fator de incrustação do fluido interno
R_{do}	Fator de incrustação do fluido externo
R_o	Incrustação no início
R_i	Incrustação no decorrer do tempo
R_{io}	Resistência interna à transferência de calor convectivo

R_o	Resistência externa à transferência de calor convectivo
T	Temperatura
U	Coefficiente global de transferência de calor
U_D	Coefficiente de incrustação de projeto
U_C	Coefficiente global de polimento designado
ρ_f	Massa específica do fluido
V	Velocidade
μ	Viscosidade dinâmica
ΔT	Diferença de temperatura
ΔT_{ml}	Média logarítmica das temperaturas

Índices

i	Tubo interno
e	Tubo externo
q	Fluido quente
f	Fluido frio

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALUMAR	Consórcio de Alumínio do Maranhão
ALUNORTE	Alumina do Norte do Brasil S/A
CBA	Companhia Brasileira do Alumínio
CSTR	<i>Continuous Stirred-Tank Reactor Model</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
NUT	Número de Unidades de Transferência de Calor
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i>
REX	<i>Reliability Excellence</i>
TEMA	<i>Tubular Exchangers Manufacturers Association</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
2.1. OBJETIVO GERAL	17
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1. PROCESSO BAYER	18
3.2. DIGESTÃO	20
3.3. TROCADORES DE CALOR TUBULAR	23
3.4. INCRUSTAÇÃO	25
3.5. ANÁLISE DE TROCADORES DE CALOR EM OPERAÇÃO	26
3.6. TROCADOR DE CALOR COM ESCOAMENTO PARALELO E CONTRAFLUXO	27
3.7. MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE	30
4. METODOLOGIA	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1. GERENCIAMENTO DO SISTEMA DE TROCAS TÉRMICAS	36
5.2. SISTEMA DE TROCADORES DE CALOR DA DIGESTÃO	37
5.3. DESENVOLVIMENTO DA MCC (MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE).	43
6. CONCLUSÕES	48
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
ANEXO A < ESTRATÉGIA 030>	55
ANEXO B < FMEA>	58
ANEXO C < ESTRATÉGIAS DO EMS>	59

1. INTRODUÇÃO

Trocadores de calor são equipamentos largamente utilizados nas indústrias em geral. Estes são responsáveis pela troca de calor entre dois fluidos, por meio de um processo que envolve diferentes temperaturas e separados por paredes sólidas. Tais equipamentos ocorrem em muitas e diferentes aplicações de Engenharia, além de ser encontrados em diversos segmentos da indústria e no uso pessoal (INCROPERA, 2014).

Para tanto, as dificuldades de troca térmica em trocadores de calor são frequentes e podem ser apresentadas de inúmeros modos (FELÍCIO, 2012). Evidencia-se que alguns problemas de troca térmica em sistemas que envolvem indústrias de produção de alumina ocorrem pela formação de *scale*, que pode ocorrer por meio de diversos processos industriais (AGUIRRE, 2015). No caso da planta em estudo, este *scale* (definido como percentual de incrustação, ou ainda *fouling*) corresponde à formação de uma camada de polpa nas paredes dos trocadores, diminuindo a troca térmica com o aumento da espessura do depósito (GUT, 2003).

A grande problemática é a dificuldade no cálculo do coeficiente de incrustação (R_d) dos trocadores de calor devido às variações significativas de percentuais de carga que afetam as variáveis do processo e podem ocorrer pela alteração de carga, mudanças de grade, entre outros fatores (VALLE, 2012). Portanto, quando ocorrem intervenções nas vazões (Q) ou variações nas temperaturas (ΔT) de entrada dos trocadores, o coeficiente global de transferência de calor (U) varia devido à essas forças motrizes e não somente pela formação de depósitos no trocador (ISHIYAMA *et. al.*, 2010). Logo, o resultado obtido para este índice sem considerar essas alterações normais não é eficaz para o acompanhamento das incrustações durante um longo período de operação dos trocadores, o que afeta diretamente a confiabilidade dos referidos equipamentos (BARALDI, 2011).

Nos sistemas de controle tradicionais de trocadores de calor na indústria, a análise de confiabilidade é um dos requisitos primordiais para criação de estratégias operacionais (GUT, 2003). Para tanto, desenvolver um conceito de manutenção adequado é importante devido aos altos custos com manutenção: custos com os itens dos equipamentos para trocas dos vasos (tubos, fabricação de flanges e casco), locação máquinas para retirada dos itens, custos com equipe para limpeza dos mesmos (tanto para manutenção interna quanto para manutenção terceirizada) e pelo impacto operacional que a manutenção pode ter no desempenho logístico dos equipamentos (PINTELON; NAGARUR; VAN PUYVELDE, 1999).

Em 2022, as falhas de trocadores de calor representaram 2% de redução da produção da alumina a partir da parada de uma das linhas de produção da refinaria, ou seja, do prédio Unidade I – 30A da Digestão, tais dados corroboraram para levantamento do estudo de desenvolvimento da análise de confiabilidade e criação da estratégia de manutenção.

A partir da visualização do sistema de aquecimento como um todo é possível mensurar os fatores que caracterizam a confiabilidade do sistema, para desse modo, problemas como paradas para manutenção corretiva sejam diminuídas e o tempo de operação do equipamento (anual ou semestral), seja otimizado.

Em sistemas de controle industriais, a utilização de arquiteturas de prédios que são os responsáveis por trocas térmicas de sistemas complexos, baseadas em análises de indicadores podem trazer uma série de vantagens, por exemplo, melhorar a eficiência, flexibilidade e confiabilidade do sistema como um todo, reduzindo o tempo e os custos de instalação, reconfiguração e manutenção (SILVA, 2010).

Diante dos fatores mencionados, tem-se por objetivo a análise de confiabilidade da manutenção de trocadores de calor do tipo casco e tubo na área da digestão de uma planta de produção de alumina de alta qualidade. Objetivando-se o estabelecimento de uma estratégia de manutenção voltada para confiabilidade e melhor desempenho dos trocadores de calor da Digestão 1, ou seja, etapa inicial da Digestão (Unidade I – 30A).

2. OBJETIVOS

2.1.OBJETIVO GERAL

Analisar dados de manutenção de um trocador de calor do tipo casco e tubo na área da digestão da refinaria de uma planta de produção de alumina de alta qualidade, analisando a troca térmica e acompanhando o funcionamento dos trocadores de calor.

2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar análise de falhas dos trocadores de calor de casco e tubo da digestão.
- Apresentar os parâmetros termofísicos e coeficientes nos níveis de incrustação, que acompanham a análise de desempenho dos trocadores de calor;
- Aplicação das ferramentas de manutenção para o sistema de troca térmica (descrição dos sistemas, FMEA, planos de manutenção);
- Levantar oportunidades de melhoria no plano de operação e manutenção atual por meio da operação dos trocadores de calor da digestão;
- Construção da estratégia de manutenção;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. PROCESSO BAYER

O processo Bayer para produção de alumina (Figura 1) a partir da bauxita, percorreu um longo caminho desde o final do século XIX (ALVES, 2017). A descoberta que uma carga de semente de tri-hidrato de alumina ($\text{Al}(\text{OH})_3$) previamente precipitada, reduzia o tempo necessário para precipitação e permitia uma medida de controle sobre o tamanho de partículas do produto, foi um marco para o início de produção de alumínio (ALVES, 2017).

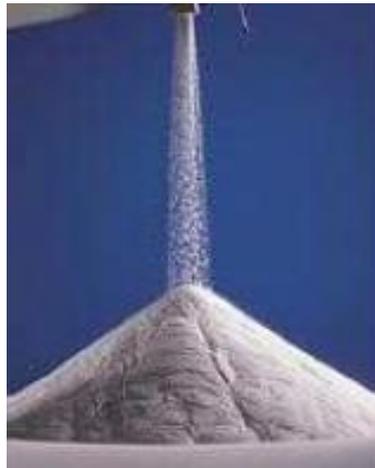


Figura 1: Grãos de Alumina em uma granulometria muito fina cerca de 0,3 microns.
Fonte: Adaptado de Rocha (2018).

Neste contexto, o Brasil conta com grandes empresas atuando na produção de alumina, por exemplo, a Alumar - Consórcio de Alumínio do Maranhão, localizada em São Luís (MA), que é de propriedade da Alcoa (54%), BHP Billiton (36%) e Rio Tinto Alcan (10%), com capacidade anual de produção de 3,5 milhões de toneladas; a Alunorte - Alumina do Norte do Brasil S/A, localizada em Barcarena (PA), com capacidade anual de produção de 6,3 milhões de toneladas, sendo a maior produtora mundial de alumina; e a CBA - Companhia Brasileira do Alumínio, na região de Sorocaba (SP), com capacidade anual de produção de 900 mil toneladas (ALCOA, 2022; HYDRO, 2022).

É interessante destacar que o processo Bayer é iniciado com o mineral, denominado de bauxita, sendo esta misturada com uma porção de solução de soda cáustica e moída como uma polpa ou pasta de bauxita (ISHIYAMA *et. al.*, 2010). Nestas condições, a bauxita dissolve-se formando uma solução de aluminato de sódio ($\text{Na}(\text{Al}(\text{OH})_4)$), enquanto as impurezas permanecem na fase sólida e são conhecidas como “lama vermelha” (MACFIE e CARNEIRO, 1993).

A abertura da bauxita ou extração, com o intuito de dissolver o alumínio nela presente dá-se em grandes tanques chamados de digestores. Após a cominuição (moagem da bauxita) a

polpa é aquecida em tanques digestores a 95 °C, que são adicionados com soda cáustica e cal para solubilizar toda a alumina e retirar as impurezas por precipitação (ALVES, 2017).

O passo seguinte nesse processo é a separação de resíduos sólidos de bauxita da solução. A fração fina, menor que 10 µm são separados por meio de espessadores que segue para os lavadores, onde o processo de decantação da lama vermelha acontece e extrai-se o licor rico, ou seja, um licor com um alto teor de aluminato de sódio (SAMAL *et al.*, 2013). Em seguida, ocorre a etapa de precipitação, quando se dá o resfriamento do licor rico. Após este resfriamento é feita uma adição de uma pequena quantidade de cristais de alumina (semeadura) para estimular a precipitação formando uma pedra de hidrato de alumina, em uma operação reversa à digestão (KIMMERLE, 2004).

Desta forma, por meio do controle da pressão e temperatura, conduz-se a reação no sentido direto (produção do aluminato – extração) ou no sentido inverso (produção do hidróxido de alumínio – recuperação). Isto porque a solubilidade do $\text{Al}(\text{OH})_3$ em soda cáustica aumenta com a temperatura, logo, a reação pode ser facilmente reversível pelo resfriamento da solução, recuperando-se o hidróxido de alumínio (ROCHA, 2018).

Após a última etapa do refino, uma etapa adicional ocorre visando a produção efetiva da matéria-prima do alumínio: a alumina. Esta, na forma cristalizada é transportada para a calcinação e o licor pobre (pobre em alumina) é recirculado para a etapa de digestão. A calcinação é a etapa final do processo Bayer, em que a alumina é lavada para remover o hidróxido de sódio. Em seguida, a alumina é calcinada em aproximadamente 1000 °C para desidratar os cristais, formando cristais de alumina, de aspecto arenoso e esbranquiçado (CONSTANTINO *et al.*, 2001).

Após a calcinação, a alumina deixa a Unidade da Refinaria e segue para a obtenção do alumínio metálico em cubas eletrolíticas (Unidade de Redução – aplicação do processo *Hall-Heroult*) ou vai para o Porto.

Neste processo que ocorre na Redução, o alumínio é produzido pela redução eletrolítica da alumina (Al_2O_3) dissolvida em um banho de fluoretos fundidos. O processo *Hall-Heroult* se desenvolve em fornos especiais revestidos de carbono, também chamados de cubas eletrolíticas, que operam em aproximadamente 960 °C. cujo material proveniente destas segue para máquinas de lingotamento, onde é conformado e resfriado, para produção dos lingotes de alumínio (ABAL, 2012).

Na Figura 2 é possível observar um fluxograma que resume o processo produtivo supramencionado.

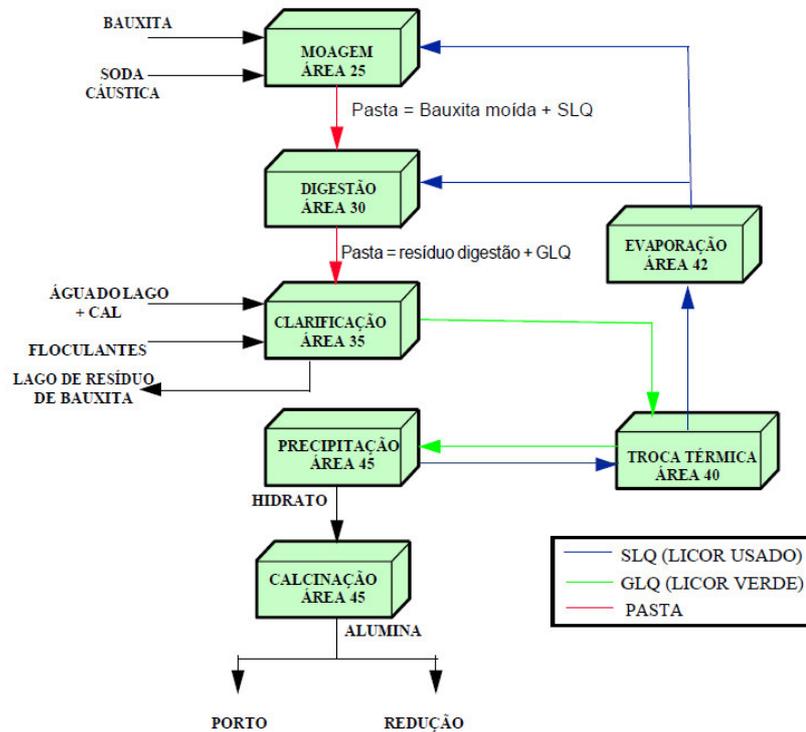


Figura 2: Diagrama de blocos do fluxo de processos da produção de alumina na Refinaria.
Fonte: Adaptado de Rocha (2018).

3.2. DIGESTÃO

A fase do processo da digestão é a responsável por retirar o material desejado da matriz mineral deste. Tal fase não se refere somente aos digestores, reatores CSTR (Reator Tanque Contínuo Ideal), onde acontece reações para a transformação de matérias-primas em produtos comercializáveis (BARALDI, 2012), mas também a algumas outras operações que são necessárias para esse fim (GALLO, 2019).

Os digestores do processo Bayer são projetados de modo que toda a reação de dessilicação ocorra, pois, a sílica dissolvida pode ser precipitada juntamente ao produto acarretando perdas de qualidade, ou precipitar criando incrustações indesejáveis em outros equipamentos (RODRIGUES, 2018).

Para tanto, antes de alimentar os digestores, é necessário que a corrente esteja na temperatura especificada 102 °C – 180 °C para o processo (FRANCO *et al.*, 2015). Na planta da empresa em estudo, o licor e a polpa de bauxita são pré-aquecidos separadamente em aquecedores tubulares (Figura 3). No caso do licor, os aquecedores são do tipo casco e tubo.



Figura 3: Trocador de calor tubular utilizado em uma planta de produção de alumina.
Fonte: Adaptado por autora (2022).

As etapas do processo de digestão são: aquecimento do licor e da polpa com vapor regenerado dos flashes, cada corrente em separado (Figura 4); misturar o licor com polpa de bauxita (Figura 4); aquecer a mistura de licor + polpa por meio de vapor vivo até as condições de processo (Figura 4); extração da alumina (Figura 5); resfriamento, nos flashes, do licor verde formado após os digestores (Figura 4).

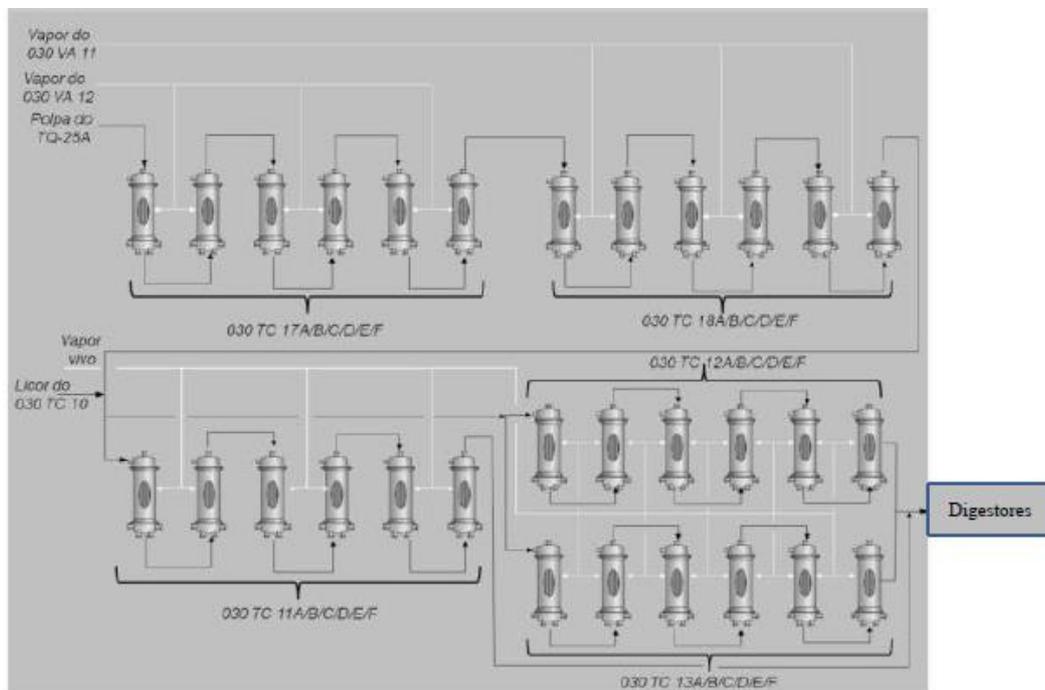


Figura 4: Unidade 1 de Digestão: esquema de aquecimento da polpa e da mistura polpa + licor.
Fonte: Adaptado de Rocha (2018).

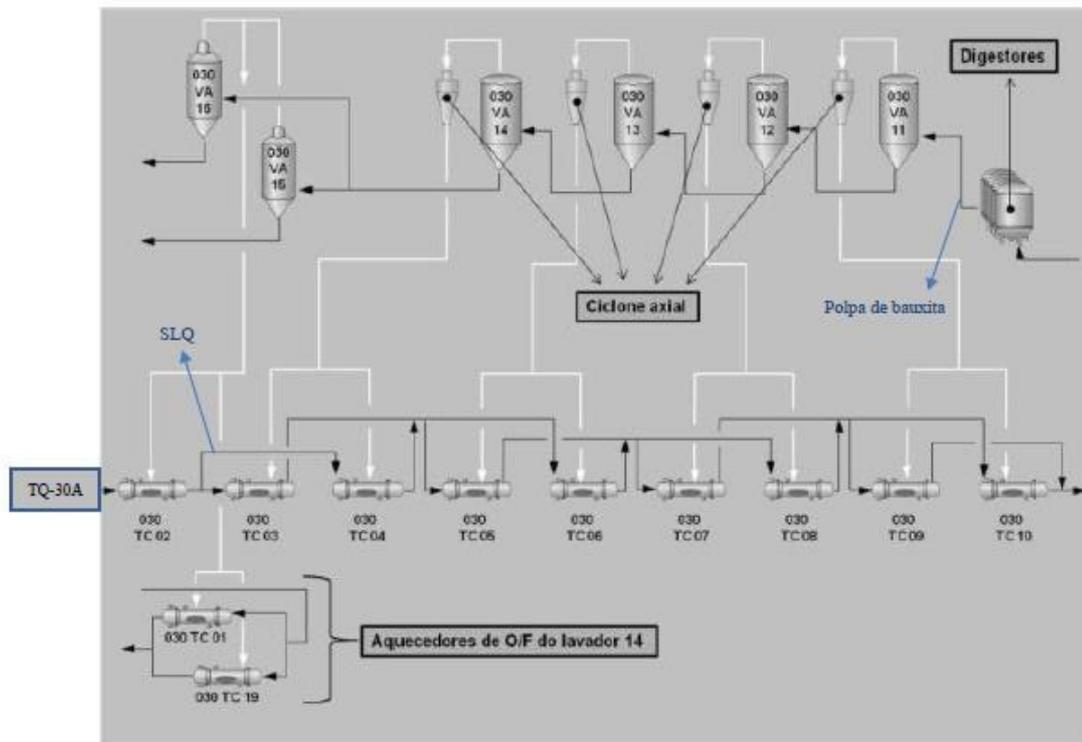


Figura 5: Unidade 1 de Digestão: esquema de aquecimento do licor fraco e resfriamento do licor verde.
Fonte: Adaptado de Rocha (2018).

Na unidade I de Digestão, o licor fraco (licor com baixo teor de aluminato de sódio) provém de três grandes tanques localizados na Digestão I, também chamada de Área 30A, e deve ter uma concentração de soda cáustica definida. Dos tanques 30A, o licor é bombeado para os aquecedores tubulares do prédio 30 (030-TC-02 ao 030-TC-10), mistura-se com a polpa de bauxita em um tubulão (*header*), prosseguindo para uma nova série de aquecedores tubulares (030-TC-11A/B/C/D/E/F, 12A/B/C/D/E/F, 13A/B/C/D/E/F). Os aquecedores 11, 12 e 13 aquecerão a mistura licor + polpa até as condições de processo com o uso de vapor vivo (vapor da caldeira), onde o vapor cede energia ao licor, condensando-o (ROCHA, 2018).

Na unidade II de Digestão, o licor não sofre qualquer tipo de pré-aquecimento. Este é misturado com a polpa de bauxita para, então, ser aquecida em uma série de aquecedores tubulares (ROCHA, 2018). O licor do TQ-30A é misturado à polpa do TQ-25A e, juntos, são aquecidos em aquecedores tubulares verticais até a temperatura de processo.

Para que esta sequência ocorra, a mistura passa por um conjunto de *flash tanks* que gradualmente, reduzem a pressão do licor nas condições do digestor para a atmosférica, enquanto, geram vapor regenerativo, utilizado para o aquecimento de polpa de bauxita e licor das refinarias (HANEMAN e WANG, 2012). Em consequência disso, a temperatura do material reduz, e a concentração tanto de materiais solúveis quanto de sólidos da mistura

(produto da digestão), aumenta. Essa corrente de sólidos e licor rico em alumina é então, encaminhada para a área da Clarificação, prosseguindo com as etapas do Processo Bayer.

3.3. TROCADORES DE CALOR TUBULAR

Segundo Felício (2012), os trocadores de calor podem ser usados em uma variedade de aplicações, por exemplo, em aquecedores de ar, sistemas de ar-condicionado, indústrias alimentícias, indústrias químicas, processos de aciaria e produção de potência em usinas.

A classificação dos trocadores de calor dá-se de acordo com a Figura 6.

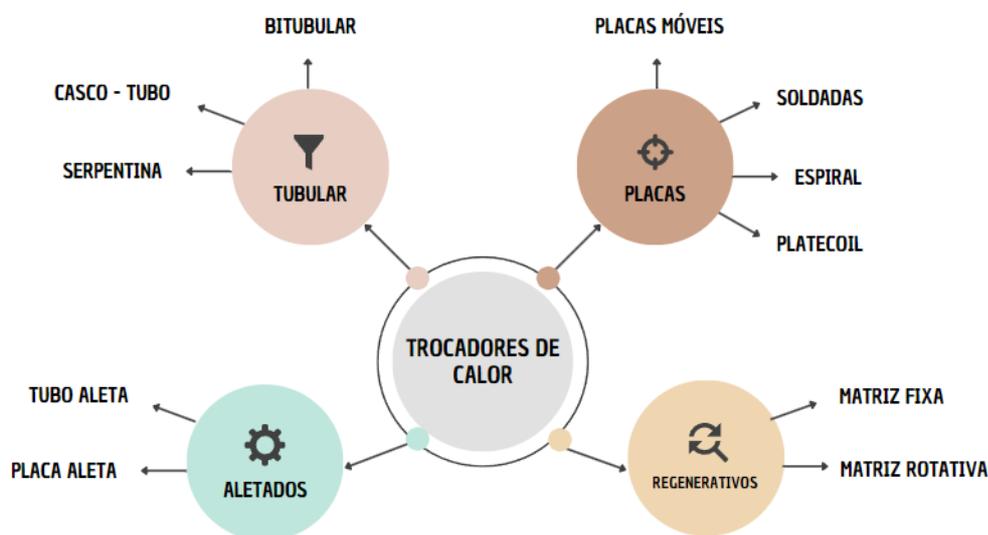


Figura 6: Fluxograma de classificação dos principais tipos de trocadores de calor.

Fonte: Adaptado de Çengel (2012).

Trocadores de calor tubulares são construídos de tubos circulares. Dois fluxos percorrem o interior e por fora dos tubos. Felício (2012) cita que existem diversos atributos que podem ser atribuídos a um trocador de calor, tais como: diâmetro dos tubos, número de tubos, comprimento, distância entre os tubos e o arranjo destes tubos.

Segundo Santos (2017), os trocadores de calor tubulares podem ser classificados como:

a) Trocador de calor de tubo duplo

Um típico trocador de calor de tubo duplo consiste em tubos colocados concentricamente dentro de outro tubo de maior diâmetro, com um fluido de uma temperatura passando pelo tubo de menor diâmetro e um fluido de temperatura diferente passando pelo tubo de maior diâmetro Tubos (DA SILVA e KONRATH, 2019). Felício (2012) afirma que estes modelos de trocadores de calor de tubo duplo podem ser desenvolvidos em série ou paralelo para atender a perda de carga e a temperatura adequada do projeto. O tubo interno pode ser único ou com vários tubos, conforme mostrado na Figura 7.



Figura 7: Exemplo de um trocador de calor de tubo duplo.
Fonte: Adaptado de Kakaç (2002).

b) Trocador de calor tipo casco e tubo

Este trocador de calor é construído com tubos montados dentro de grandes carcaças cilíndricas. Um dos fluidos passa por dentro dos tubos e o outro entre a carcaça e os tubos. A Figura 8 apresenta o esquema de um trocador de calor multitubular com os respectivos componentes construtivos do mesmo.

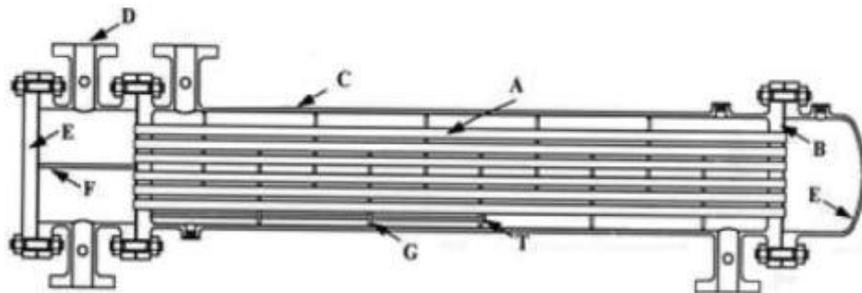


Figura 8: Representação esquemática de um trocador de calor do tipo multitubular.
Fonte: Adaptado de Silva Júnior (2016).

A apresentação deste pode ser descrita como (FELÍCIO, 2012; ÇENGEL, 2012):

- A – Tubos: Componentes básicos, onde ocorre a troca de calor entre os fluidos interno e externo;
- B – Espelhos: Elementos de fixação das extremidades dos tubos do trocador de calor;
- C – Casco: Componente por onde circulará o outro fluido, ela é que define o diâmetro das chicanas. É dentro do casco que estão os feixes de tubos, as chicanas e os tirantes;
- D – Bocais do casco: Elemento que dá acesso ao fluido passar para o interior do trocador de calor;
- E – Cabeçotes: Controla e orienta o escoamento no feixe de tubos;
- F – Chicanas longitudinais – Promove a multiplicidade de passagens das correntes dos fluidos no trocador;

G – Chicanas: dão sustentação ao feixe de tubos, diminuem os efeitos das vibrações e auxiliam no aumento de troca térmica.

c) Trocador de calor tipo serpentina

A configuração de um trocador de calor de serpentina é composta de uma ou mais serpentinas alinhadas em um invólucro. Onde, conforme Silva Júnior (2016), este tipo de trocador de calor apresenta maior taxa de transferência de calor do que um trocador de tubo duplo e tem a vantagem de poder acomodar uma superfície maior em um espaço menor, conforme destacado. A Figura 9 apresenta o esquema de um trocador de calor do tipo serpentina.



Figura 9: Modelo de uma serpentina fabricada em material cobre e conexões nas extremidades.
Fonte: Adaptado de Biyik (2015).

3.4. INCRUSTAÇÃO

Incrustação (*fouling*) é qualquer tipo de depósito em escala indesejável na superfície de transmissão de calor que aumente significativamente as resistências à transferência de calor e ao escoamento, aumentando, também, a perda de carga sobre o fluido e reduzindo, com o passar do tempo, o desempenho térmico e hidráulico dos trocadores (BARALDI, 2011).

A partir da incrustação é possível a definição de índices de acompanhamento do nível de *fouling* emergente em tubos de trocadores de calor, o qual pode variar conforme o arranjo de disposição dos tubos conforme configuração dos trocadores de calor.

A norma TEMA (2007) dispõe de quatro tipos de configurações para a disposição dos tubos em um trocador de calor de casco e tubo, por exemplo, arranjos triangular de 30°, triangular de 60°, quadrado de 90° e quadrado de 45° (Figura 15 a-d, respectivamente). A distância entre os centros de tubos adjacentes é denominada de arranjo ou passo, PT (*pitch*). A

diferença entre o passo e o diâmetro externo do tubo é a abertura, C (FELÍCIO, 2012). Estes arranjos podem ser melhor observados na Figura 10 (a-d).

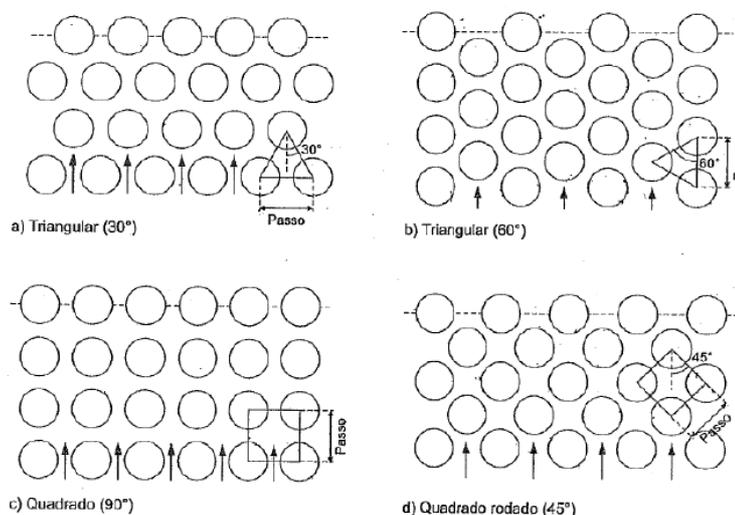


Figura 10: Arranjo de tubos dispostos em um trocador de calor, conforme norma TEMA: a) arranjo triangular (30°), b) arranjo triangular (60°), c) arranjo quadrado (90°) e d) arranjo quadrado rodado (45°).

Fonte: Adaptado de Araújo (2002).

Segundo Baraldi (2011) a natureza da incrustação em um determinado processo influencia significativamente o projeto do trocador de calor, a escolha do material e a programação da limpeza e manutenção. Segundo Araújo (2002), recomenda-se que, se o fator de incrustação do fluido no lado do tubo for menor que $0,00053 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$, utiliza-se tubos com diâmetro externo de $\frac{3}{4}$ ".

Cabe lembrar que a incrustação aumenta com o aumento da temperatura e com a diminuição da velocidade do fluido). Portanto, o índice de incrustação depende, principalmente, do tempo em que o trocador está em operação (tempo de campanha), da natureza do fluido (matéria-prima) e velocidade de escoamento; as altas velocidades retardam a formação de depósitos devido ao arraste destes pelo fluido.

3.5. ANÁLISE DE TROCADORES DE CALOR EM OPERAÇÃO

Em Incropera (2014) encontram-se dois métodos para a análise dos trocadores de calor: média logarítmica das diferenças de temperatura (ΔT_{ML}) e o método da efetividade (ϵ).

Para calcular o desempenho de um trocador é necessário relacionar a taxa total de transferência de calor, as temperaturas de entrada e saída dos fluidos, o coeficiente global de transferência de calor e a área total disponível para a troca térmica.

Segundo Incropera (2014), a troca de calor dos fluidos no trocador de calor dá-se durante a passagem do fluido quente pela entrada de calor quente, este cede calor para o

fluido frio, que por sua vez, absorve o calor cedido durante esta passagem. Em um sistema livre de perdas, isolado e um sistema ideal, os calores cedidos e absorvidos pelos fluidos quente e frio são os mesmos.

Pode-se utilizar as equações 1 e 2 que apresentam formulações para a obtenção da taxa de transferência de calor entre os dois fluidos de trabalho.

$$q = m_q * c_{p,q}.(T_{q,e.} - T_{q,s}.) \quad (1)$$

$$q = m_f * c_{p,f}.(T_{f,e.} - T_{f,s}.) \quad (2)$$

Onde os índices q e f , referem-se aos fluidos quentes e frios, e e s representam a entrada e a saída nesta ordem. As vazões das correntes são definidas como m , C_p é a capacidade calorífica e T as temperaturas (BARALDI, 2011).

A diferença de temperatura (ΔT) entre os fluidos quente e frio é dada pela Equação 3:

$$\Delta T = T_q - T_f \quad (3)$$

No entanto, a diferença de temperatura varia em função da posição no trocador de calor; do mesmo modo, deve-se usar a seguinte fórmula (Equação 4) para a taxa de transferência de calor por calor sensível (BARALDI, 2011):

$$q = U * A * \Delta T_{ml} \quad (4)$$

Onde ΔT_{ml} trata-se de uma média logarítmica das temperaturas e varia com o tipo de escoamento (Equação 5).

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_{sai} - \Delta T_{ent}}{\ln \frac{\Delta T_{sai}}{\Delta T_{ent}}} \quad (5)$$

3.6. TROCADOR DE CALOR COM ESCOAMENTO PARALELO E CONTRAFLUXO

Para análise de trocadores de calor, torna-se necessário o cálculo do potencial térmico (ΔT_{ml}) médio ΔT através da média logarítmica da diferença de temperatura, o qual depende do tipo de escoamento (CECCO, 2017).

Os fluidos, de um modo geral, em um trocador de calor, sofrem variações de temperatura que não são lineares com o comprimento. Em cada ponto entre a entrada e saída do trocador de calor, estes assumem valores diferentes. Ao longo do tubo pode-se usar a temperatura média logarítmica (BARALDI, 2011).

Para trocadores de calor com tipo de arranjo paralelo, os dois fluidos entram do mesmo lado do equipamento e escoam paralelamente em direção à saída, transferindo calor ao longo do caminho, a diferença de temperatura é maior na entrada, mas diminui ao longo de x , como mostrado na Figura 11 (INCROPERA, 2014).

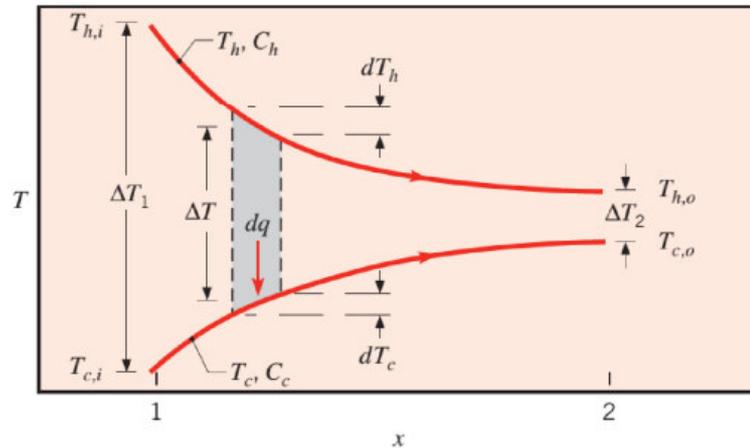


Figura 11: Trocador de calor operando com correntes paralelas.
Fonte: Adaptado de Çengel (2012).

As distribuições de temperaturas dos fluidos quente e frio associados ao trocador de calor com escoamento contracorrente estão mostradas na Figura 12.

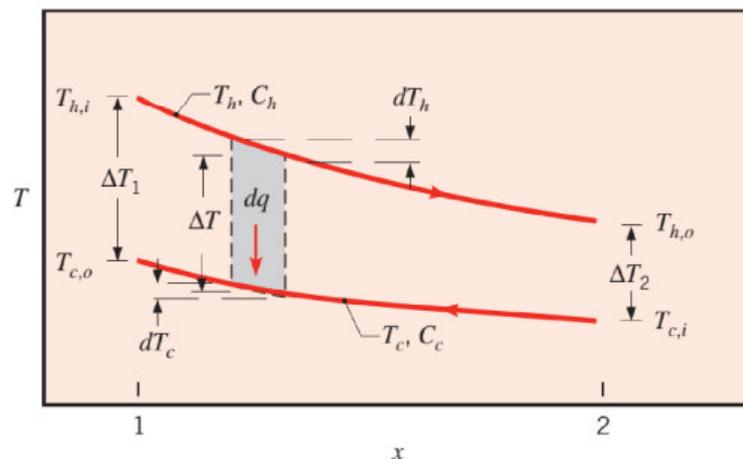


Figura 12: Trocador de calor operando com correntes em contrafluxo.
Fonte: Adaptado de Çengel (2012).

Na configuração contrafluxo, ao contrário do escoamento paralelo, a troca de calor ocorre entre as parcelas mais quentes dos dois fluidos em uma extremidade, e as mais frias na outra extremidade (INCROPERA, 2014).

A efetividade (ϵ) é definida como uma razão entre a taxa real de transferência de calor e a taxa máxima de transferência de calor (Equação 6).

$$\varepsilon \equiv \frac{q}{q_{max}} \quad (6)$$

A máxima taxa de transferência de calor possível é expressa pela Equação 7.

$$q_{max} = C_{min} * (T_{q,ent} - T_{f,ent}) \quad (7)$$

Para definir a efetividade de um trocador de calor, deve-se em primeiro lugar determinar a taxa de transferência de calor máxima possível q_{max} em um trocador. Essa taxa de transferência de calor poderia, em princípio, ser alcançada em um trocador de calor contracorrente com comprimento infinito. Em tal trocador de calor, um dos fluidos apresentaria a máxima diferença de temperaturas possível ($T_{q,ent} - T_{f,ent}$) (PAULA, 2017).

O produto mc_p é definido como a taxa de capacidade térmica ou calorífica (C) descrita na Equação 8.

$$C = m * c_p \quad (8)$$

O número de unidades de transferência (NUT) é um parâmetro adimensional utilizado para a análise de trocadores de calor, definido de acordo com a Equação 9 (CECCO, 2017):

$$NUT \equiv \frac{U * A}{C_{min}} \quad (9)$$

Foram desenvolvidas equações que determinam de forma específica a relação efetividade-NUT.

Para trocadores de calor com escoamento em paralelo tem-se na Equação 10:

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{[-NTU * (1 + C_r)]}}{1 + C_r} \quad (10)$$

Este se aplica para qualquer trocador de calor com escoamento paralelo, independentemente do fato da taxa de capacidade calorífica (C_r) mínima estar associada ao fluido quente ou ao fluido frio. De acordo com a Equação 11, tem-se:

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (11)$$

A efetividade (ε) em um trocador de calor de casco e tubo é dada pela Equação 12:

$$\varepsilon = 2 \left\{ 1 + c + \sqrt{1 + c^2} \frac{1 + \exp[-NTU * \sqrt{1 + c^2}]}{1 - \exp[-NTU * \sqrt{1 + c^2}]} \right\}^{-1} \quad (12)$$

3.7. MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE

A confiabilidade é definida como a probabilidade que um equipamento desempenhará satisfatoriamente a função para qual foi desenvolvido, durante um intervalo de tempo especificado e sob certas condições pré-determinadas (PATTON, 1994; XENOS, 1998).

A MCC (Manutenção Centrada em Confiabilidade, em inglês *Reliability Centered Maintenance* (RCM)) consiste em uma metodologia que visa determinar as tarefas adequadas a serem adotadas no plano de manutenção, a fim de garantir a manutenibilidade das funções específicas de cada dispositivo, equipamento ou instalação (ÁLVARES, SOUZA e FERNANDES, 2007).

Existem diferentes métodos para a classificação da manutenção voltada a confiabilidade. O modelo binário é o mais simples usado para representar a condição de um item ou sistema: em funcionamento ou em falha (FOGLIATTO, 2011). As quais caracterizam também como a manutenção planejada e não planejada. A manutenção não planejada envolve a degradação inesperada do desempenho do equipamento após uma falha. Já a manutenção planejada pode ser dividida em (Figura 13):

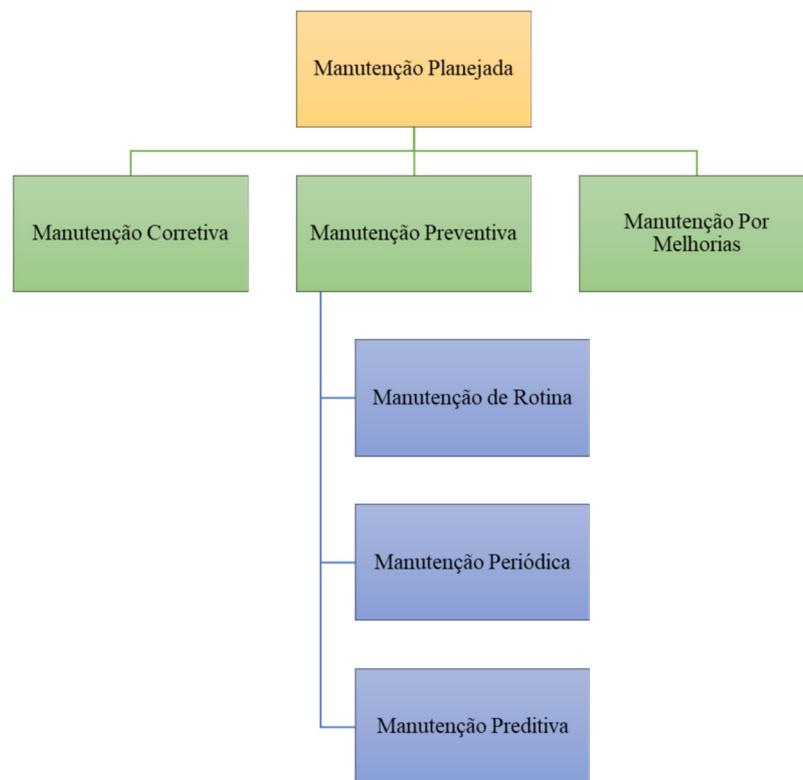


Figura 13: Métodos de Manutenção Planejada.

Fonte: Adaptado de Zaions (2003).

Segundo Ferrero *et. al.* (2002), a manutenção pode ser otimizada por meio de uma combinação equilibrada de três tipos de manutenções:

- i) preventiva, que pode estar diretamente relacionada à idade do equipamento ou à busca de falhas ocultas;
- ii) preditiva, diretamente relacionado à condição do equipamento, também conhecido como preventivo baseado em inspeção;
- iii) corretiva, para falhas aleatórias e identificação de itens executados para falha.

O que nos diz que, se os custos de uma manutenção preventiva forem maiores que o custo associado as perdas operacionais e ao reparo, a manutenção não é vantajosa (RAO *et. al.*, 1996).

Para tanto, quando se utiliza do MCC para estabelecer um método de manutenção adequado a cada organização e ativo, é necessário questionar resolução de problemáticas dos destes. As quais segundo Alvares, Souza e Fernandes (2007) utiliza-se o seguinte questionário (Tabela 1):

Tabela 1: Questionário para metodologia do MCC.

Questionário para metodologia do MCC
Quais as funções preservar?
Quais as falhas funcionais?
Quais os modos de falha?
Quais os efeitos das falhas?
Quais as consequências das falhas?
Quais as tarefas aplicáveis e efetivas?
Quais as alternativas restantes?

Fonte: Adaptado de Alvares, Souza e Fernandes (2007).

Estas problemáticas tornam-se a base para criação e desenvolvimento do método de manutenção eficaz voltada a confiabilidade do ativo/sistema.

Conforme corroboram Lafraia (2001) e ABNT (1994), a NBR 5462 define que a análise da confiabilidade é a avaliação probabilística de um sistema funcionar dentro de limites estabelecidos, não falhando durante determinado período em certas condições ambientais, visando proporcionar um bom desempenho funcional com baixo índice de falhas de um produto. Portanto, para determinar a probabilidade de sobrevivência de um sistema em

um determinado período, é necessário observar o comportamento da taxa de falhas modelado, usando o tempo até a parada do ativo (MACHADO e ANDRADE, 2013).

Isto pode ser feito com base na criação de estratégias de manutenção, que poderia adequadamente conduzir à disponibilidade e segurança pelos menores custos a operacionalidade dos ativos. Para tanto, várias ferramentas são utilizadas para a criação das estratégias como o FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*), é uma técnica que ajuda a identificar e priorizar falhas potenciais em equipamentos, sistemas ou processos na resolução do questionário já citado.

O FMEA é uma ferramenta que visa a identificação e análise dos modos e causas de falhas ocorrentes nos chãos de fábrica e posterior estudo das consequências destas falhas e adoção de medidas de manutenção (BACHEGA e LIMA, 2010), fornecendo recomendações para ações que visam evitá-las através de técnicas de manutenção (SMITH e KEITH, 2008).

Existem dois tipos de FMEA, de Processo e de Produto (ou Projeto), é descrita por Luft *et. al.* (2013), sendo ambas constituídas pelas mesmas etapas e executadas de mesma maneira, diferenciando-se somente quanto ao objetivo. Tem-se FMEA de Produto que considera possíveis falhas do produto dentro das especificações de projeto; FMEA de Processo que considera possíveis deficiências no planejamento e execução do processo, também relacionadas à especificação do projeto.

Os passos para criação do FMEA são descritos na Figura 14:



Figura 14: Passos simplificados para criação do FMEA.
Fonte: Adaptado de Schroeder (2020).

A identificação da função de cada componente, os respectivos modos potenciais de falha, os efeitos e as causas destes e, por consequência, a classificação dos graus de criticidade são resultados da aplicação da ferramenta de Análise de Criticidade e Modo de Efeito de Falhas (FOGLIATTO, 2011). Segundo Herpich e Fogliatto (2013), no âmbito da MCC, a identificação do efeito da falha conduz a uma classificação de criticidade do

componente como: (i) crítico, (ii) potencialmente crítico ou (iii) não crítico. Os autores também afirmaram que os itens críticos e potencialmente críticos devem ser incluídos nos programas de manutenção.

Onde, esta metodologia utilizada no MCC tornou-se muito importante por atender às novas exigências de mercado, como qualidade e durabilidade dos bens de consumo, bem como determinar as tarefas que devem ser adotadas no plano de manutenção de modo a garantir a confiabilidade e a segurança operacional dos equipamentos e instalações ao menor custo (ÁLVARES, SOUZA e FERNANDES, 2007).

Conforme cita Alkaim (2003), inúmeras falhas de um componente por mais simples, podem levar a incidentes desastrosos de grande repercussão que podem ser encontrados como:

- Amoco Cadiz – 1978 – Costa da França: Incidente com petroleiro, vazamento de petróleo;
- Chernobyl – 1986 – Ucrânia / União Soviética: incidente em usina nuclear;
- Bophal – 1987 – Índia: incidente em indústria de fertilizante (Union Carbide);
- Piper Alpha – 1988 – Inglaterra (Mar do Norte): incidente em plataforma de petróleo;
- Japão – 1999: Incidente em planta de reprocessamento de urânio;
- Baía de Guanabara – 2000 – Brasil: Incidente em oleoduto da Petrobrás
- P-36 – 2001 – Brasil: Incidente em plataforma de Petróleo

Estes incidentes ilustram o porquê a confiabilidade, disponibilidade, segurança e qualidade tornaram-se essenciais em todos os processos de desenvolvimento de qualquer produto. Incluindo, de forma direta a responsabilidade dos equipamentos disponibilizados dentro do processo de produção, como visa o estudo apresentado com base na confiabilidade de equipamentos de trocas térmicas empregados dentro do processo Bayer.

4. METODOLOGIA

Esta seção descreve a metodologia empregada neste estudo para alcançar os objetivos propostos. Considerando-se todas as etapas envolvidas neste projeto, realizou-se uma verificação dos problemas, onde poderá ser possível a realização de modificações no sistema de manutenção dos trocadores de calor, levando-se em consideração o sistema de troca térmica da digestão de uma planta de alumina.

Assim, a proposta metodológica deste trabalho segue o método de abordagem bibliográfica e dedutiva, procurando comparar os resultados da aplicação da fórmula de coeficientes de transferência de calor, que acompanham uma análise de desempenho dos trocadores de calor tipo casca e tubo por meio do sistema de troca térmica em contrapartida ao seu funcionamento mecânico (Figuras 15 e 16).

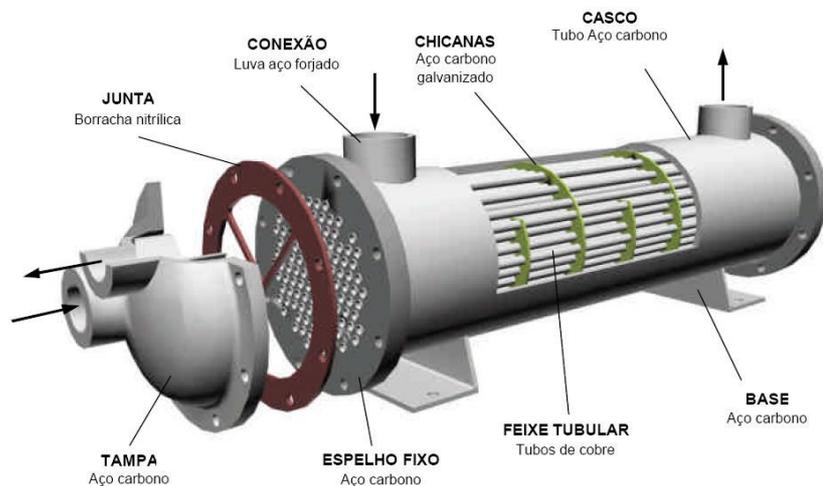


Figura 15: Vista explodida de trocador de calor do tipo casca-tubos
Fonte: Adaptado de Fiorillo e Martins (2010).



a)

b)

Figura 16: Imagem ilustrativa dos trocadores de calor do tipo casca e tubo utilizados na multinacional: a) modelo completo com casca a mostra e b) modelo com tubos e flange a mostra.

Fonte: Adaptado do site Termo-Tek (2022).

Com os dados de funcionalidade dos trocadores de calor, poderá ser apresentado os índices de impacto na manutenção destes, tais como: temperatura de trabalho do sistema de troca térmica, índice de incrustação e custos de manutenção dos ativos. Os quais, corroboraram para a criação do FMEA (Análise de Modos e Efeitos de Falhas), ferramenta essencial para desenvolvimento das estratégias de manutenção, desenvolvida sob três etapas (FOGLIATTO, 2011):

Etapa 1: Estudar a estratégia da empresa, escolher o processo e elaborar seu fluxograma;

Etapa 2: Preencher a planilha da FMEA de processo definindo as seguintes variáveis: operação, os modos, efeitos e causas potenciais de falha, os controles de prevenção e detecção para, por fim, calcular o risco através das notas atribuídas às variáveis;

Etapa 3: Recomendar ações para os itens de maior risco.

Tendo como análise apresentada neste trabalho, a consolidação da estratégia de manutenção no sistema de excelência de confiabilidade REX na planta de alumina será implementada para o sistema de aquecimento térmico de licor + polpa de bauxita da digestão.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. GERENCIAMENTO DO SISTEMA DE TROCAS TÉRMICAS

Atualmente, a referida organização apresenta o próprio sistema de gestão e análise de ativos, baseados em *softwares* que mantêm ativos com rotas de manutenção e estratégias de que corroboram com o bom funcionamento das atividades destes equipamentos. Assemelhando-se a empresas cujos focos de produção também se trata de extração de alumina. Tais organizações possuem áreas como sistemas de trocas térmicas dos mais complexos aos mais simples, dependendo do foco de produção de alumina.

Assim, durante os anos de 2021 a 2022, surgiu a necessidade através da superintendência de área, de um estudo de confiabilidade do sistema de troca térmica, para que o impacto de falha deste sistema seja evitado ao ponto deste cenário não impactasse 50% na produção de alumina. Uma vez que as Bancadas de Trocadores de Calor, são em três onde 2 (duas) operam e 1 (uma) fica em *spare* (Figura 17), suportando as duas linhas de produção (Digestão I e II) da empresa (etapa 1).

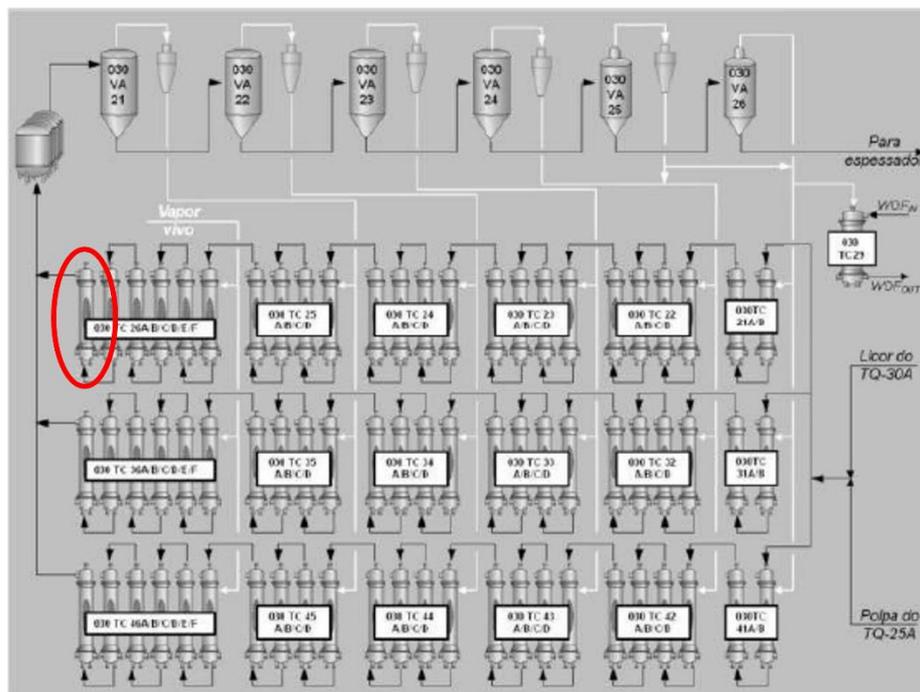


Figura 17: Bancadas de aquecedores: esquema de aquecimento de um licor fraco da digestão II.
Fonte: Retirada de Rocha (2018).

Bancada 1: 030 TC 21A/B → 030 TC 22A/B/C/D → 030 TC 23A/B/C/D → 030 TC 24A/B/C/D → 030 TC 25A/B/C/D → 030 TC 26A/B/C/D/E/F.

Bancada 2: 030 TC 31A/B → 030 TC 32A/B/C/D → 030 TC 33A/B/C/D → 030 TC 34A/B/C/D → 030 TC 35A/B/C/D → 030 TC 36A/B/C/D/E/F.

Bancada 3: 030 TC 41A/B → 030 TC 42A/B/C/D → 030 TC 43A/B/C/D → 030 TC 44A/B/C/D → 030 TC 45A/B/C/D → 030 TC 46A/B/C/D/E/F.

Com base em histórico de associação de nível de criticidade do processo, e dos equipamentos, trocadores de calor tubulares, vasos de flash, tanques, bombas e demais itens presentes dentro do sistema. Traçou-se o desafio de mensuração de índices, por exemplo, incrustação, coeficientes de troca térmica, análise de falhas, que corroborassem a implementação de estratégias de manutenção no sistema de dados da organização o EBS (*Oracle*), com implementação de estratégia de manutenção no padrão internacional da subsidiária da organização: EMS (*Equipment Management Strategies*).

5.2. SISTEMA DE TROCADORES DE CALOR DA DIGESTÃO

O processo de trocas térmicas provenientes da área 30A (Digestão I) pode ser entendido com base no esquema apresentado na Figura 18.

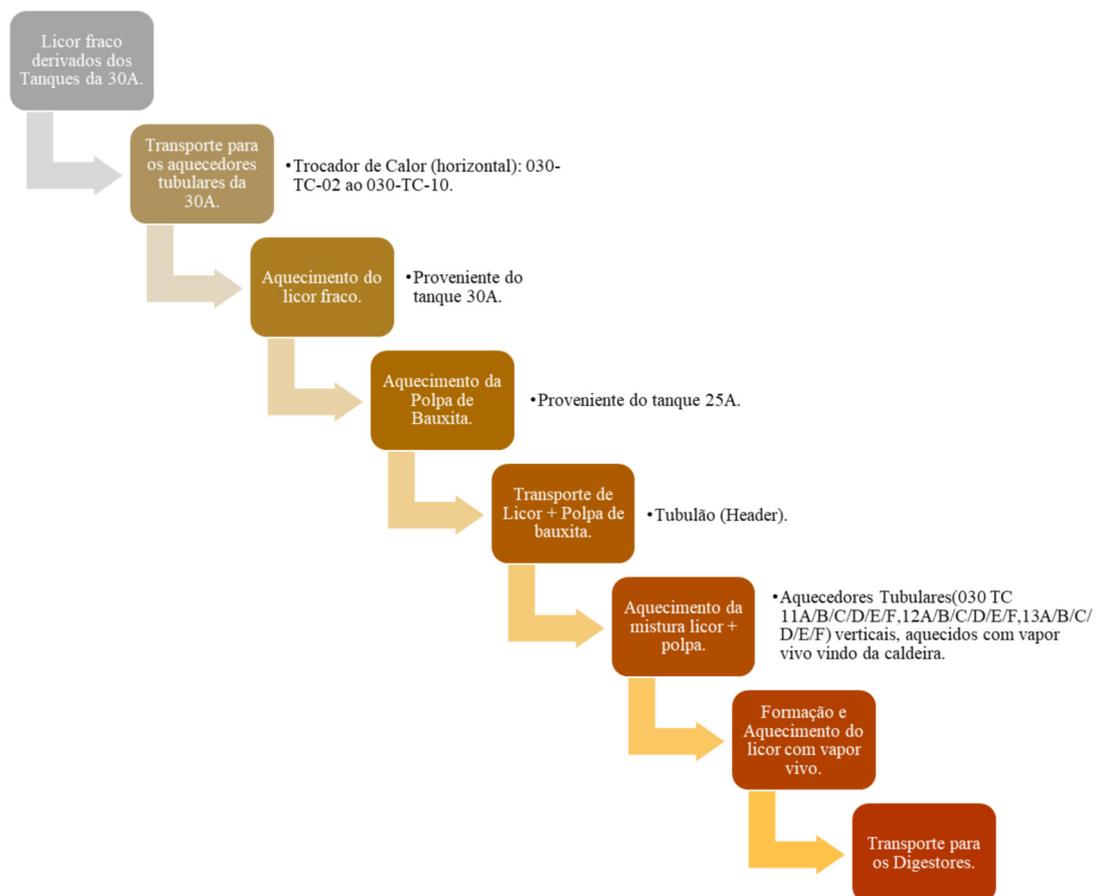


Figura 18: Esquema descritivo do Processo de mistura de licor + polpa de bauxita na digestão.
Fonte: Adaptado Manual do Processo Bayer por autora (2022).

A mistura do licor + polpa de bauxita compreende a fase crucial de troca de densidade dos fluidos dentro do sistema de troca térmica. Neste ponto, ao aquecer-se a mistura a troca de densidade do fluido do licor contendo água (999 kg/m^3) e soda cáustica com percentual de pureza de aproximadamente $\geq 98\%$ (2130 kg/m^3) com a polpa de bauxita, mesclam-se em fluxo paralelo até determinado ponto de processo em que o resultado deste é o refinamento de um fluido chamado de licor fraco que contém baixo particulado de alumina. Contudo esta combinação por possuir densidade superior a um fluido comum como água, ou vapor, forma pontos de incrustação, a exemplo tem-se: a Figura 19, com incrustação de licor com pasta de bauxita em uma tampa de saída de um Lavador (Clarificação) e a Figura 20, que caracteriza a incrustação em trocadores de calor.



Figura 19: Tampa de saída de um lavador com sinais de incrustação.
Fonte: Adaptado por autora (2022).

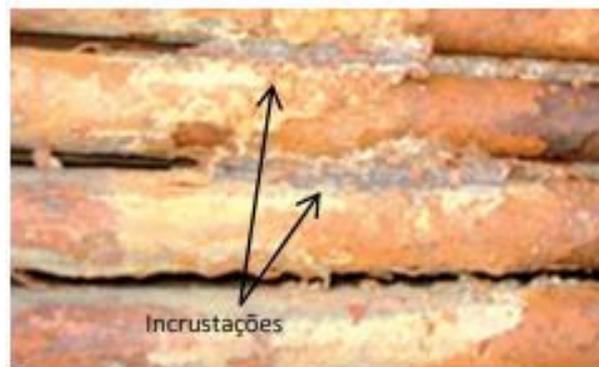


Figura 20: Incrustações em tubos de aquecedor tubular.
Fonte: Adaptado de Costa *et. al.* (2014).

Os níveis de incrustação dos trocadores de calor são parametrizados de acordo com a performance de rendimento térmico dos trocadores de calor, bem como, a composição química da bauxita se esta apresenta muita sílica ou não. Quando a bancada de aquecedores é

visualizada dentro da tela de análise interna da empresa com percentual abaixo de 70%, ocorre diminuição de fluxo dos fluidos para os trocadores (Figura 21).

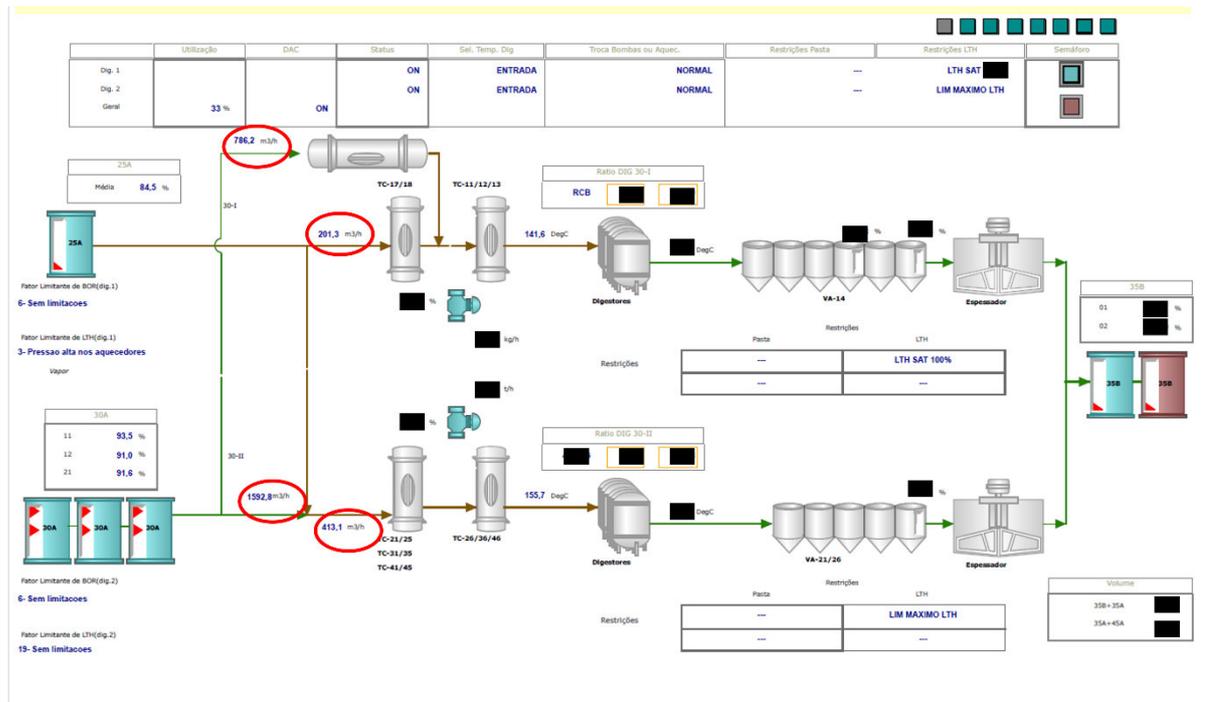


Figura 21: Tela de funcionamento da Digestão.
Fonte: Adaptado por autora (2022).

Neste esquema da área 30 pode-se visualizar os aquecedores tubulares de 2 tipos, basicamente. Os aquecedores horizontais da Unidade 1 de Digestão são tubulares, do tipo casco e tubos. Os aquecedores verticais são compostos por vários “U” conectados uns aos outros, também de casco e tubos. A diferença está na quantidade de tubos e número de passes: na digestão 1, os passes são múltiplos e os aquecedores possuem mais tubos. Na unidade 2, o passe é simples e o trocador possui menos tubos (ROCHA, 2018). Isto se dá pela diferença de densidade do fluido transportado, onde o licor fraco por ter densidade maior e capacidade de trocas térmicas e evaporação maior é transportado em trocadores de calor com um quantitativo de feixes tubulares maiores (Figura 22).



Figura 22: Feixe tubular de um trocador de calor industrial
Fonte: Adaptado de Fiorillo e Martins (2010).

Atingindo estes níveis baixos de processo, inspeções visuais (trincas, furos, vazamentos, nível de incrustação) na bancada de trocador de calor são feitas (Figura 23) e para ser mensurado o nível de incrustação. Assim, são levantados e apresentados aos engenheiros de processo que por sua vez acionam a Equipe de Processo da Digestão (colaboradores que monitoram e analisam a performance do sistema das áreas), para alinhamento de programação de manutenção da bancada de trocadores de calor (Figura 24).



Figura 23: Disposição dos trocadores de calor em bancada.
Fonte: Adaptado por autora (2022).



Figura 24: Bancada de trocadores de calor.
Fonte: Adaptado por autora (2022).

O licor usado e a polpa de bauxita, após serem aquecidos nos respectivos trocadores, são bombeados para os digestores, onde o processo de extração será concluído. Neste processo, é importante salientar que tanto o vapor regenerado dos vasos de flash quanto vapor vivo são utilizados. O objetivo é que a mistura polpa + licor seja aquecida até 153 °C na entrada dos digestores. Logo, pode-se ter a seguinte relação de trocas térmicas (Tabela 2):

Tabela 2: Relação de temperaturas para as trocas térmicas na área da Digestão.

	ΔT_{ent} (°C)	ΔT_{sai} (°C)
Licor	20 °C	108 °C
Polpa de bauxita	25 °C - 30 °C	97 °C
Licor Fraco	153 °C	

Fonte: Adaptado por autora (2022).

É importante salientar que conforme a troca de temperatura do fluido do processo Bayer acontece a mudança de temperatura do equipamento utilizado na respectiva etapa do processo. Na área da digestão, não seria diferente, pois o material utilizado para a aplicabilidade do sistema de troca térmica em uma planta de alumina é regido por normas específicas, para trocadores de calor a norma TEMA é seguida como regra de segurança para NR 13.

A TEMA (Associação de Fabricação de Trocador Tubular) é uma norma de padronização de construção mecânica dos trocadores de calor tubulares, que leva em consideração três classes de trocadores de calor de casco tubo, sendo estes: R, C e B (FIORILLO e MARTINS, 2010). A classe R é utilizado para processamento de petróleo, por exemplo, já a classe B é utilizada em processamento químico e a classe C, a mais comum, é utilizada na indústria em geral (THULUKKNAM, 2013).

Os trocadores de calor são considerados vasos de pressão, pois estes são reservatórios não sujeitos à chama, que contenham qualquer fluido em pressão manométrica igual ou superior a 103 kPa (1,05 kgf/cm²) (FIORILLO e MARTINS, 2010). Segundo o autor, a NR 13 (BRASIL, 2008) todo vaso de pressão deve possuir, no estabelecimento onde estiver instalado, a seguinte documentação devidamente atualizada:

a) Folha de dados do Vaso de Pressão, a ser fornecido pelo fabricante, contendo as seguintes informações:

- Código de projeto e ano de edição;
- Especificação dos materiais;
- Procedimentos utilizados na fabricação, montagem e inspeção final e determinação da PMTA;
- Conjunto de desenhos e demais dados necessários para o monitoramento da vida útil do mesmo;
- Características funcionais;
- Dados dos dispositivos de segurança;
- Ano de fabricação;
- Categoria do vaso.

b) Registro de Segurança;

c) Projetos de Instalação;

d) Projetos de Alteração ou Reparo;

e) Relatórios de Inspeção.

5.3. DESENVOLVIMENTO DA MCC (MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE).

Por se tratar de uma fábrica com mais de 40 anos de operação e referência mundial na produção de alumina, os dados de base (descritos segundo NR 13) não foram disponibilizados para o estudo, onde a expertise de trabalho com os trocadores de calor é dada a partir do histórico de manutenção das peças/itens. Portanto, sabe-se que os trocadores de calor possuem os seguintes dados:

- Condições de Pressão do Processo na Digestão: 450 a 500 kPa.
- Temperatura de operação no casco: 150 °C (entrada) e 120 °C (saída);
- Temperatura de operação no tubo: 40 °C (entrada) e 90 °C (saída);
- A classe desse trocador é B.

Os custos principais do prédio onde estão localizados os trocadores de calor dá-se principalmente por meio de:

- Troca de Tubos: ASTM A-214 - NBR 5585 – compra trimestral;
- Limpeza dos Trocadores de Calor – sazonalidade dependente do sistema de troca;
- Manutenção não programada;

Tais itens, podem ser expressos com base nos dados de custo por prédio e seu respectivos ativo cada atividade (Figura 25).

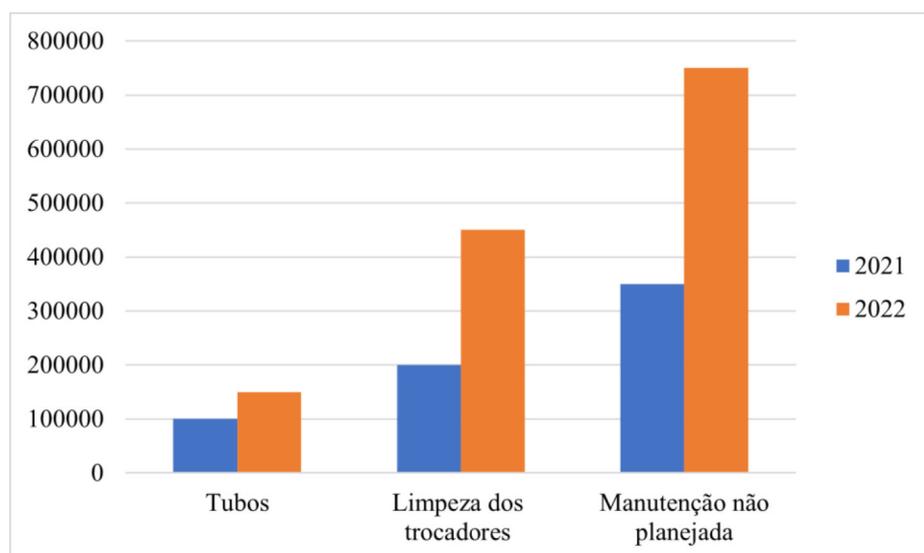


Figura 25: Consumo do prédio de troca térmica dos trocadores de calor da Digestão.
Fonte: Adaptado por autora (2022).

Tais dados foram mensurados a partir do quantitativo base de consumos retirados do controle feito pela coordenadora de planejamento das contratadas que disponibilizaram os boletins de medições de trabalho para realização de atividade de limpeza dos trocadores de calor e a coordenadora de área que apresentou o compilado de gastos com manutenção não planejadas e materiais com compra trimestral.

O histórico de falhas deste sistema, um dos itens principais listados dentro do estudo, dá-se a partir do histórico de indisponibilidade das linhas de produção da fábrica. Um dado de caráter sigiloso que não pode ser apresentado neste estudo, porém visto o histórico de manutenção não programadas existentes na área, pôde-se criar a Estratégia de Manutenção da área 030 (Digestão) dos trocadores de calor espelhada a Estratégia de manutenção da Área de Troca Térmica 040 (Anexo A), responsável por resfriar o licor verde que vai da Clarificação (tanque 35A) para a Precipitação (tanque 45A). Pois os aquecedores, no caso da área 040, possuem a mesma configuração mecânica da área 030, ambos são trocadores de calor tubular de casca e tubo.

Concluiu-se a partir da análise de custos, que o crescimento dos custos de manutenção dos ativos da área de troca térmica, bem como, a análise de falhas criada internamente pelos engenheiros da empresa (Figura 26), são pontos de partida que justificam a criação da estratégia de manutenção. Visto, que o principal objetivo desta, é a adequação e eficácia da confiabilidade dos ativos de toda Refinaria para implementação de planos de manutenção que envolvem a produção de alumina.

Análise das Falhas Funcionais (AFF)		
SISTEMA: Digestão		
Preparado por: Equipe DIGESTAO	Data: 13/08/2022	Rev.: 00
Descrição: SISTEMA RESPONSÁVEL PELO AQUECIMENTO DO LICOR E PASTA DE BAUXITA		
Funções: I. TROCA TERMICA ENTRE O LICOR E PASTA DE BAUXITA VINDA DO SISTEMA DE MOAGEM. II. TRANSFERENCIA DOS FLUIDOS DENTRO DAS CONDICÕES DE FLUXO E TEMPERATURA		
Falhas Funcionais: I.1. NÃO REALIZAR A TROCA TERMICA II.1. REALIZAR A TROCA TERMICA ABAIXO DO NECESSARIO III. 2. NÃO TRANSFERIR FLUXO PARA A CLARIFICAÇÃO IV.2. TRANSFERIR FLUXO ABAIXO DO NECESSARIO		
Subsistemas: VASOS DE FLASH AQUECEDORES BOMBAS DE LICOR VERDE BOMBAS DE LICOR FRACO BOMBAS DE CONDENSADO SISTEMA DE VACUO BOMBA DE POÇO		

Figura 26: Análise das Falhas Funcionais (AFF).
Fonte: Adaptado por autora (2022).

Para a implementação da estratégia de manutenção voltada a confiabilidade do sistema, um conjunto de passos foram seguidos pela equipe envolvida no projeto:

- Reuniões com a equipe de manutenção de área, equipe de estratégia de manutenção REX, operadores, engenheiros de processos e engenheiros de manutenção;
- Criação de um banco de dados dos ativos: documentação, data book, desenhos, rastreios de TAGs (número de identificação dos ativos) e número de estoques para as peças dos ativos;
- Análises de falha dos ativos;
- Análise de custo voltado a manutenção corretiva.

A partir destas informações montou-se um cronograma de atividades para apresentação dos dados coletados que validasse a construção da estratégia de manutenção EMS, com as atividades descritas no seguinte fluxograma (Figura 27).

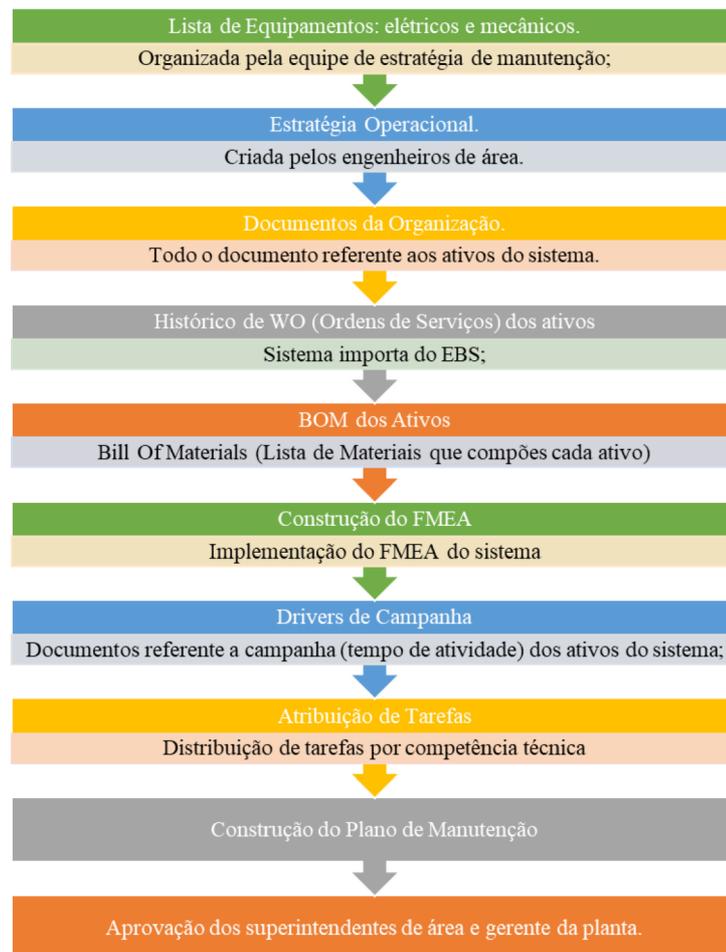


Figura 27: Esquema de Construção da Estratégia de Manutenção EMS.
Fonte: Adaptado por autora (2022).

Dado a obtenção dos documentos necessários para a estratégia de manutenção e o mapeamento dos equipamentos existentes em área (Tabela 3). É possível a mensuração dos modos potenciais de falhas e as respectivas Ocorrências, as quais relacionam-se com a probabilidade da causa ocorrer. Foram encontradas para os aquecedores 11 possíveis causas que foram medidas em uma escala de Ocorrência de 1 a 10. De acordo com Fogliatto (2011), emprega-se 1 para “falhas muito improváveis” e 10 para “falhas quase inevitáveis”, seguindo a mesma lógica para as escalas intermediárias. Para esta análise contou-se com o auxílio da equipe operacional de fábrica, que detém o conhecimento da dinâmica do chão da mesma (Tabela 3).

Tabela 3: Ativos do /sistema de trocas térmicas na área da Digestão.

Ativos do sistema de trocas térmicas da 030
Vasos de <i>Flash</i>
Aquecedores Tubulares (Digestão I)
Bombas de Licor Fraco
Sistema de Vácuo
Bomba de Poço

Fonte: Adaptado por autora, 2022.

Após a mensuração dos valores de Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D), torna-se possível obter o fator Risco (R), obtido por meio da Equação 13 (CHAVES *et. al.*, 2020):

$$R = S * O * D \quad (13)$$

A partir deste fator foi possível a consolidação da etapa dois de preenchimento do FMEA (Anexo B), o qual será utilizado para construção da estratégia de manutenção do sistema de aquecimento da digestão, bem como, a estratégia implementada para os Digestores da área 030, descrita na Figura 28.

Número da estratégia	Sistema	Subsistema	Função	Elaborado por	Data	Componentes
EMS-SL-030-1892	Digestores	Bombas		Equipe Digestão	15/09/2022	

Figura 28: Modelo adaptado de FMEA retirado do EMS.
Fonte: adaptado por autora (2022).

Para recomendar ações (etapa 3), toda a planilha da FMEA foi analisada. Notou-se a severidade dos equipamentos conhecidos como aquecedores, cujo modo de falha pode ser

detectado a partir de anomalias no sistema de bancadas de trocadores de calor, dados por ocorrência de trocas térmicas.

Para tanto, um dos fatores contribuintes podem ser a obstrução dos tubos, devido ao seu nível de incrustação de $0,00080 \text{ (m}^2\text{*K)/W}$ avaliado em tela de controle da Digestão apresentados na Figura 21. Assim, a comprovação de obstrução dá-se a partir da parada do prédio de aquecimento. Isso poderá gerar um efeito de parada de produção, que possui uma escala de Severidade de nível 4, que possui uma Ocorrência de nível 3 (CHAVES, et. Al. 2020). Para que isso não ocorra, um controle de prevenção e aplicação de planos de manutenção com controle de detecção é o ideal para a estruturação de nível de efetividade do sistema térmico, o que garantirá a confiabilidade do sistema a partir da estratégia de manutenção adotada (ANEXO C).

6. CONCLUSÕES

Este estudo foi elaborado, visando contribuir para uma sistemática de implementação da Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) dos sistemas de trocas térmicas, com base na análise de confiabilidade dos trocadores de calor da área da Digestão.

A frente dos objetivos propostos neste trabalho, concluiu-se que a confiabilidade aplicada aos trocadores de calor são focos de desenvolvimento de oportunidades de melhoria no sistema de aquecimento térmico e preparação do licor fraco utilizado dentro do processo Bayer. Ao ponto que se destaca a análise de custos como um dos itens cruciais para evidenciar a necessidade de criação da estratégia de manutenção, vistos que os anos de 2021 e 2022 validaram essa informação dos custos, sendo possível evidenciar o crescimento das despesas com a compra de materiais de construção (tubos), visto o aumento dos preços das ligas metálicas nacionalmente, bem como, o aumento com a limpeza de área, em decorrência também de manutenções não programadas, que só são realizadas a partir da limpeza do local.

Para tanto, a aplicação de ferramentas como a FMEA a sistemas de aquecimento térmico mostra que o planejamento de sistemas de manutenção tradicionais pode ser otimizado, utilizando diversas técnicas de manutenção adequadas e melhorando o desempenho e custos com base na análise e classificação de graus de risco e criticidade de instrumentos, visando minimizar os riscos e impactos de falhas no sistema, o que pode gerar uma considerável perda de produção.

A versatilidade da metodologia aplicada a estratégia de manutenção voltada a confiabilidade de sistemas de trocas térmicas e as soluções propostas, permitem a aplicação desta a praticamente qualquer tipo de equipamento industrial de sistemas de aquecimento térmico. A implementação desses procedimentos nos trocadores de calor será realizada a partir de uma parada de manutenção da planta, a qual está prevista para o primeiro trimestre de 2023 e contará com o apoio de uma equipe de engenheiros de manutenção, que analisará os resultados descritos para subsidiar a tomada de decisões.

Desse modo, foi possível entender com base neste estudo, com mais conhecimentos técnicos e um melhor desenvolvimento profissional, o que reafirma o cuidado com as medidas de precaução, além de corroborar com o impacto positivo das estratégias na confiabilidade dos sistemas térmicos de produção de alumina.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apesar dos resultados terem mostrado que o estudo dos trocadores de calor foi indispensável para a construção da estratégia de manutenção, esta necessita de aprofundamento para a melhor apresentação dos planos de manutenção e aumento de níveis de confiabilidade ao sistema de aquecimento da Digestão. Assim, é sugerido a construção dos desenhos técnicos da configuração atual dos trocadores de calor, bem como de suas bancadas, para a visualização e posteriormente modelagem do térmico da área 30.

Alinhado a aplicação da estratégia de manutenção voltada para confiabilidade, é sugerido múltiplas análises de indicadores de sistema, que utilizem de forma remota a índices de desempenho térmico e mecânico dos trocadores de calor. Tais como de análises de estudo termográficos do sistema de aquecimento, feitos com a utilização de câmeras termográficas. Seria um ponto a mais para a validação da periodicidade de manutenção dos trocadores de calor. Uma vez que tendo esses dados em sistema interno (intranet), alinhados a uma rápida inspeção visual não comprometeria a segurança dos operadores (inspetores), por ser uma área de temperatura muito elevada chegando a 50° C, bem como, facilitaria a tomada de decisão dos engenheiros para aumento ou diminuição de fluxo de produção de alumina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL. **Fundamentos do Alumínio e suas Aplicações**. São Paulo, Associação Brasileira do alumínio (ABAL), 2012. Disponível em: <http://www.abal.org.br>. Acesso em: 10 jul. 2022.

ALKAIM, João Luiz. **Metodologia para incorporar conhecimento intensivo às tarefas de manutenção centrada na confiabilidade aplicada em ativos de sistemas elétricos**. 2003. 239 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/85335/194153.pdf?sequence=1&isAll> owed=y. Acesso em: 11 nov. 2022.

AGUIRRE, Marcos. **Recuperação de metais a partir da lama vermelha**. 2015. 136 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/7239/TeseMA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 25 jul. 2022.

ALCOA. Disponível em: http://www.alcoa.com/brazil/pt/custom_page/hotsites/timelineAlumar/inicial.swf. Acesso em: 10 jul. 2022.

ÁLVARES, A. J.; SOUZA, R. Q., FERNANDES, L. P. **Análise FMEA Para Aplicação da Metodologia de Manutenção Centrada em Confiabilidade**: Estudo de Caso em Turbinas Hidráulicas. In: CAIP - CONGRESSO INTERAMERICANO DE COMPUTAÇÃO APLICADA À INDÚSTRIA DE PROCESSOS, 8., 2007, Assunção, Paraguai. Anais... Assunção, Paraguai: CAIP, 2007

ALVES, Álvaro Antônio de Moraes. **Extração de alumina - uma avaliação dos parâmetros influentes**. 2017. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Processos, Universidade Federal do Pará, Belém, 2017. Disponível em: <https://ppgpe.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/Dissertacao2017-PPGEP-MP-AlvaroAntonioDeMoraesAlves.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2022.

ARAÚJO, E. C. C. **Trocadores de Calor**. São Carlos: EdUFSCar, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5462: Confiabilidade e Mantenabilidade. Rio de Janeiro, 1994. 37 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12235: armazenamento de resíduos sólidos perigosos: procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

BACHEGA, S. J.; LIMA, A. D. **Uso da Análise de Modo e Efeitos de Falha (FMEA) como apoio à redução do lead time do processo de orçamentação**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 30., 2010, São Carlos. Anais... São Carlos: ABEPRO, 2010.

BARALDI, Aline. **Monitoramento do desempenho térmico de trocadores de calor duplo tubo de uma placa slurry**. 2011. 43 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/38558/000823814.pdf>. Acesso em: 28 de maio de 2022.

BIYIK, E. *et al.* **Heat exchanger applications in wastewater source heat pumps for buildings: A key review.** International Journal of Energy and Buildings, v. 104, p. 215 – 232, out. 2015. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815301250>. Acesso em: 28 de maio de 2022.

BONATTO, F.; HOLZMANN, H. A.; DALLAMUTA, J. **Engenharias mecânicas e industrial: Gestão e simulação.** Ponta Grossa: Atena, 2018. p-145.

CECCO, Gabriel Mattedi. **Avaliação do comportamento do coeficiente global de um trocador de calor tipo serpentina em função dos parâmetros operacionais.** 2017. 74 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017. Disponível em: https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/17._avaliacao_do_comportamento_do_coeficiente_global_de_um_trocador_de_calor_tipo_serpentina_em_funcao_dos_parametros_operacionais.pdf. Acesso em: 27 maio 2022.

ÇENGEL, Yunus A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática.** Tradução da 3ª ed. Americana. São Paulo: McGraw-Hill, 2012.

CERVEIRA, D. S.; SELBITTO, M. A. Manutenção centrada em confiabilidade (MCC): análise quantitativa de um forno elétrico a indução. **Revista Produção Online**, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 405–432, 2015. DOI: 10.14488/1676-1901.v15i2.1615. Disponível em: <https://producaoonline.org.br/rpo/article/view/1615>. Acesso em: 13 dez. 2022.

CHAVES, Bianca Michels et al. Aplicação da metodologia FMEA em um processo de uma indústria metalúrgica. **Revista Tecno-Lógica**, [S.L.], v. 24, p. 308-316, 4 set. 2020. APESC - Associação Pro-Ensino em Santa Cruz do Sul. <http://dx.doi.org/10.17058/tecnolog.v2i0.15749>.

CONSTANTINO, V. R. L *et al.* **Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático.** Química Nova. v. 25, n. 3, p. 490-498, 2001.

COSTA, Rodrigo Cardoso *et al.* Avaliação da resistência a corrosão de revestimentos metálicos depositados por aspersão térmica a arco: uma aplicação em trocadores de calor. **Soldagem & Inspeção**, [S.L.], v. 19, n. 4, p. 292-301, dez. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si1904.02>.

DA SILVA, Marcos Junior; KONRATH, Rodrigo. Dimensionamento de um trocador de calor com a reutilização do ar quente de digestores. **Revista Tecnológica** / ISSN 2358-9221, [S.l.], v. 9, n. 1, p. 164 - 185, 2019. ISSN 2358-9221. Disponível em: <https://uceff.edu.br/revista/index.php/revista/article/view/328>. Acesso em: 26 jul. 2022.

FARRERO, J. C. *et al.* **Optimization of replacement stocks using a maintenance programme derived from reliability studies of production systems.** Industrial Management & Data Systems, v. 102, n. 4, p. 188-196, 2002.

FELÍCIO, Rafael Souza. **Dimensionamento de trocadores de calor aplicados à refrigeração da água do molde de um processo de lingotamento contínuo.** 2012. 1 CD-ROM. Trabalho de conclusão de curso - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/118994>. Acesso em: 28 maio 2022.

FIORILLO, David; MARTINS, Paulo Nascimento. **Comissionamento de trocadores de calor do tipo casco e tubos**. 2010. 145 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Condicionamento/Comissionamento, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010. Disponível em:

https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/david_fiorillo_e_paulo_nascimento_martins.pdf. Acesso em: 25 jul. 2022.

FOGLIATTO, F. S. **Confiabilidade e manutenção industrial**. 2011. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2011. CDD: 620.00452. CDU: 62-7.

GALLO, Gabriela. LEAL, Lucas Ferreira. D'AMELIO, Monica Tais Siqueira. Estudo e desenvolvimento de um reator CSTR. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. ed. 10, v. 05, p. 05-28. 2019. ISSN: 2448-0959. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-quimica/estudo-e-desenvolvimento>. Acesso em: 10 jul. 2022.

GUT, Jorge Andrey Wilhelms. **Configurações ótimas para trocadores de calor a placa**. 2003. 268 p. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Disponível em: teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-22102003-093322/publico/Tese_Jorge_A_W_Gut.pdf. Acesso em: 25 jul. 2022.

gut, T. *et al.* **The application of single stream digestion at Votorantim Metis/CBA refinery**. Proceedings of the 35th International ICSOBA Conference. Hamburg: [s.n.]. 2015.

HANEMAN, B.; WANG, A. **Optimising digestion flash tank design for the alumina industry**. Proceedings of the 9th international alumina quality workshop. Perth: [s.n.]. 2012. p. 127-131.

HERPICH, C., & FOGLIATTO, F. S. **Aplicação de FMECA para definição de estratégias de manutenção em um sistema de controle e instrumentação de turbogeradores**. Iberoamerican Journal of Industrial Engineering, 70-88. 2013.

HOBMEIR, Maykel Alexandre. **Simulação numérica em trocadores de calor de tubos circulares e elípticos**. 2004. 42 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004. Disponível em: http://servidor.demec.ufpr.br/CFD/monografias/2004_Maykel_Hobmeir_trabalho_graduacao.pdf. Acesso em: 20 nov. 2022.

HYDRO. **Desafios relacionados à lama vermelha**. Disponível em <http://www.hydro.com/pt/Aluminio/A-Hydro-no-Brasil/Nosso-futuro/Meioambiente/Gestao-de-recursos/>. Acesso em: 10 jul. 2022.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7. ed. rev. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

ISHIYAMA, E. M., Coletti, *et al.* **Impact of deposit ageing on thermal fouling: Lumped parameter model**. *AIChE Journal*, v. 56, n. 2. p. 531-545, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/aic.11978>. Acesso em: 25 jul. 2022.

KAKAÇ, S. **Heat exchangers: selection, rating and thermal design**. Florida: CRC PRESS, 2002. Ed.2 p.501.

KIMMERLE F. M. **Introduction to Bayer Process**: In Course Bayer Process. Barcarena, Alunorte, 2004

KOTTE, J. J. **Bayer Digestion and Predigestion Desilication Reactor Design. Light Metals**. Chicago: [s.n.]. p. 331-349, 1981.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás, 2001.

LÓPEZ, Dennis Paúl Paz. **Simulação computacional de cfd de um pequeno trocador de calor de casco e tubo**. 2017. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energias, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2017. Disponível em: file:///D:/glauc/Downloads/TCC%20-%20Dennis%20Paul%20Paz%20Lopez.pdf. Acesso em: 24 out. 2022.

LUFT et al. **FMEA: aplicação no setor de engenharia em uma metalúrgica**. In: SEMANA INTERNACIONAL DAS ENGENHARIAS DA FAHOR, 3., 2013, Horizontina. Anais... Horizontina: Faculdade Horizontina, 2013.

MACFIE, R.; CARNEIRO, J. R. **Noções Gerais Sobre o Processo Bayer**. Ouro Preto: ALCAN, 1993.

MACHADO, A.; ANDRADE, J.J.O. Emprego da confiabilidade para o estabelecimento de estratégias de manutenção na indústria metal-mecânica. In: Encontro Nacional De Engenharia De Produção, 33., 2013, Salvador. Anais... Salvador: ABEPRO, 2013.

PATTON, Joseph D. **Maintainability and Maintenance Management**. New York: Instrument Society of America, 1994. 452 p.

PAULA, Filipe Fernandes de. **Transferência de Calor. Juiz de Fora, MG**. 2017. Notas de aula. 63 slides. Disponível em: <https://mecufjf.files.wordpress.com/2017/04/aula16-mec0101.pdf>. Acesso em: 25 de maio de 2022.

PINTELON, L.; NAGARUR, N.; VAN PUYVELDE, F.. Case study: rem ⚙️: yes, no or maybe?. **Journal Of Quality In Maintenance Engineering**, [S.L.], v. 5, n. 3, p. 182-192, 1 set. 1999. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/13552519910282638>. Acesso em: 10 jul. 2022.

RAO, P. N., SRIKRISHNA, S., YADAVA, G. S. Reliability-centred maintenance applied to power plant auxiliaries. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 2, n. 1, p. 3-14, 1996.

ROCHA, Luiz. Departamento de Tecnologia e Processo. **Descritivo do Processo Bayer e da Refinaria Alumar**. São Luis: Alumar, 2018. 189 p.

RODRIGUES, Daniel de Araújo Costa. **Modelagem do processo de autoprecipitação de gipsita em decantadores do processo Bayer**. 2018. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/25289/1/DanielDeAraujoCostaRodrigues_DISSERT.pdf. Acesso em: 10 jul. 2022.

ROSA, Rodrigo da Silva; STULZER, Adriano Matielo. **Trocador de calor bitubular**. 2009. 100 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química e Petróleo, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015.

SAMAL, S; RAY, A. K.; BANDOPADHYAY, A. **Proposal for resources, utilization and processes of red mud in India a review**. International Journal of Mineral Processing, v. 118, p. 43-55, 2013.

SANTOS, Eduardo dos. **Avaliação de um trocador de calor de tubos concêntricos, contracorrente para aquecimento de dejetos suínos**. 2017. 71 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade Horizontina, Horizontina, 2017. Disponível em: <https://www.fahor.com.br/publicacoes/TFC/EngMec/2017/EduardodosSantos.pdf>. Acesso em: 27 maio 2022.

SCHROEDER, Tobias. **Os 7 passos da estrutura do FMEA AIAG & VDA**. 2020. Disponível em: <https://blog.softexpert.com/7-passos-estrutura-fmea-aiag-vda/>. Acesso em: 11 nov. 2022.

SILVA Júnior, J. A. **Análise de um trocador de calor tipo serpentina de uma planta de hipoclorito de sódio**. 2015. 49 f. Trabalho de conclusão de curso - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

SILVA, Moacy Pereira da. **Controle Preditivo em Rede Aplicado a um Trocador de Calor Casco-Tubos**. 2010. 110 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Coordenadoria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/3255>. Acesso em: 10 jul. 2022.

TEMA. **Tubular Exchanger Manufacturers Association**. New York, NY, EUA, 2007.

TERMO-TEK. **Trocador de calor tipo casco e tubo: vantagens e características**. 2022. Disponível em: <https://www.termotek.com.br/trocador-calor-tipo-casco-tubo>. Acesso em: 25 jul. 2022.

THULUKKANAM, K. **Heat exchanger design handbook**. 2nd ed. New York: CRC, 2013.

TROCADOR DE CALOR. **Trocador de Calor**. 2022. Disponível em: <https://www.trocadordec calor.com.br/>. Acesso em: 25 jul. 2022.

VALLE, Rômulo Ornellas do. **Determinação da taxa de Incrustação em Trocadores de Calor com o Auxílio de Métodos de Otimização**. 2012. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufjrj-pem_upl/THESIS/28/pemufjrj2012mscromuloornellasdovalle.pdf. Acesso em: 25 jul. 2022.

XENOS, Harilaus G. **Gerenciamento da Manutenção Produtiva**. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1998.

WILLOTT, Ruth H. *et. al.* **Mutations in Troponin that cause HCM, DCM AND RCM: what can we learn about thin filament function?**. Journal Of Molecular And Cellular Cardiology, [S.L.], v. 48, n. 5, p. 882-892, maio 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.yjmcc.2009.10.031>.

ZAIONS, Douglas Roberto. **Consolidação da metodologia de manutenção centrada em confiabilidade em uma planta de celulose e papel**. 2003. 219 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3297/000385443.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 nov. 2022.

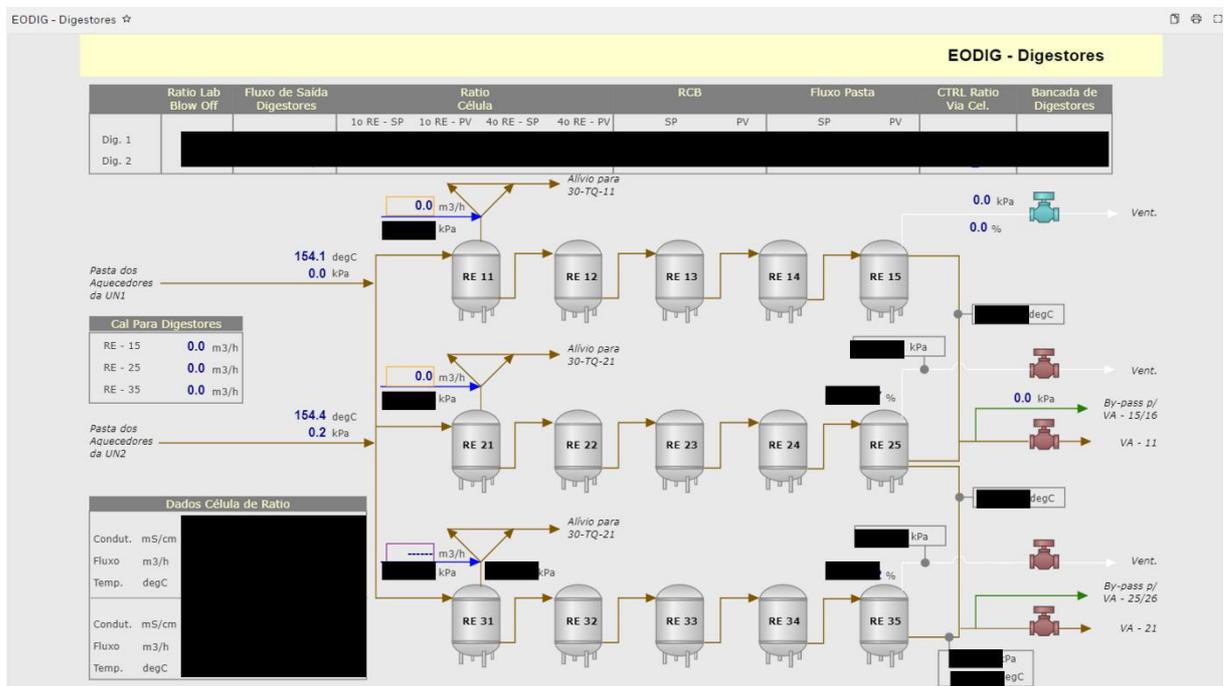
ANEXO A < ESTRATÉGIA 030>

/ Building 030 / Equipment Management Strategy Bancada de Digestores 030 EMS-SL-030-1892-REV-9

Function

Os digestores são tanques cilíndricos verticais, agindo como reatores que possuem o topo abaulado e a parte inferior cônica. Isto porque o processo obtém várias reações químicas, com uma quantidade variáveis

Scope And Boundaries



Included Equipment Assets

KEY ASSETS

Asset Number	Asset Description	Criticality
DIGS-DIGR-030-RE-012	DIGESTOR CONFAB	CRITICAL HAS BACKUP
DIGS-DIGR-030-RE-013	DIGESTOR CONFAB	CRITICAL HAS BACKUP
DIGS-DIGR-030-RE-014	DIGESTOR CONFAB	CRITICAL HAS BACKUP
DIGS-DIGR-030-RE-011	DIGESTOR CONFAB	CRITICAL NO BACKUP
DIGS-DIGR-030-RE-015	DIGESTOR CONFAB	CRITICAL NO BACKUP

DIGS-DIGR-030-RE-021	DIGESTOR CONFAB	CRITICAL NO BACKUP
DIGS-DIGR-030-RE-022	DIGESTOR CONFAB	CRITICAL NO BACKUP
DIGS-DIGR-030-RE-024	DIGESTOR CONFAB	CRITICAL NO BACKUP
DIGS-DIGR-030-RE-025	DIGESTOR CONFAB	CRITICAL NO BACKUP

OTHER ASSETS

Asset Number	Asset Description	Criticality
--------------	-------------------	-------------

Operating Strategy

s

Operating and Availability Parameters

s

PERFORMANCTRACKING TAGS

Key Asset	Online Tag	<Type>	Limit	Rate Tag	Type	Limit
-----------	------------	--------	-------	----------	------	-------

FMEA

Ctrl+Click here to view the FMEA for this Strategy

Campaign Drivers and Service Intervals

Equipment or Route	Campaign Driver	Campaign Key Task	Nominal Interval>	Asset Activity
--------------------	-----------------	-------------------	-------------------	----------------

Residual Life

Activity Number	Activity Description	Nominal Interval
-----------------	----------------------	------------------

On-Line Equipment Management

ASSIGNED DEPARTMENT

Activity Number	Activity Description	Task	Nominal Interval	FMEA Reference

Off-Line Equipment Management

ASSIGNED DEPARTMENT

Activity Number	Activity Description	Task	Nominal Interval	FMEA Reference

Spares Strategy

SN	Description	Item Type	Min	Qty
----	-------------	-----------	-----	-----

Related Documents

Document Number	Document Description

ANEXO C < ESTRATÉGIAS DO EMS >

Equipment Management Strategies (EMS)

EMS-SL-030-1892 **Rev. 9** Bancada de Digestores 030

Strategy Under Revision Not Yet Submitted for Approval

Assigned To: [REDACTED]

Strategy Level

Cover Page

Delete Strategy EMS-SL-030-1892 Rev. 9

Summary

Strategy Title
Bancada de Digestores 030

Site
SÃO LUÍS

Department
SÃO LUÍS DIGESTÃO

Building
030

Asset Function
Os digestores são tanques cilíndricos verticais, agindo como reatores que possuem o topo abaulado e a parte inferior cônica. Isto porque o processo obtém várias reações químicas, com uma quantidade variáveis

Battery Limit Description
,

Key Assets

Edit Key Assets

DIGS-DIGR-030-RE-011	DIGESTOR CONFAB
DIGS-DIGR-030-RE-012	DIGESTOR CONFAB
DIGS-DIGR-030-RE-013	DIGESTOR CONFAB
DIGS-DIGR-030-RE-014	DIGESTOR CONFAB
DIGS-DIGR-030-RE-015	DIGESTOR CONFAB
DIGS-DIGR-030-RE-021	DIGESTOR CONFAB
DIGS-DIGR-030-RE-022	DIGESTOR CONFAB
DIGS-DIGR-030-RE-024	DIGESTOR CONFAB
DIGS-DIGR-030-RE-025	DIGESTOR CONFAB

Drawings

Image

- [Cover Page](#)
- [Equipment List](#)
- [Operating Strategy](#)
- [Company Documents](#)
- [Current Asset Activities](#)
- [Work Order History](#)
- [Strategy BOM](#)
- [FMEA Build](#)
- [Campaign Drivers](#)
- [Task Assignment](#)
- [PM Builder](#)
- [EMLT Meeting/Sign-Off](#)
- [Approvals](#)
- [Strategy on a Page](#)

Alcoa REX-IT

Equipment Management Strategies (EMS)

⏪
▶

Assigned To: [REDACTED]

Strategy Level 🔍

EMS-SL-030-1991 **Rev. 2**

Grupo de vasos de Flashes e Blow off da Digestão I e II

Strategy Under Revision Not Yet Submitted for Approval

[Delete Strategy EMS-SL-030-1991 Rev. 2](#)

Cover Page

Summary

Strategy Title
Grupo de vasos de Flashes e Blow off da Digestão I e II

Site
SÃO LUÍS

Department
SÃO LUÍS DIGESTÃO

Building
030

Asset Function
...

Battery Limit Description
...

Key Assets

Edit Key Assels	
BLDG-DIGR-030-PI-001	DIGESTAO/FLASHS/AQUECEDORES
GRP-DIGR-VESS-030-VA-01	GRUPO DE VASSOS FLASHES E BLOW O...
GRP-DIGR-VESS-030-VA-02	GRUPO DE VASSOS FLASHES E BLOW OF...
SYST-DIGR-030-U1	DIGESTAO UNIDADE 1
SYST-DIGR-030-U1-U2	DIGESTAO UNIDADES 1 E 2
SYST-DIGR-030-U2	DIGESTAO UNIDADE 2

Drawings

[REDACTED]

Image

- 🔒 [Cover Page](#)
- 🔒 [Equipment List](#)
- 🔒 [Operating Strategy](#)
- 🔒 [Company Documents](#)
- 🔒 [Current Asset Activities](#)
- 🔒 [Work Order History](#)
- 🔒 [Strategy BOM](#)
- 🔒 [FMEA Build](#)
- 🔒 [Campaign Drivers](#)
- 🔒 [Task Assignment](#)
- 🔒 [PM Builder](#)
- 🔒 [EMLT Meeting/Sign-Off](#)
- 🔒 [Approvals](#)
- 🔒 [Strategy on a Page](#)

[Download](#)