

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

SANDRO MAYOLO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM TROCADOR DE CALOR
DE AQUECIMENTO DE ÁGUA DE DESENGRAXE**

**CAXIAS DO SUL
2021**

SANDRO MAYOLO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM TROCADOR DE CALOR
DE AQUECIMENTO DE ÁGUA DE DESENGRAXE**

Relatório Final, apresentado como requisito à
conclusão do curso de Engenharia Mecânica
na Universidade de Caxias do Sul.
Área de Concentração: Engenharia Térmica
Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini

**CAXIAS DO SUL
2021**

SANDRO MAYOLO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM TROCADOR DE CALOR
DE AQUECIMENTO DE ÁGUA DE DESENGRAXE**

Relatório Final, apresentado como requisito à
conclusão do curso de Engenharia Mecânica
na Universidade de Caxias do Sul.
Área de Concentração: Engenharia Térmica

Aprovado em __/__/____.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Marcos Alexandre Luciano
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Camila Baldasso
Universidade de Caxias do Sul

Aos meus pais, Reni e Mario (In Memoriam),
que sempre me incentivaram a buscar o
conhecimento. À minha Esposa Tainara, meu
porto seguro, e a meu filho Theo.

RESUMO

O pré-tratamento em uma linha de pintura *e-coat* é fundamental para preparar a superfície do substrato que vai receber a pintura por eletrodeposição. Nesse processo é necessário observar vários parâmetros que servem de indicativo para uma boa qualidade final na peça, um dos quais é a temperatura da água de desengraxante, que deve estar em torno de 65 °C (± 2 °C) para que consiga desengordurar as peças e garantir uma boa aderência do fosfato de ferro, para posterior pintura. Este trabalho avaliou o sistema de aquecimento da água de desengraxante de um tanque com volume de 79 m³, com o objetivo de diminuir o tempo de aquecimento da temperatura em torno de 40 °C até a temperatura de trabalho, que é em torno de 65 °C, com foco no trocador de calor, avaliaram-se duas situações, condição atual com a configuração de 14 placas no trocador de calor e área de troca térmica de 2,6 m², e a condição proposta com o aumento do número de placas para 23, o que alterou a área de troca térmica para 4,4 m². Para avaliação do trocador de calor, foram estimadas as vazões de entrada e saída do trocador de calor por meio das curvas características das bombas de desengraxante e da água quente a 90 °C proveniente da caldeira, para ambas as condições. Os dados de pressão e temperatura foram medidos nos equipamentos já instalados no sistema, com auxílio de manômetros e termômetros. Com os dados obtidos, foram calculados os coeficientes globais de transferência de calor pelo método da diferença de temperatura média logarítmica, sendo que para a condição atual obteve-se o valor de 6897 W/m²·K e 7463 W/m²·K na condição com trocador de calor com mais placas. Na efetividade térmica do trocador de calor se observou uma melhora de 0,48 para 0,63. No comparativo da rampa de aquecimento da condição atual para o teste, teve-se uma diferença de 45 minutos, na condição atual foram necessárias 7h30min para chegar ao *setpoint* de 65 °C, já na condição de trocador com mais placas foram necessárias 6h45min. Como pode-se observar através dos dados apurados de coeficiente convectivo, efetividade térmica e tempo de aquecimento da água de desengraxante, houve uma melhora em todos os aspectos, especialmente por ter sido alcançado uma redução de 10% no tempo de aquecimento, que também reflete na redução do consumo de gás combustível na caldeira e um aumento de produtividade.

Palavras-chave: Água de desengraxante, aquecimento, trocador de calor, linha de pintura *e-coat*.

Área de conhecimento: Engenharia Térmica.

ABSTRACT

Pre-treatment in an e-coat painting line is essential to prepare the surface of the substrate that will receive the electroplated paint. In this process, it is necessary to observe several parameters that serve as an indication of a good final quality in the part, one of which is the degreasing water temperature, which should be around 65 °C (± 2 °C) to be able to degrease the parts and ensure good adhesion of iron phosphate, for subsequent painting. This work evaluated the degreasing water heating system of a tank with a volume of 79 m³, with the objective of reducing the heating time from the temperature around 40 °C to the working temperature, which is around 65 °C, focusing on the heat exchanger, two situations were evaluated, current condition with the configuration of 14 plates in the heat exchanger and heat exchange area of 2.6 m², and the condition proposed with the increase in the number of plates for 23, which changed the heat exchange area to 4.4 m². To evaluate the heat exchanger, the inlet and outlet flows of the heat exchanger were estimated through the characteristic curves of the degreasing pumps and the hot water at 90 °C from the boiler, for both conditions. Pressure and temperature data were measured in equipment already installed in the system, with the aid of pressure gauges and thermometers. With the data obtained, the global heat transfer coefficients were calculated using the logarithmic mean temperature difference method, and for the current condition the values of 6897 W/m² · K and 7463 W/m² · K in the condition were obtained with heat exchanger with more plates. The thermal effectiveness of the heat exchanger showed an improvement from 0.48 to 0.63. In the comparison of the heating ramp of the current condition for the test, there was a difference of 45 minutes, in the current condition it took 7h30min to reach the setpoint of 65 °C, whereas in the heat exchanger condition with more plates it took 6h45min. As can be seen from the data calculated on the convective coefficient, thermal effectiveness and heating time of the degreasing water, there was an improvement in all aspects, mainly for having been reached a reduction of 10% in the heating time, which also reflects in the reduction of gas fuel consumption in the boiler and an increase in productivity.

Keywords: Degreasing water, heating, heat exchanger, e-coat paint line.

Knowledge Areas: Thermal Engineering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas do processo de pintura por eletrodeposição.....	9
Figura 2 - Processo de ação de partículas tensoativas no desengraxe de peças	10
Figura 3 - Fotos microscópicas de um processo de fosfatização adequado e inadequado	11
Figura 4 - Configuração de eletrodeposição catódica e anódica	12
Figura 5 - Esquema do princípio da eletrodeposição catódica	13
Figura 6 - Composição do banho de e-coat	14
Figura 7 - Diagrama representativo do sistema de controle de pH	14
Figura 8 - Diagrama representativo da filtração e trocador de calor	15
Figura 9 – Diagrama representativo do processo de lavagem com ultrafiltrado	16
Figura 10 - Representação do sistema de ultrafiltração da tinta com membrana porosa	16
Figura 11 – Exemplo de janela de cura para processo de pintura e-coat.....	17
Figura 12 - Caldeira aquatubular	19
Figura 13 - Caldeira flamotubular ou fumotubular	19
Figura 14 - Trocador de calor tipo placas.....	21
Figura 15 - Diferentes arranjos de distribuição das correntes fluidas	22
Figura 16 - Fluxograma atual sistema aquecimento água de desengraxe.....	23
Figura 17 – Dimensões da carga por gancheira.....	24
Figura 18 – Vista frontal tanque de desengraxe	25
Figura 19 - Vista lateral do tanque de desengraxe.....	26
Figura 20 - Trocador de calor M10-MFM Alfa Laval.....	27
Figura 21 - Caldeira fumotubular CAD – HP 1500 Arauterm	29
Figura 22 – Desenho esquemático Caldeira CAD – HP 1500 Arauterm	30
Figura 23 – Tela supervisorio tanques desengraxe e enxague.....	31
Figura 24 – Tela supervisorio enxagues pós-fosfato de ferro e utilidades	32
Figura 25 – Gráfico comparativo entre rampas de aquecimento condição atual e test	34
Figura 26 – Curvas de desempenho do motor da bomba na condição original.....	37
Figura 27 – Curva característica da bomba na condição original.....	38
Figura 28 - Curvas de desempenho do motor da bomba na condição de teste.....	43
Figura 29 –Curva característica da bomba na condição de teste.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Característica da bomba de agitação do desengraxante.....	26
Tabela 2 - Característica da bomba de circulação do desengraxante no TC	28
Tabela 3 – Características da bomba de água quente	28
Tabela 4 – Dados coletados de rotação do motor da bomba	35
Tabela 5 – Dados coletados de corrente do motor da bomba.....	36

LISTA DE SIGLAS

ADR	Água desmineralizada reciclada.
ADN	Água desmineralizada nova.
UF	Ultrafiltrado.
NR-13	Norma Regulamentadora 13.
TC	Trocador de calor.
CAD-HP	Caldeira de aquecimento direta horizontal pressurizada.
NUT	Número de unidades de transferência.
DMTL	Diferença de temperatura média logarítmica
L	Litro

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	5
1.1	DESCRIÇÃO DA EMPRESA	5
1.3	OBJETIVO DO TRABALHO.....	6
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1	PROTEÇÃO ANTICORROSIVA POR ELETRODEPOSIÇÃO.....	8
2.1.1	Pré-Tratamento	9
2.1.2	Banho <i>E-coat</i>	11
2.1.2.1	Eletrodeposição anódica.....	12
2.1.2.1	Eletrodeposição catódica.....	13
2.1.3	Processo de lavagem	16
2.1.4	Processo de cura	17
2.2	CALDEIRAS.....	18
2.2.1	Caldeiras aquatubulares	18
2.2.2	Caldeiras flamotubulares.....	19
2.3	PROCESSO DE TROCA TÉRMICA	20
2.3.1	Trocador de calor a placas.....	20
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
3.1	CENÁRIO ATUAL DO SISTEMA DE DESENGRAXE	23
3.2	METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO TROCADOR DE CALOR.....	32
4.	AVALIAÇÃO DO TROCADOR DE CALOR	34
4.1	ESTIMATIVA DE VAZÃO DO DESENGRAXANTE.....	35
5.	CONCLUSÃO.....	49

REFERÊNCIAS	50
ANEXO A.....	53
ANEXO B.....	54
ANEXO C.....	55
ANEXO D.....	56
ANEXO E.....	57
ANEXO F.....	58
ANEXO G.....	59

1. INTRODUÇÃO

A troca de calor entre dois fluidos que estão em temperaturas diferentes e separados por uma parede sólida tem grande aplicação na engenharia. O equipamento utilizado para realizar esta troca é conhecido como trocador de calor, que pode ser aplicado tanto no aquecimento como no resfriamento de um determinado processo.

Neste trabalho foi avaliado um trocador de calor a placas, o qual integra um sistema de aquecimento de água de desengraxe em uma linha de pintura *e-coat* de estruturas de poltronas de ônibus e outros componentes. O trabalho faz parte da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul.

O trocador de calor estudado faz parte de um processo *e-coat*, mais especificamente no estágio de desengraxe por imersão. O sistema de aquecimento é constituído basicamente por uma caldeira fumotubular, bombas de recirculação, trocador de calor tipo placas, válvulas de controle de fluxo, sensores de temperatura e pressão, bem como painéis de instrumentação e comando, que fazem parte do objeto deste estudo.

Neste capítulo são apresentados a empresa, a justificativa e os objetivos a serem alcançados. O Capítulo 2 traz uma revisão dos assuntos que envolvem o trabalho, servindo como embasamento para tomadas de decisões. O Capítulo 3 descreve a situação atual do sistema de aquecimento, envolvendo os equipamentos de desengraxe por imersão, e a metodologia de avaliação do trocador de calor. O capítulo 4 é aplicado os conceitos termodinâmicos para avaliação do trocador de calor nas duas condições. O capítulo 5 apresenta uma conclusão sobre o trabalho realizado.

1.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

Fundada em 6 de agosto de 1949, a Marcopolo nasceu em Caxias do Sul - RS com o nome de Nicola e Cia. Ltda., e desde a sua fundação, os idealizadores da Marcopolo traçaram uma meta: investir de forma contínua em aprimoramento, tecnologia e expansão. A empresa abriu suas portas com oito sócios e quinze funcionários, e foi uma das primeiras indústrias brasileiras a fabricar carrocerias de ônibus.

Atualmente, a Marcopolo é referência no desenvolvimento de soluções para o transporte coletivo nos cinco continentes. A marca se consolidou pela tradição de qualidade e

inovação dos seus produtos, concebidos para atender as necessidades dos clientes e as demandas dos mercados onde atua.

O trabalho foi desenvolvido junto ao Departamento de Manutenção da empresa que é responsável por garantir a disponibilidade dos equipamentos da linha de pintura *e-coat*. Os parâmetros deste processo são controlados pelo Laboratório Químico e Produção, e definidos pela Engenharia de Processo.

1.2 JUSTIFICATIVA

A situação atual do mercado exige cada vez mais agilidade nos processos produtivos, e a Marcopolo sendo uma empresa que trabalha nos princípios *Lean Manufacturing*, precisa conhecer e ter o domínio de todos os processos produtivos. Um desses processos é a linha de pintura *e-coat*, onde são tratadas todas as estruturas de poltronas instaladas em aproximadamente 55 ônibus que são produzidos por dia (média), além de outros componentes. Com capacidade de tratar 450 m²/h, é um processo crítico dentro da companhia, sendo um processo contínuo de segunda a sexta-feira em 2 turnos de trabalho de 8,55h cada.

O processo de pintura *e-coat*, está dividido em pré-tratamento, eletrocoagulação, lavagem e cura, tendo na água de desengraxe um importante papel para que todo o tratamento tenha um bom resultado. Para iniciar o processo, o banho no tanque de 79 m³ deve estar em torno de 65 °C, sendo o aquecimento iniciado sempre aos domingos por volta das 15:00 horas, pois a rampa de aquecimento da água de desengraxe, da temperatura de 40 °C até 65 °C leva em torno de 8 horas para acontecer. A linha de pintura *e-coat* deve estar pronta para produzir no início do primeiro turno, às 7:30h de cada segunda-feira. Caso isso não ocorra, todo o processo de pintura fica comprometido.

Sendo assim, faz-se necessário conhecer bem a capacidade do trocador de calor responsável pelo aquecimento da água de desengraxe, podendo-se propor assim, melhorias no processo que eliminem distúrbios e desperdícios. Com isso, pode-se melhorar o desempenho do aquecimento da água de desengraxe da linha de pintura *e-coat*.

1.3 OBJETIVO DO TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo geral analisar um trocador de calor a placas para saber como suas dimensões atuais estão atendendo às necessidades do processo e testar o

aumento da demanda térmica para diminuir o tempo de aquecimento até atingir o *setpoint* de trabalho.

Os seguintes objetivos específicos são definidos:

a) caracterizar os equipamentos que fazem parte do sistema de aquecimento, identificando sua participação no processo *e-coat*;

b) avaliar as temperaturas e pressões nas entradas e saídas do trocador de calor, na operação atual e com aumento da demanda térmica;

c) avaliar potência elétrica consumida pelo motor da bomba de circulação de desengraxante pelo trocador de calor;

d) identificar a vazão de fluido desengraxante que passa pelo trocador de calor por meio das curvas de desempenho da bomba;

e) analisar o coeficiente global de transferência de calor do trocador de calor para condição atual e com aumento da demanda térmica;

f) avaliar os parâmetros de efetividade do trocador de calor para as duas condições operacionais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica é apresentado o processo de proteção anticorrosiva por eletrodeposição, mais conhecido como pintura *e-coat*. Mostra-se o passo a passo, desde a preparação da superfície no pré-tratamento, passando pela eletrodeposição e, por fim, o processo de cura. Também são abordados os assuntos sobre caldeiras flamotubulares e trocadores de calor que é objeto deste estudo.

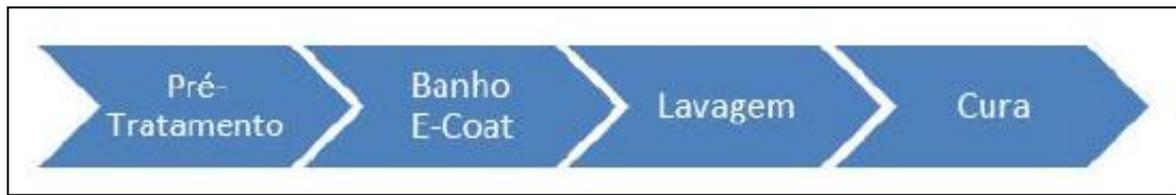
2.1 PROTEÇÃO ANTICORROSIVA POR ELETRODEPOSIÇÃO

O processo de pintura por eletrodeposição foi elaborado para garantir características anticorrosivas à uma peça metálica e sua principal aplicação é na indústria automobilística, autopeças e também em eletrodomésticos. Sua primeira utilização foi no início da década de 60 pela fabricante de veículos Ford, sendo primeiramente utilizada para pintar as rodas dos carros. Na sequência, foi também utilizada a pintura de carros pelo processo anódico. No início dos anos 70, foi realizado o processo catódico, processo que atualmente domina o mercado de pintura por eletrodeposição, e que pode ser denominado de outras maneiras, tais como: *e-coat*, Elpo, *eletrocoating*, ETL, *electropaint* entre outros. No Brasil o termo mais popular é o de “KTL” que tem origem alemã “*Katho-dische Tauch Lackierung*” que na tradução quer dizer pintura catódica por imersão (NETO et al., 2018).

A proteção anticorrosiva aplicada à superfície de peças e estruturas metálicas aumenta a resistência aos agentes atmosféricos (umidade, luz solar, calor, frio), aos agentes químicos (ácidos, bases, soluções orgânicas e inorgânicas), as ações mecânicas (desgaste, riscamento e deformação), e ainda cria um efeito estético de acabamento que possibilita obter propriedades físicas especiais (isolamento ou condutividade térmica e/ou elétrica, maior emissividade) (GULLICHSEN et al., 1999).

Por se tratar de um processo por imersão, a pintura por eletrodeposição é excelente no quesito de aplicação em cavidades de difícil acesso, como por exemplo, estruturas tubulares. E a qualidade da cobertura com camadas de baixa espessura, normalmente entre 15 e 25 microns, garante uma uniformidade no filme aplicado e também faz com que o processo se reproduza com alta rentabilidade, sendo que aproximadamente 98% dos fluidos são aplicados. Conforme Figura 1, o processo é dividido em quatro partes (NETO et al., 2018). Estas etapas serão detalhadas no decorrer deste capítulo.

Figura 1 – Etapas do processo de pintura por eletrodeposição



Fonte – NETO et al. (2018)

2.1.1 Pré-Tratamento

Para que se tenha uma película de tinta, com uma espessura controlada, sobre uma superfície metálica e que alcance sua máxima resistência à corrosão, são necessárias algumas etapas anteriores ao processo de eletrodeposição, o conjunto destas etapas é comumente chamado de pré-tratamento (PEDRO et al., 2018).

Este pré-tratamento é composto por desengraxe, decapagem ou remoção mecânica. Posteriormente ao desengraxe, as peças passam pelo enxague com água industrial para remover o desengraxante e evitar contaminação por arraste dos estágios subsequentes, que pode ser a aplicação de fosfato de zinco, ferro ou um conversor nano cerâmico (RIBEIRO 2015). Ao final do pré-tratamento é aplicado um enxague de água deionizada que contribui para a obtenção de uma película uniforme e protetora e sem contaminantes (ARNOLD et al., 2002 apud MOREIRA, 2015)

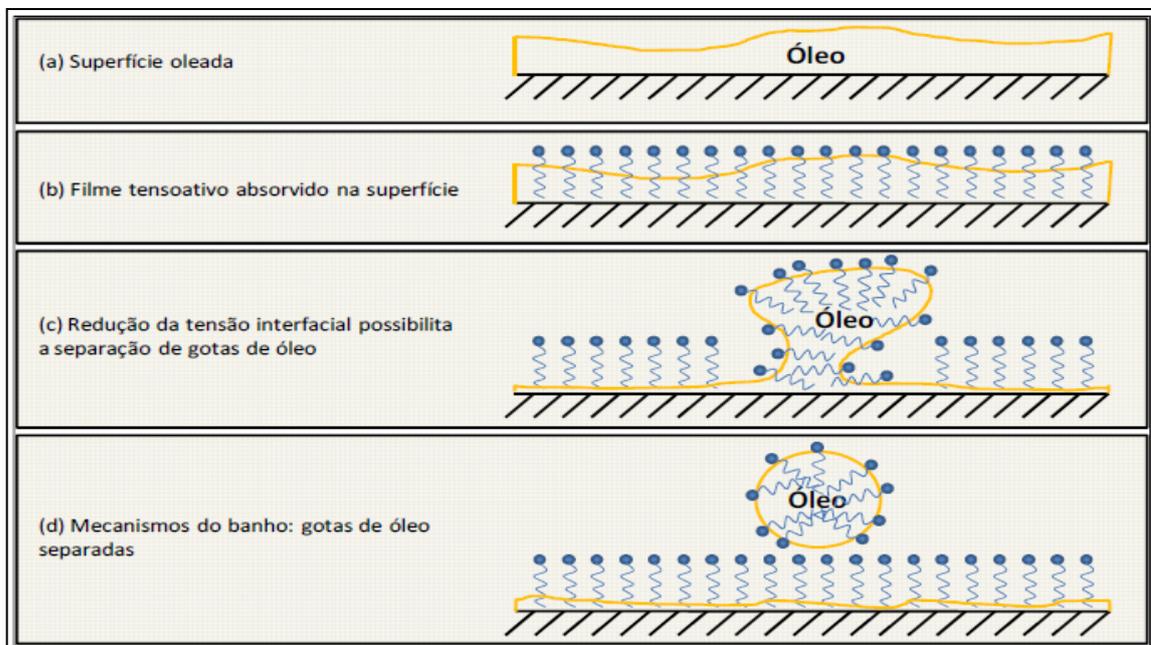
Ainda conforme Pedro et al. (2018), o primeiro estágio do pré-tratamento é o desengraxe por *spray* e/ou por imersão, este estágio tem como objetivo realizar a limpeza da superfície, removendo óleos, graxas e dejetos provenientes do processo de fabricação como limalhas. Para manutenção do banho de desengraxe é necessário fazer um acompanhamento diário da concentração, retirando o óleo da água e também as limalhas. Essa última se faz por meio de um cilindro magnetizado que por diferença de polaridade atrai as partículas metálicas.

O desengraxe possui temperatura controlada para melhor desempenho da sua função. A manutenção da temperatura do banho é realizada através de um sistema com trocador de calor tipo placas. Dependendo da temperatura máxima admissível pelo banho pode haver a troca com diferentes sistemas, como: água quente, água super aquecida, vapor d'água. Também pode ser necessário um circuito primário para sua circulação (DE BEM, 2008).

No fluxograma apresentado no Anexo A, tem-se a representação de um sistema de pré-tratamento com aquecimento da água de desengraxe por conta de um trocador de calor e uma linha de água aquecida à 120 °C proveniente de uma caldeira.

Segundo Streitberger e Dössel (2008 apud SOARES, 2013), os desengraxantes são compostos por partículas tensoativas que absorvidas pelo óleo na superfície das peças, faz com que reduza as tensões de ligação do óleo com a peça, sendo assim remove as gotas contendo óleo, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Processo de ação de partículas tensoativas no desengraxe de peças



Fonte - Streitberger e Dössel (2008, apud SOARES, 2013)

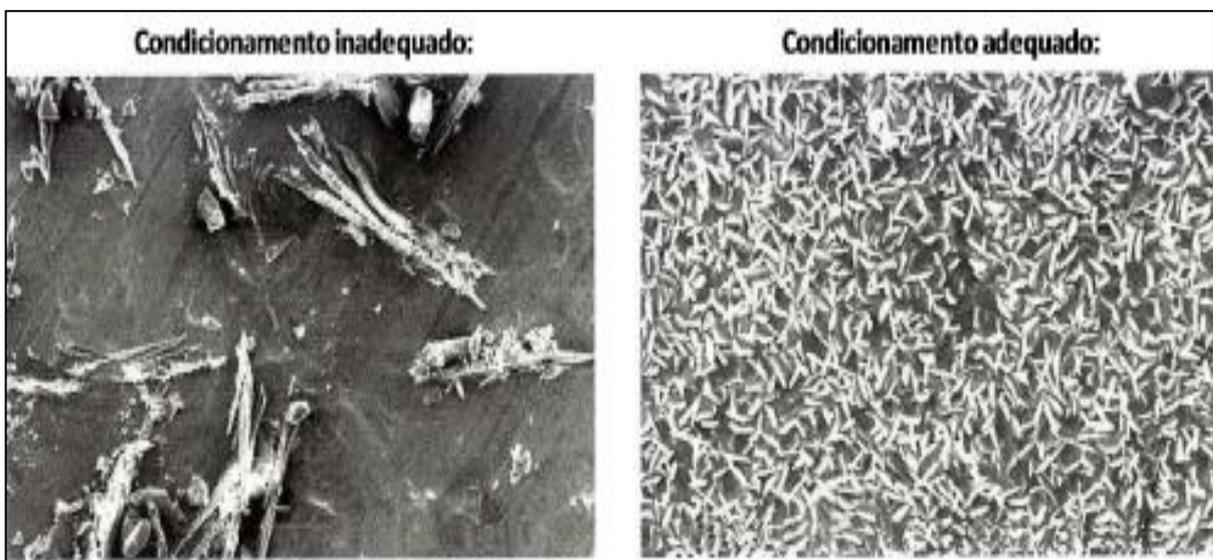
Na aplicação de desengraxe por *spray*, além da ação química, também ocorre a ação mecânica devido à pressão aplicada pelos bicos de *spray*. Porém, dessa forma existe a necessidade de bombas e tubulações de maior capacidade. Já o método por imersão, permite que o desengraxe atinja todas as partes da peça, tanto internas como externas, e a demanda térmica é menor em comparação ao processo por *spray*. Entretanto há a necessidade de um tanque com maior capacidade de volume do líquido desengraxante, sendo que a peça deve ficar submersa no banho (ELECTROCOATING, 2002 apud SOARES, 2013).

As etapas de enxague tem a responsabilidade de eliminar o arraste de produtos químicos oriundos dos processos anteriores. No caso do enxague pós desengraxe, é necessário

remover os resíduos alcalinos para evitar que neutralize os ácidos de conversão da fosfatização (ROOBOL, 2005 apud SOARES, 2013).

A fosfatização é a etapa onde há uma deposição de camada inorgânica sobre o metal base, trata-se de uma solução ácida concentrada, geralmente composta de fosfatos metálicos (Zn, Ni, Mn, Fe, Ca), ácido fosfórico, agentes oxidantes e aditivos fluorados. Esta etapa tem a função de promover a adição de uma camada microcristalina que visa aumentar a aderência dos revestimentos posteriores, como a tinta eletrodepositada (ELECTROCOATING, 2002 apud SOARES, 2013). A Figura 3 ilustra superfícies metálicas tratadas por fosfatização.

Figura 3 - Fotos microscópicas de um processo de fosfatização adequado e inadequado



Fonte: Electrocoating (2002, apud SOARES, 2013)

Após a fosfatização, segundo De Bem (2008), é necessária uma lavagem com água desmineralizada reciclada (ADR), seguida de uma lavagem com água desmineralizada nova (ADN). Essas lavagens tem o objetivo de remover o excesso de produto da fosfatização da superfície da peça, evitando a contaminação do banho de eletroforese.

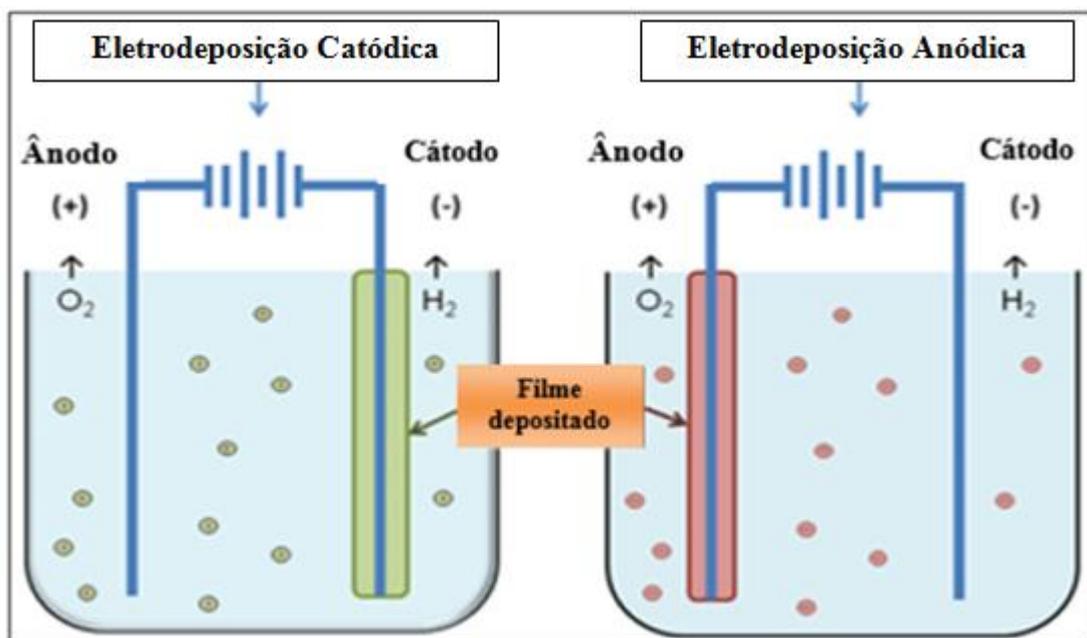
2.1.2 Banho *E-coat*

A eletrodeposição é o processo de revestimento de uma peça metálica por material orgânico dissolvido em um tanque com água deionizada. A cobertura acontece pela diferença de polaridade entre a peça e os eletrodos que estão dispostos nas laterais do tanque. Segundo Arnold et al. (2002 apud Moreira, 2015), quando a tensão elétrica é aplicada, as peças e os

eletrodos terão polaridades opostas, sendo uma delas o ânodo, positivo, e o cátodo, negativo. Conforme a deposição de tinta vai acontecendo, cria-se uma camada isolante no metal e assim cessa a eletrodeposição.

O processo de eletrodeposição pode ser classificado de duas formas, dependendo da polaridade das peças e das partículas de tinta. Ou seja, quando a peça é o cátodo e o eletrodo é o ânodo, é definida como eletrodeposição catódica. Quando as polaridades se invertem, se tem a eletrodeposição anódica (MOREIRA, 2015). Isso é mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Configuração de eletrodeposição catódica e anódica



Fonte: Adaptado de PPG Industrial Coatings (2014, apud MOREIRA, 2015)

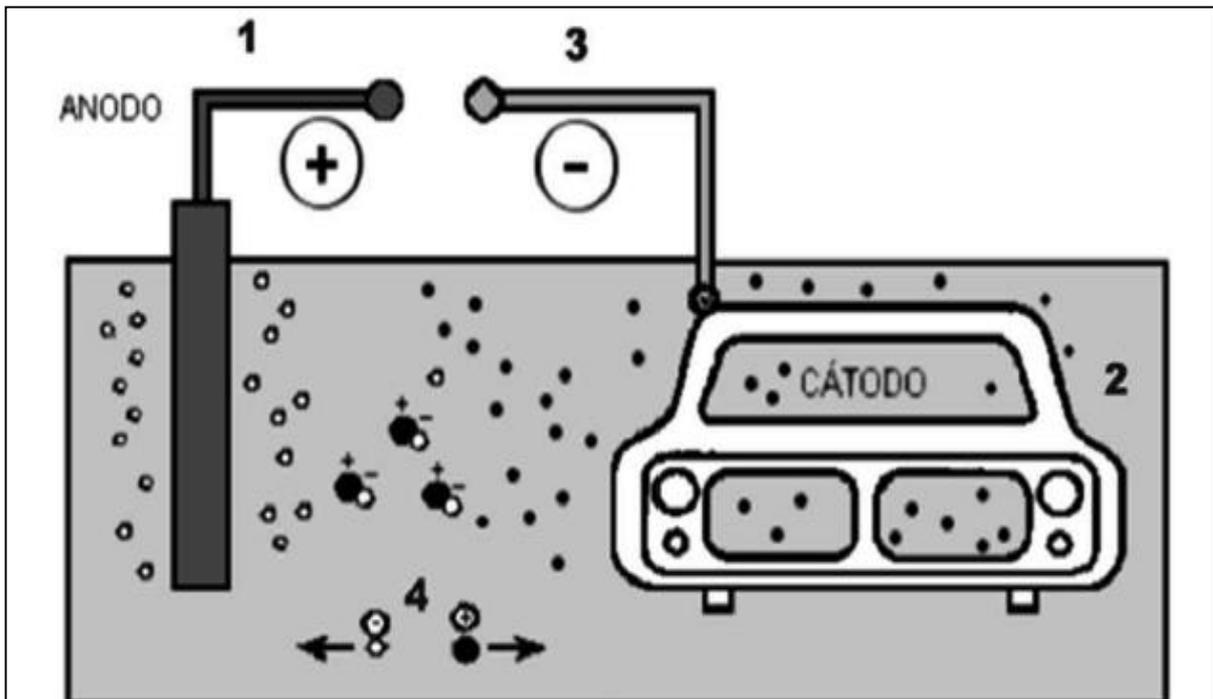
2.1.2.1 Eletrodeposição anódica

No processo de eletrodeposição anódica, a peça recebe uma carga positiva e o banho de tinta está carregado negativamente, assim a peça atrai as partículas de tinta negativas até que a peça metálica fique isolada. Porém, neste processo pode ocorrer a migração de uma pequena quantidade de ferro da peça para a tinta, o que pode prejudicar o desempenho do sistema. O sistema anódico tem como principal aplicação produtos para ambientes internos de agressividade moderada à corrosão, resultando em um excelente acabamento de cor e brilho (MOREIRA, 2015).

2.1.2.1 Eletrodeposição catódica

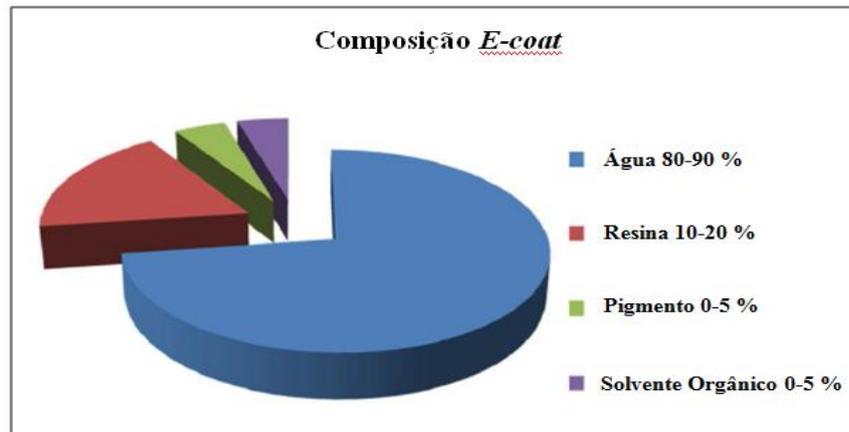
Na eletrodeposição catódica a peça é carregada negativamente e a tinta é carregada positivamente por meio de eletrodos de aço inox que se encontram nas laterais dos tanques. Neste processo a peça atrai as partículas de tinta de carga oposta até que a peça fique eletricamente isolada pela deposição da tinta (ROOBOL, 2003 apud SOARES, 2013). A deposição catódica apresenta elevada proteção anticorrosiva, sendo indicada para atender requisitos de durabilidade em ambientes agressivos (MOREIRA, 2015). A Figura 5 mostra o esquema do processo de eletrodeposição catódica.

Figura 5 - Esquema do princípio da eletrodeposição catódica



Fonte: PPG Ibérica S.A. (2003, apud MATOS, 2019)

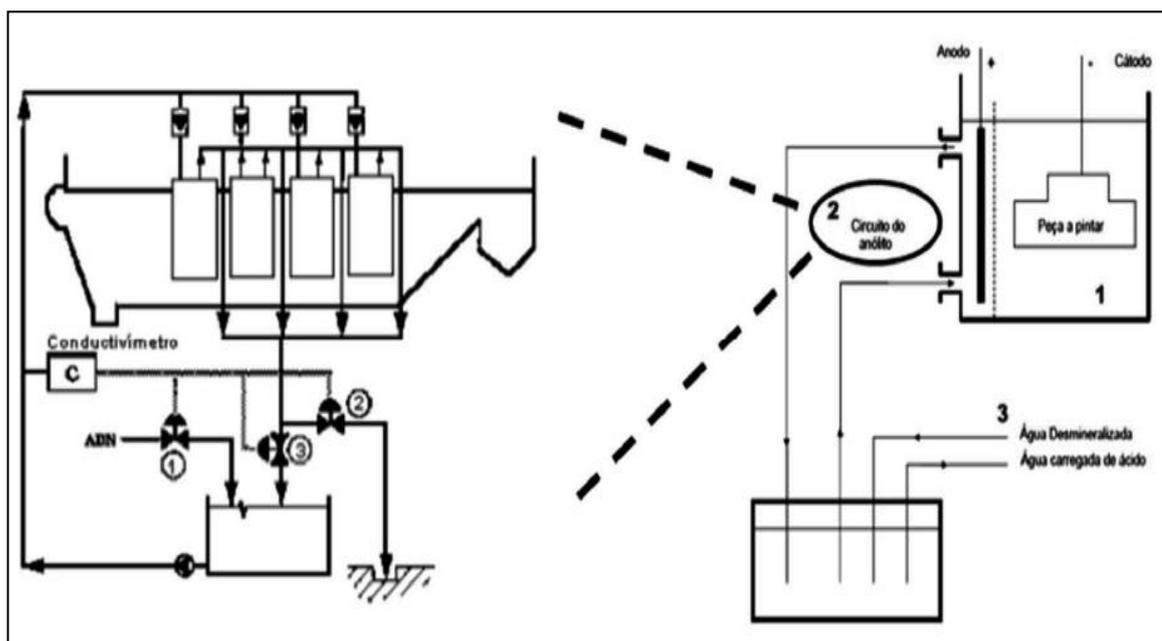
Os processos de eletrodeposição são em geral de baixo custo operacional, pois a pintura acontece em processos automatizados, onde a mão de obra requerida é baixa, também apresenta uma alta eficiência em relação à tinta aplicada. A utilização da tinta representa em torno de 95% aplicado na peça e como é uma tinta a base d'água representa um baixo risco de incêndio (ELECTROCOATING, 2002 apud SOARES, 2013). A Figura 6 representa a composição de um banho de *e-coat*, podendo-se perceber que grande parte é composta por água.

Figura 6 - Composição do banho de *e-coat*

Fonte: Electrocoating (2002, apud SOARES, 2013)

O controle de acidez da tinta é muito importante para o bom funcionamento do processo de pintura catódica. A taxa de acidez do banho é controlada por um sistema de membranas semipermeáveis, conhecidas como células de diálise, que controlam o sentido do ácido da tinta para o ânodo. O ácido entra no circuito do anólito, e é necessário efetuar a purga do mesmo com água deionizada para controle dos parâmetros (DE BEM, 2008). A Figura 7 representa o diagrama do sistema de controle de pH do processo de pintura catódica.

Figura 7 - Diagrama representativo do sistema de controle de pH

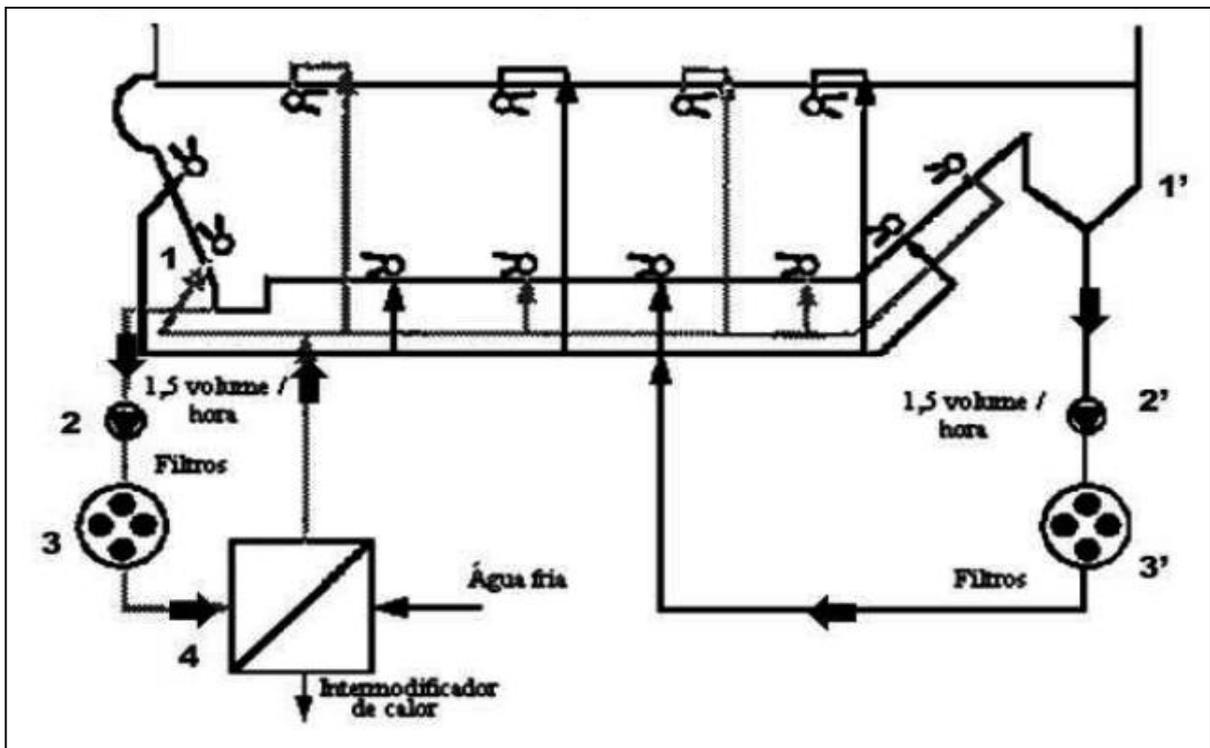


Fonte: PPG Ibérica S.A. (2003, apud MATOS, 2019)

A temperatura do banho da tinta deve ser controlada para evitar que a tinta coagule e sedimente no fundo do tanque podendo até obstruir tubulações, sendo as temperaturas ideais entre 28 e 35 °C. Em condições normais de trabalho e temperatura ambiente, geralmente é necessário resfriar a tinta, pois em função das correntes elétricas aplicadas no processo de pintura a temperatura do banho tende a subir. O controle de temperatura do banho é realizado por um trocador de calor de placas em um circuito de água gelada. Para dias em que a temperatura ambiente é muito baixa e a temperatura da tinta estiver abaixo de 28°C é necessário circular água quente até no máximo de 80 °C, caso contrário a tinta pode coagular já no trocador de calor (MATOS, 2019).

A agitação do KTL é de suma importância para a homogeneização do banho, ela é responsável por conduzir a tinta até o trocador de placas e também que faz o controle da temperatura e ao retornar ao tanque passa por bicos edutores que auxiliam na mistura do pigmento, devida a importância deste processo, é recomendado que tenha uma bomba reserva instalada, pois sem agitação não há controle de temperatura e pode-se perder o tanque inteiro de tinta (DE BEM, 2008). A Figura 8 mostra o esquema do uso do trocador de calor para a finalidade de manter a temperatura adequada.

Figura 8 - Diagrama representativo da filtração e trocador de calor

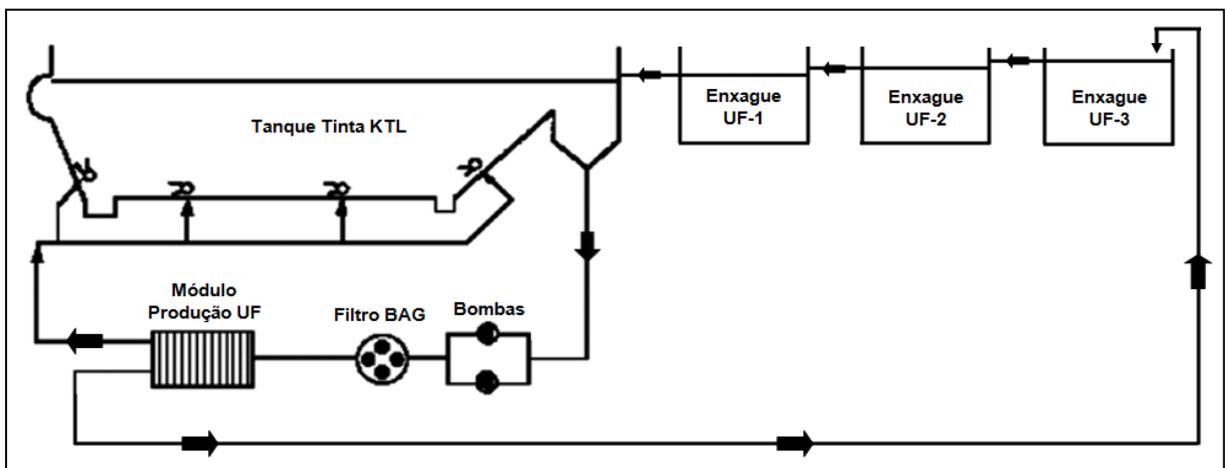


Fonte: PPG Ibérica S.A. (2003, apud MATOS, 2019)

2.1.3 Processo de lavagem com ultrafiltrado

Para remover o excesso de tinta que possa ter se acomodado em alguma parte da peça em função da sua geometria, e melhorar o aspecto do filme de tinta depositado na peça, após o processo de eletrodeposição, as peças passam por uma lavagem com água resultante da ultrafiltração da tinta, esta água recebe o nome de ultrafiltrado (UF) (DE BEM, 2008). A Figura 9 representa o processo de lavagem com ultrafiltrado.

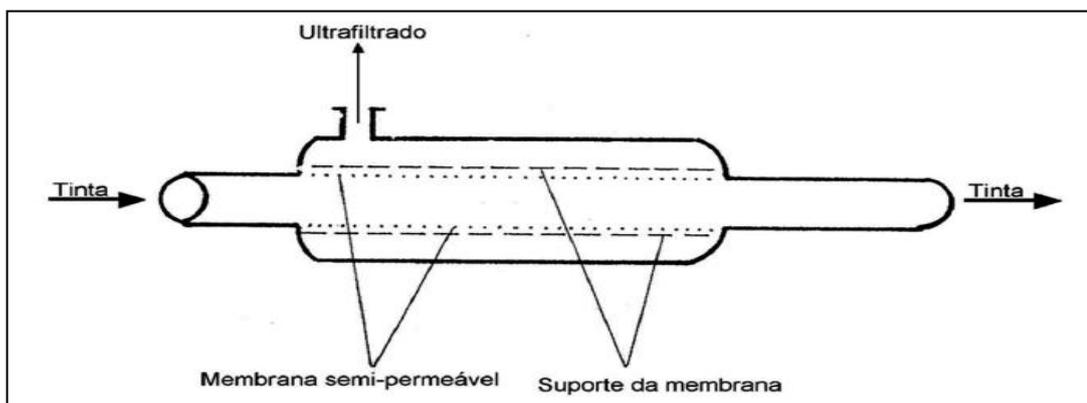
Figura 9 – Diagrama representativo do processo de lavagem com ultrafiltrado



Fonte: PPG Ibérica S.A. (2003, apud MATOS, 2019)

A água de ultrafiltração é gerada por meio de membranas de filtração tangencial, onde as partículas são separadas em função do tamanho, e voltam para o banho de tinta. A Figura 10 demonstra o processo de ultrafiltração.

Figura 10 - Representação do sistema de ultrafiltração da tinta com membrana porosa



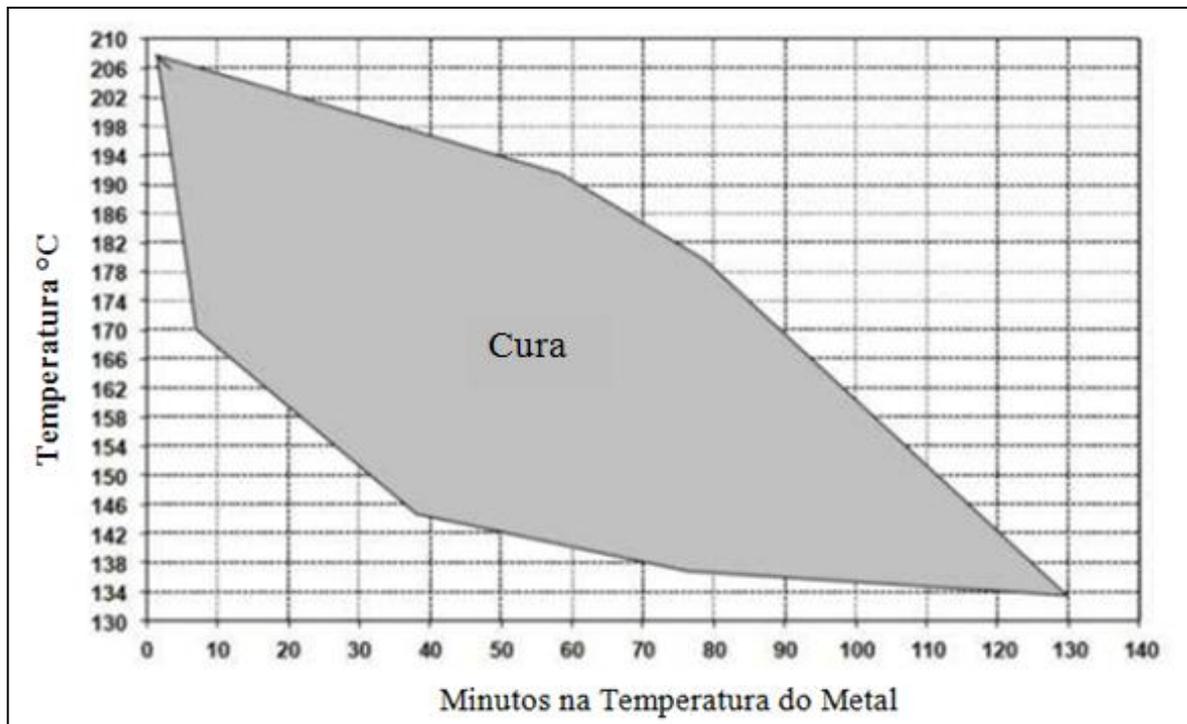
Fonte: PPG Ibérica S.A. (2003, apud MATOS, 2019)

2.1.4 Processo de cura

A cura das peças deve ocorrer em estufas onde o aquecimento ocorre de maneira indireta para evitar que os fumos decorrentes da queima do combustível venham a formar compostos orgânicos estáveis que podem condensar e aderir nas peças pintadas e paredes da estufa. O aquecimento das peças deve ocorrer de forma lenta e homogênea, para isso é fundamental a distribuição equilibrada da temperatura dentro da estufa (MATOS, 2019).

O controle de tempo de exposição e temperatura deve seguir os parâmetros do fornecedor da matéria prima, sendo que uma vez excedida a temperatura e tempo de exposição ocorre uma perda de matéria orgânica do filme de tinta aplicada, e na situação em que os parâmetros de cura não são atingidos, pode ocorrer o deslocamento do filme de tinta. Para controle da curva de aquecimento da peça, faz-se necessário uma análise termográfica que irá demonstrar o comportamento da cura da peça. É recomendado que seja realizado pelo menos quatro análises termográficas por ano para acompanhamento e certificar que a cura está acontecendo de forma adequada (SOARES, 2013). A Figura 11 mostra o gráfico da janela de cura.

Figura 11 – Exemplo de janela de cura para processo de pintura e-coat



Fonte: PPG (2011, apud SOARES, 2013)

2.2 CALDEIRAS

Segundo Beckmann (2019), em 1880, Alan Stirling desenvolveu um gerador de vapor que utilizava tubos curvados, que é utilizado na concepção de caldeiras até os dias de hoje, podendo ser classificadas como flamotubulares ou aquatubulares. Nas caldeiras flamotubulares, os gases gerados na combustão passam por dentro dos tubos até a saída pela chaminé e a água passa em volta dos tubos onde é aquecida, enquanto que nas caldeiras aquatubulares, quem passa por dentro dos tubos é a água, e os gases de combustão passam por fora dos tubos gerando o aquecimento da água.

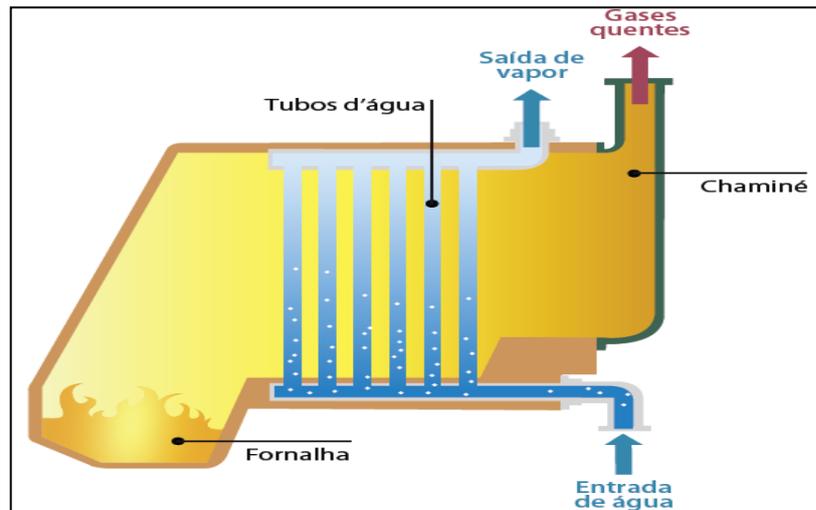
Caldeiras são equipamentos industriais que tem por objetivo a geração de vapor, este vapor por sua vez tem alta aplicabilidade dentro do meio industrial, em especial para limpeza e esterilização, aquecimento e como força motriz, e também na geração de energia elétrica por meio das usinas termelétricas. Nas aplicações industriais as caldeiras operam com pressões em torno de 20 vezes maior que a pressão atmosférica, já em grandes instalações como na produção de energia elétrica chega a 60 vezes maior (ALTAFINI, 2012).

Como as caldeiras operam em pressões acima da pressão atmosférica, são consideradas vasos de pressão e estão sujeitos a rigorosas regulamentações como a Norma Regulamentadora 13 (NR-13) do Ministério do Trabalho do Brasil, que estabelece características de fabricação, operação e manutenção de caldeiras e vasos de pressão (JORGE; MAZZAROTO, 2019). Ainda conforme Altafini (2012), as caldeiras devem ser operadas por profissionais competentes, pois o risco de explosão é alto quando não operadas de forma correta.

2.2.1 Caldeiras aquatubulares

Caldeiras aquatubulares são caracterizadas pela sua construção, onde a água passa no interior de tubos que são interligados a um tubulão superior e um tubulão inferior, a circulação de gases, oriundos da queima de um combustível, passa por entre esses tubos e por meio da radiação do calor aquecem os tubos fazendo com que a água se transforme em vapor (BERTOLOTTO FILHO, 2015). A Figura 12 apresenta um esquema de caldeira aquatubular.

Figura 12 – Desenho esquemático de caldeira aquatubular

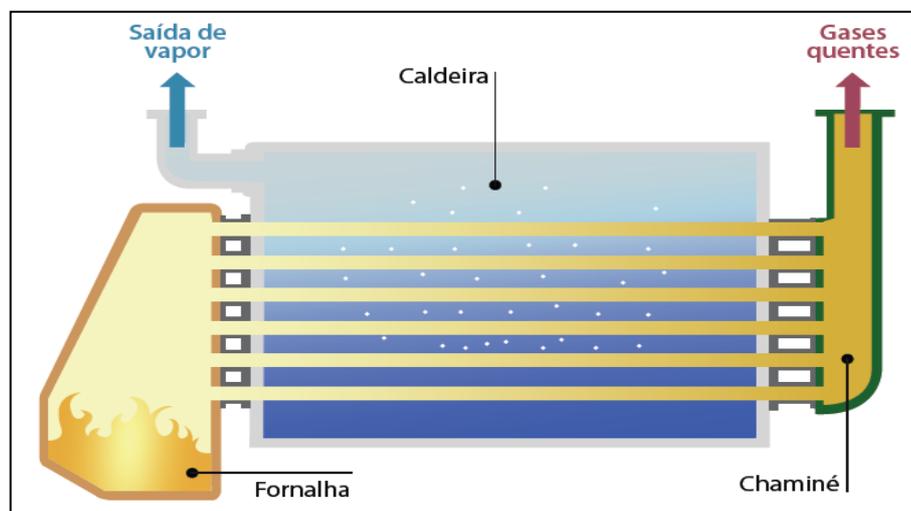


Fonte: Vergnhanini Filho (2018)

2.2.2 Caldeiras flamotubulares

Caldeiras flamotubulares, também conhecidas como caldeiras fumotubulares, são construídas de forma que a água circula em torno de diversos tubos, montados entre espelhos, na forma de um único feixe tubular. Os gases decorrentes da combustão circulam pela tubulação em direção à chaminé, onde são dispersos no meio ambiente. Os tubos são unidos aos espelhos pelo método de solda, ou mandrilagem (BAZZO, 1995). A Figura 13 mostra um esquema de caldeira fumotubular.

Figura 13 – Desenho esquemático de caldeira flamotubular ou fumotubular



Fonte: Vergnhanini Filho (2018)

2.3 PROCESSO DE TROCA TÉRMICA

A transferência de calor é o processo pelo qual a energia é transportada entre dois sistemas com temperaturas diferentes, que em contato, transfere calor do sistema com maior temperatura ao sistema com temperatura inferior até que ocorra o equilíbrio. O calor não pode ser medido diretamente, e sim os efeitos causados pela sua adição ou remoção (GARDENAL e SGUARIO, 2016).

O processo de troca de calor entre dois fluidos que estão em temperaturas diferentes e isolados por uma parede sólida tem grande aplicação na indústria. O equipamento utilizado para implementar essa troca é conhecido por trocador de calor, e suas aplicações podem ser tanto no aquecimento como no resfriamento de fluidos (INCROPERA, 2008).

Trocadores de calor são equipamentos responsáveis pela troca térmica entre duas substâncias, onde a força motriz responsável pela troca de calor é a diferença de temperatura entre elas. Estes dispositivos tem grande aplicação na indústria onde há a necessidade de controle de temperatura de algum sistema (GARDENAL e SGUARIO, 2016).

Conforme Incropera (2008), os trocadores de calor são classificados em função da configuração do escoamento e do tipo de construção. Em função do tipo de escoamento, pode ser classificado como paralelo, contracorrente, cruzado, misturado e não misturado, e quanto à construção pode ser um trocador de calor de tubos concêntricos, de jaqueta, de escoamento cruzado, casco e tubos, compacto e do tipo placas.

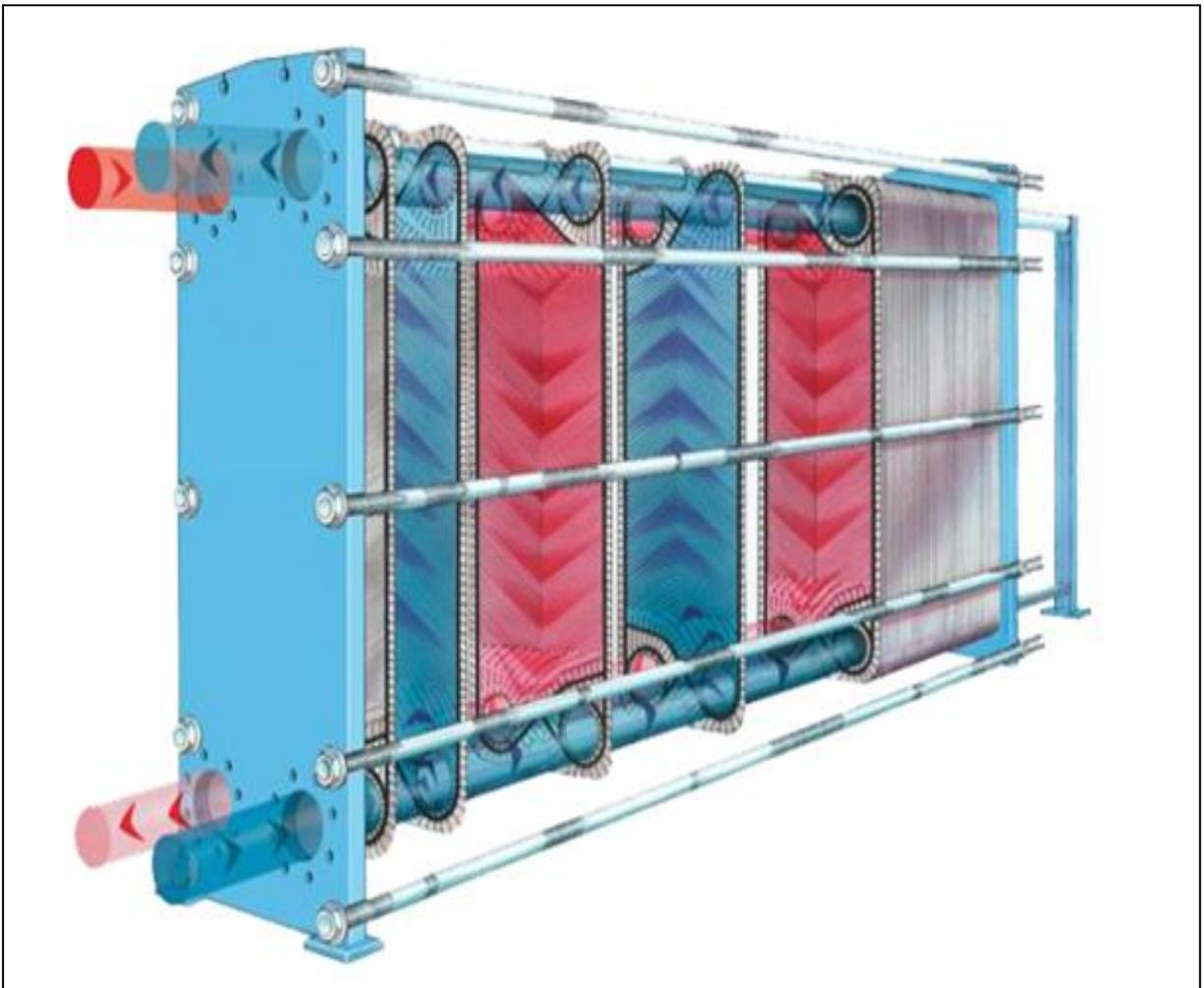
2.3.1 Trocador de calor a placas

Segundo Wang et al. (2007, apud Beckedorff, 2017) os trocadores de calor foram desenvolvidos em meados de 1880 com o objetivo de aquecer e resfriar leite para pasteurização sem o contato direto entre os fluidos, evitando contaminações. Atualmente é muito utilizado na indústria alimentícia bem como em outros ramos como metalúrgico, farmacêutico, eletrônico, automotivo, etc. Globalmente chamado de *Plate Heat Exchanger (PHE)* o trocador de placas é geralmente constituído de placas finas e corrugadas de aço inoxidável, posicionadas paralelamente com um pequeno espaçamento entre elas, normalmente entre 2 e 3 mm (STENSTRASSER, 2018).

Conforme Shah; Sekulić (2003), cada placa do trocador de calor possui quatro orifícios, que tem a função de permitir a entrada e saída dos fluidos quente e frio, estes orifícios são isolados por meio de gaxetas de borracha que separam os fluidos de forma que não se misturem. O escoamento no interior das placas ocorre de forma turbulenta devido à ondulação das placas, possibilitando uma melhor área de contato e direcionamento do fluido (CAMARGOS, 2017).

Segundo Fernandes et al. (2007), o dimensionamento de um trocador de calor está diretamente relacionado ao desempenho que se espera ter, o tamanho da placa, a espessura, a quantidade, a disposição e o ângulo das ondulações interferem diretamente na quantidade de calor que será trocada entre os fluidos. A Figura 14 apresenta um atual trocador de calor de placas.

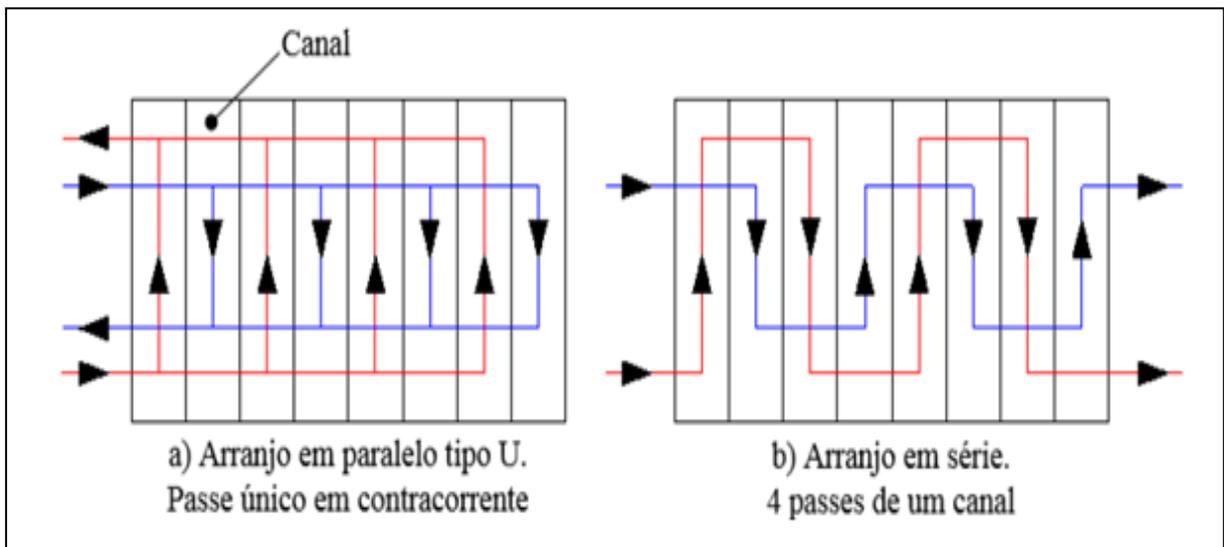
Figura 14 - Trocador de calor tipo placas



Fonte: Tranter (2011, apud GAIDEX, 2019)

A configuração de um trocador de calor por placas, também passa pelo arranjo de fluxo dos fluidos, conforme Figura 15, na qual é possível verificar dois tipos de arranjos para um trocador de placas com oito canais. O primeiro é mais comumente chamado de tipo “U”, onde nesta disposição o fluido faz um único passe pelas placas do trocador, já no arranjo em série o fluido passa por todas as placas, percorrendo uma a uma (SHAH; KANDLIKAR, 1998).

Figura 15 - Diferentes arranjos de distribuição das correntes fluidas



Fonte: Shah e Kandlikar (1988)

Segundo Carvalho (2018), as vantagens dos trocadores de calor tipo placas em relação aos outros tipos de trocadores de calor são as seguintes:

- permitir a higienização e inspeção das placas de maneira completa;
- apresentar boa eficiência térmica, permitindo a troca de calor mesmo com pequenas diferenças de temperatura entre os fluidos;
- determinar turbulência induzida no escoamento em baixa velocidade pelas placas corrugadas;
- possuir construção compacta e modular, permitindo acomodar várias seções de troca térmica em um mesmo pedestal;
- possibilitar mudanças em seu arranjo, quanto ao número de placas e de passes visando uma otimização do processo.

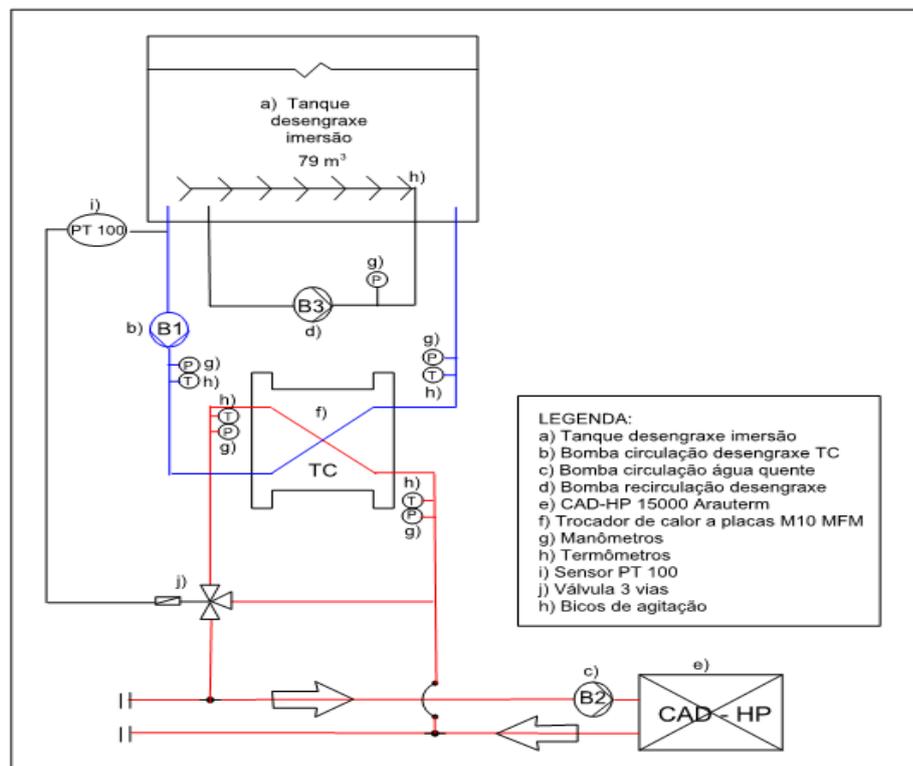
3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado de forma detalhada os equipamentos que compõem o sistema de aquecimento da água de desengraxe, a instalação do trocador de calor, caracterização do problema e a metodologia das atividades desenvolvidas.

3.1 CENÁRIO ATUAL DO SISTEMA DE DESENGRAXE

O trocador de calor analisado faz parte do sistema de aquecimento da água de desengraxe por imersão, que por sua vez, é o primeiro estágio do pré-tratamento do sistema de pintura *e-coat*. Conforme a Figura 16, o sistema é composto por um tanque de desengraxe por imersão de 79 m³ (a), uma bomba para circulação do fluido desengraxante (b) pelo trocador de calor a placas (f), uma bomba para circulação da água quente (c) pelo trocador de calor, uma bomba para recirculação da água de desengraxe (d) e uma caldeira geradora de água quente marca Arauterm, modelo CAD-HP 1500 (e). Além de outros componentes como manômetros (g), termômetros (h), sensor PT 100 (i) e válvula 3 vias (j).

Figura 16 - Fluxograma atual sistema aquecimento água de desengraxe

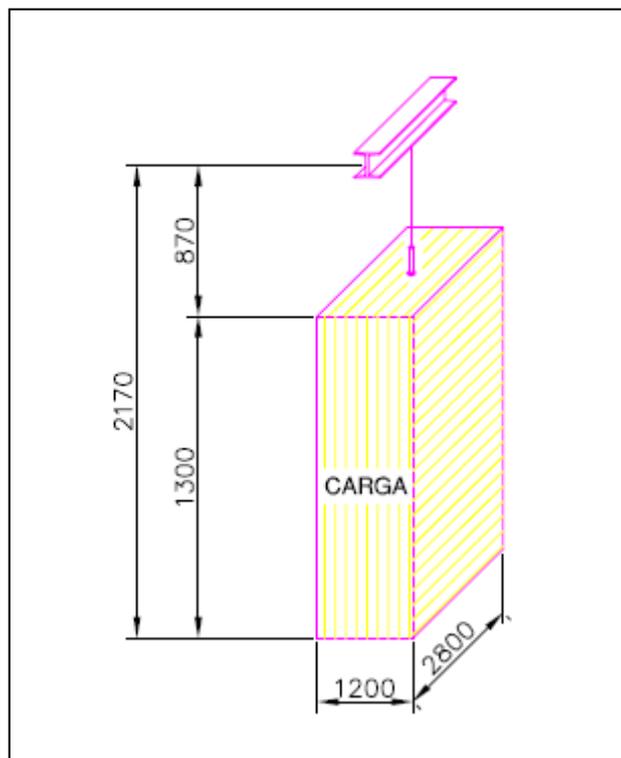


Fonte – Autor (2021)

O sistema de tratamento de superfícies está instalado desde 2012, antes da instalação, teve um trabalho em parceria entre as engenharias das empresas Marcopolo e Eisenmann, fabricante da linha de tratamento, para definição de todas as peças que seriam processadas e assim conseguir por meio de cálculos de engenharia desenhar o projeto, estipulando tempos de processo, temperatura do banho de desengraxe, tamanhos de tanques, entre outros.

O transportador da linha de tratamento é do tipo contínuo, e com velocidade constante de 3 m/min, esse parâmetro é que vai determinar todo o dimensionamento dos tanques. O tamanho máximo da carga por gancheira está representado na Figura 17, o peso por gancheira não pode ultrapassar os 300 kg, e a produtividade, respeitando estas definições, pode chegar a 450 m²/h de superfície tratada.

Figura 17 – Dimensões da carga por gancheira

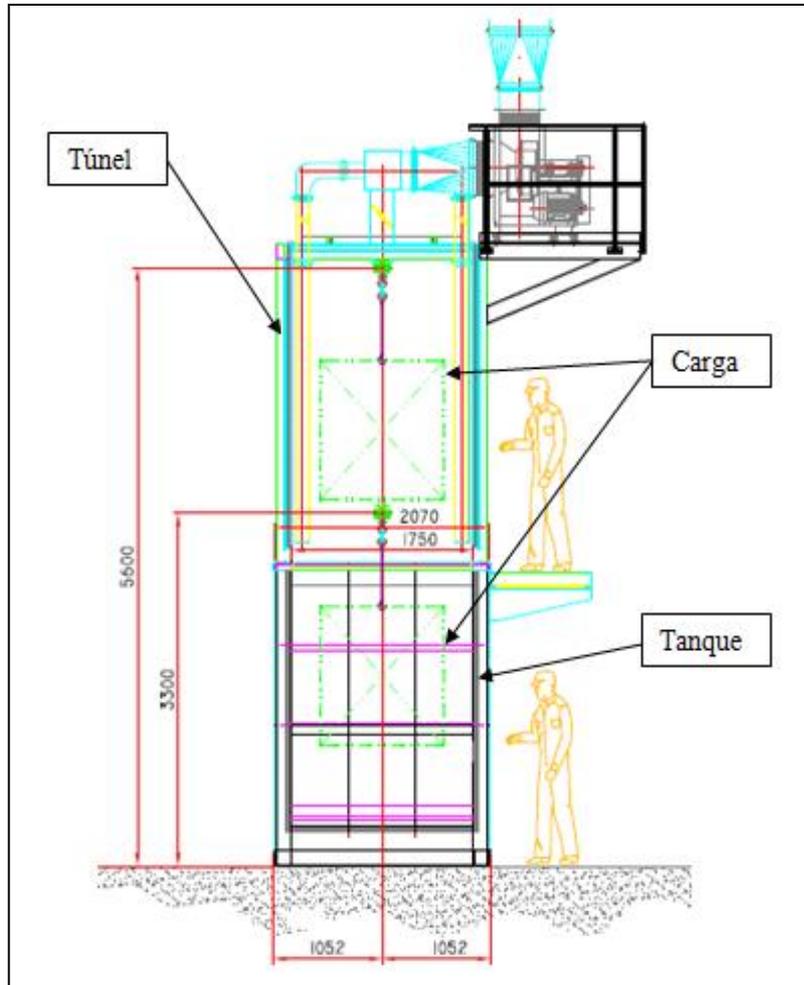


Fonte: Marcopolo (2021)

A carga é submersa no tanque com desengraxante pelo transportador, como pode ser observado na Figura 18, é necessário atender a medida de 870 mm entre a barra do transportador e a carga para que as peças fiquem submersas ao passar pelo tanque de desengraxe, e também não pode ultrapassar a distância de 2170 mm entre a barra do

transportador e a parte inferior da carga para manter uma distância segura entre a carga e os bicos edutores do fundo do tanque.

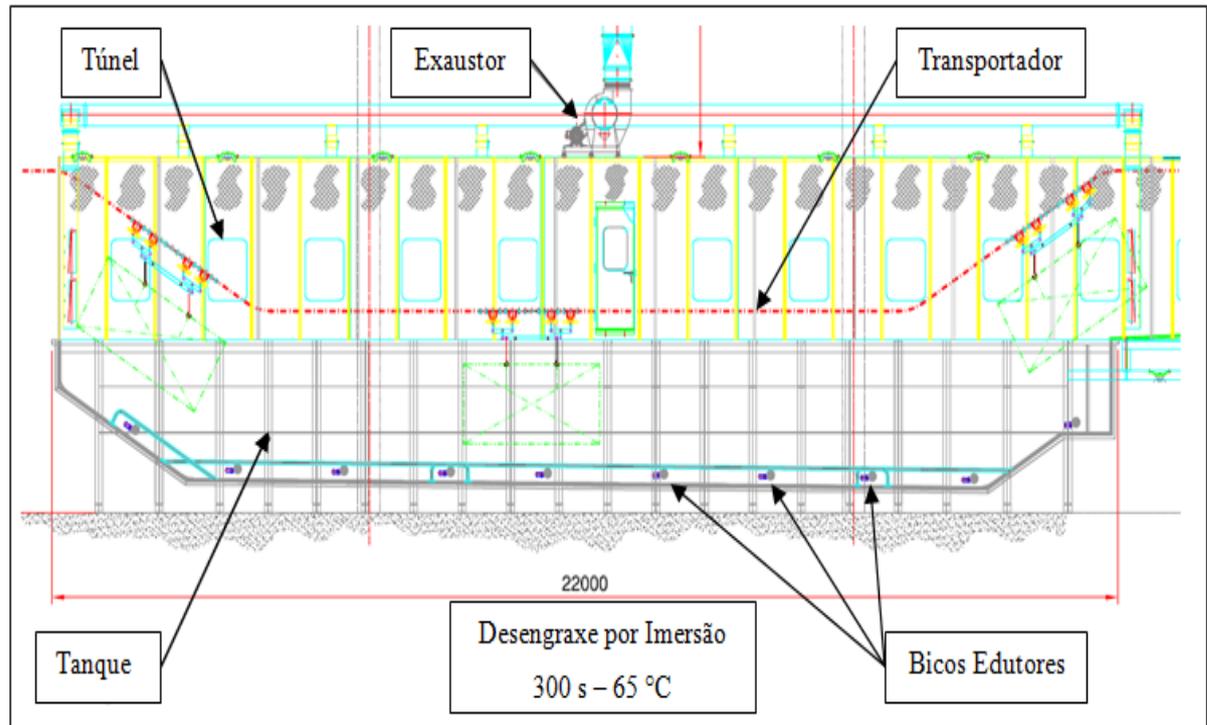
Figura 18 – Vista frontal tanque de desengraxa



Fonte: Marcopolo (2021)

O tanque de lavagem com desengraxante é o primeiro estágio do processo, representado na Figura 19, o tanque tem 22 m de comprimento, para atender ao parâmetro de aplicação de 300 segundos a uma temperatura na faixa dos 65 °C. O tanque é fabricado em aço carbono e no fundo dele estão distribuídos 50 bicos edutores que são responsáveis pela agitação e homogeneidade do desengraxante, os bicos edutores estão divididos em 10 árvores com 5 bicos em cada, cada bico tem uma vazão de 3,91 m³/h e pressão de 1,2 bar, na entrada de cada árvore de agitação tem um manômetro da marca Wika com escala de 0 a 4 bar e um registro para ajustar a pressão.

Figura 19 - Vista lateral do tanque de desengraxante



Fonte: Marcopolo (2021)

Para atender a agitação do desengraxante está instalado uma bomba centrífuga horizontal da marca KSB e modelo megachem 125-250, que capta o desengraxante do tanque e devolve por meio dos bicos edutores. A Tabela 1 mostra as características dessa bomba.

Tabela 1 – Característica da bomba de agitação do desengraxante

Características	Bomba KSB Megachem 125-250
Diâmetro da Flange de recalque	125 mm
Diâmetro nominal do rotor	221 mm
Rotação	1765 rpm
Vazão Máxima	200 m ³ /h
Elevação	20 mca

Fonte: Autor (2021)

O fornecedor do produto desengraxante recomenda que o mesmo esteja a uma temperatura na faixa dos 65 °C, com tolerância de ± 2 °C, para ter um bom desempenho na sua função que é desengordurar as peças, portanto requer o aquecimento da solução desengraxante antes do início da produção.

Para realizar este aquecimento da água de desengraxe, o sistema conta com um trocador de calor do tipo placas da marca Alfa Laval, modelo M10-MFM, cujas dimensões e características construtivas são apresentadas no Anexo A. Para as temperaturas e vazões mássicas especificadas no Anexo A, a capacidade térmica do trocador de calor é de 620 kW, sendo a área de troca térmica de 2,60 m², com 14 placas (0,2 m²/placa) do padrão *chevron* corrugadas em “V”, e arranjo das placas em paralelo com fluxo em contracorrente. O trocador de calor da água de desengraxe, que é objeto de estudo deste trabalho, é ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Trocador de calor M10-MFM Alfa Laval



Fonte: Autor (2021)

Para manter a circulação da água de desengraxante pelo trocador de calor, o sistema conta com uma bomba centrífuga horizontal da marca KSB e modelo megachem 65-200, captando o desengraxante do tanque e forçando sua passagem pelo TC, retornando na sequência ao tanque de desengraxante. A Tabela 2 mostra as características dessa bomba.

Tabela 2 - Característica da bomba de circulação do desengraxante no TC

Características	Bomba KSB Megachem 65-200
Diâmetro da Flange de recalque	65 mm
Diâmetro nominal do rotor	209 mm
Rotação	1740 rpm
Vazão Máxima	60 m ³ /h
Elevação	20 mca

Fonte: Autor (2021)

Para fornecer água quente ao trocador de calor, o sistema de aquecimento conta com uma bomba centrífuga horizontal da marca KSB e modelo megachem 80-250, a qual é responsável pela passagem da água pela caldeira. Essa aquece a água, e a bomba a faz circular por uma tubulação de 4” revestida com uma camada de 50 mm de espessura de lã de vidro, que apresenta uma chapa fina de aço galvanizado de acabamento. A citada isolamento tem o objetivo de diminuir a perda térmica no percurso de aproximadamente 50 metros da caldeira até o local do trocador de calor. A Tabela 3 mostra as características da bomba da caldeira.

Tabela 3 – Características da bomba de água quente

Características	Bomba KSB Megachem 80-250
Diâmetro da Flange de recalque	80 mm
Diâmetro nominal do rotor	254 mm
Rotação	1760 rpm
Vazão Máxima	70 m ³ /h
Elevação	30 mca

Fonte: Autor (2021)

A caldeira fumotubular geradora de água quente da marca Arauterm, modelo CAD – HP – 1500 com capacidade térmica de 1744,2 kW (1.500.000 kcal/h) e área de troca térmica de 38,30 m², tendo uma capacidade térmica específica de 45,54 kW/m². A Figura 21 ilustra a caldeira instalada e no Anexo B apresenta-se o dimensional de instalação da mesma.

Figura 21 - Caldeira fumotubular CAD – HP 1500 Arauterm

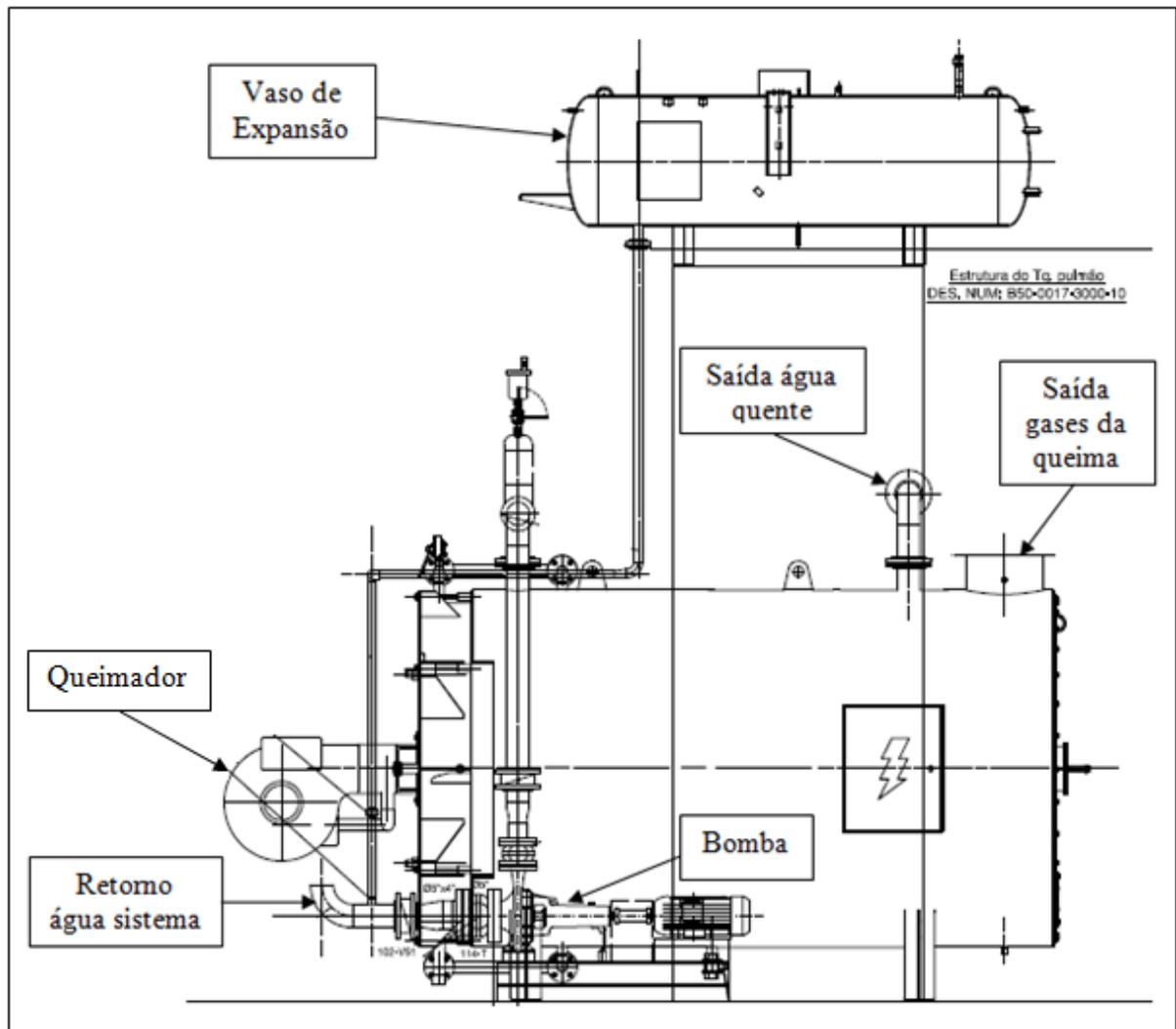


Fonte: Autor (2021)

No painel de instrumentos da caldeira têm-se dois controladores de temperatura que estão conectados a sensores do tipo PT100 na entrada e saída da água da caldeira, onde pode-se verificar as temperaturas de operação. Também no controlador, é ajustado o *setpoint* de trabalho da caldeira. O queimador da marca F.B.R., modelo GAS-P-190/E, opera em chama alta, e segue em chama baixa até atingir os 100 °C, quando o mesmo se desliga, e volta a ligar quando a temperatura da água quente baixar de 90 °C na saída da caldeira.

O abastecimento da água na geradora de água quente acontece pelo vaso de expansão, que fica sobre uma estrutura metálica logo acima da caldeira, o vaso de expansão tem capacidade de 750 L e é pressurizado com ar comprimido para manter o circuito abastecido e evitar que a água vaporize dentro do sistema gerando bolhas de ar. Na Figura 22 é mostrado um desenho esquemático da caldeira fumotubular CAD – HP 1500 Arauterm.

Figura 22 – Desenho esquemático Caldeira CAD – HP 1500 Arauterm



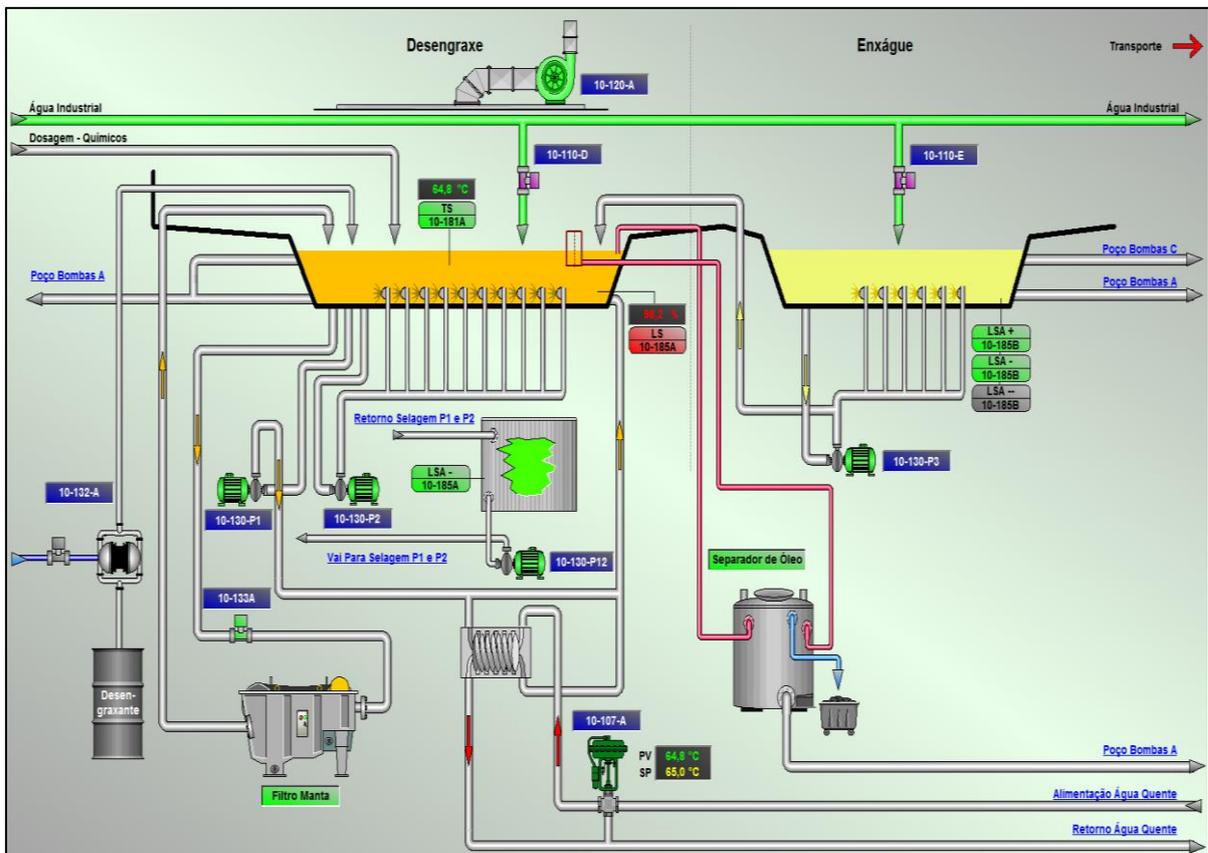
Fonte: Marcopolo (2021)

O controle da temperatura da água de desengraxante é realizado através de um sensor do tipo PT100, com faixa de medição de 0 a 100 °C, este instalado na parte central do tanque para ter uma boa medição da temperatura do desengraxante devido ao tamanho do tanque.

A linha de tratamento dispõe de um supervisório, que nada mais é que um computador que está interligado com toda rede lógica da linha de tratamento, onde podem ser observadas todas as informações do funcionamento da linha. Além disso, pode fazer alguns ajustes de *setpoint*, ligar e desligar equipamentos, verificar alarmes e gráficos de tendência dos equipamentos. No supervisório tem uma tela onde pode ser observado o funcionamento do tanque de desengraxante e também da caldeira, responsável pelo aquecimento da água que circula pelos trocadores de calor da água de desengraxante e do fosfato de ferro.

Na Figura 23 pode-se verificar a tela do supervisório dos tanques de desengraxe e enxague pós desengraxe. Junto ao tanque de desengraxante tem-se a representação das bombas de aquecimento (P1) e agitação (P2), também da bomba (P12) que faz a lubrificação dos selos mecânicos duplos das bombas P1 e P2. O trocador de calor responsável pelo aquecimento da água de desengraxe, a válvula de controle de aquecimento e circuitos de água quente e água de desengraxe também aparecem na Figura 24.

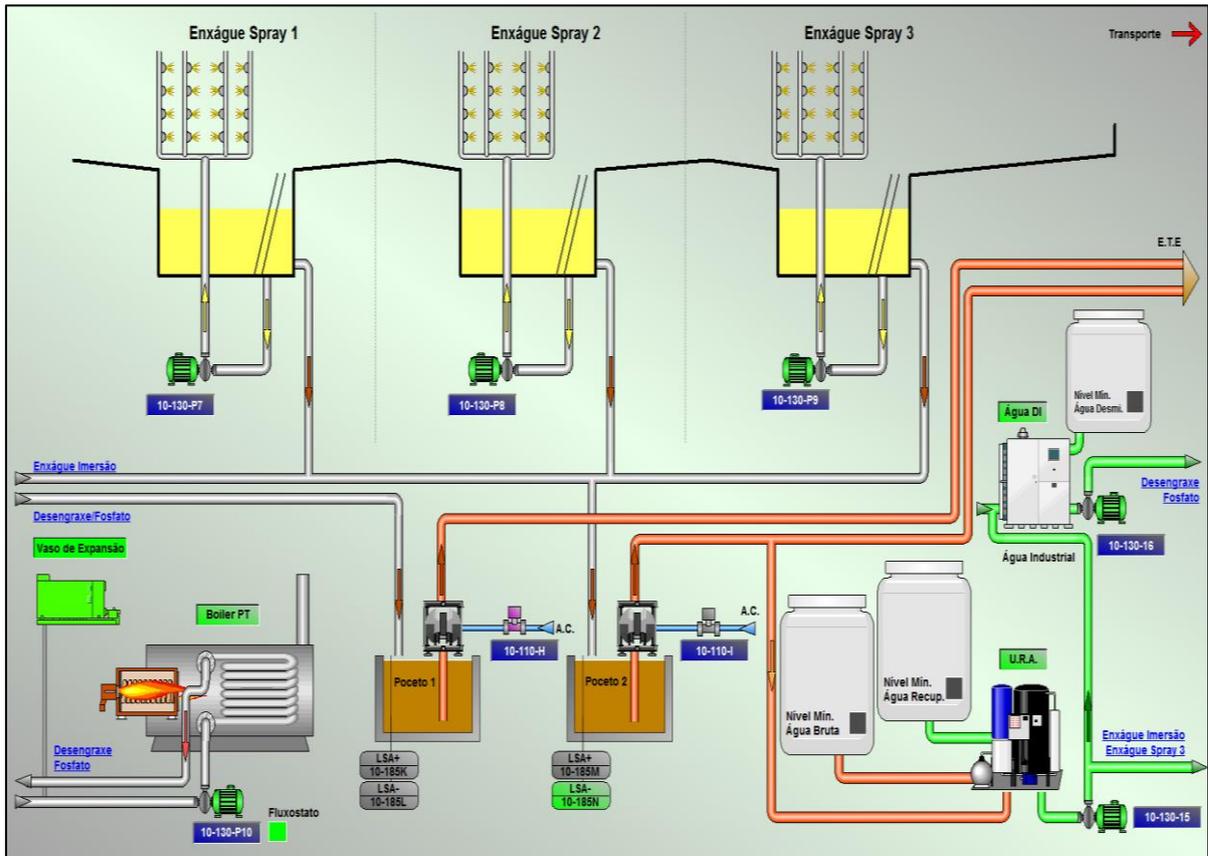
Figura 23 – Tela supervisório tanques desengraxe e enxague



Fonte: Marcopolo (2021)

Na Figura 24 pode-se verificar a tela do supervisório dos tanques de enxagues pós-fosfato de ferro, cada tanque conta com uma bomba, respectivamente P7, P8 e P9. Dentre as utilidades, têm-se a caldeira geradora de água quente responsável pelo aquecimento do desengraxe e fosfato de ferro, a máquina de produção de água deionizada utilizada no processo, e a unidade de recuperação de água que é responsável pela renovação dos enxagues.

Figura 24 – Tela supervisorio enxagues pós-fosfato de ferro e utilidades



Fonte: Marcopolo (2021)

3.2 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO TROCADOR DE CALOR

O trocador de calor foi avaliado seguindo as equações termodinâmicas e de máquinas de fluxo para obtenção do coeficiente global de troca térmica e efetividade. Essas equações são identificadas ao longo do capítulo 4 referentes aos resultados obtidos.

Os dados de pressão e temperatura nas entradas e saídas do trocador de calor foram obtidos através de manômetros da marca Wika com escala de 0 a 4 bar e termômetros da marca Wika com escala de 0 a 150 °C na água quente e com escala de 0 a 120 °C no desengraxante. Todos os instrumentos utilizados nestas medições fazem parte da instalação e são calibrados periodicamente pelo laboratório de metrologia da empresa.

Para aferir a potência elétrica consumida pelos motores das bombas de desengraxante e da água quente que passam pelo trocador de calor, foi utilizado um alicate volt amperímetro da marca Fluke, modelo 305 com calibração até setembro de 2021. Com as informações de corrente, tensão e fator de potência do motor, chegou-se aos valores de potência dos motores.

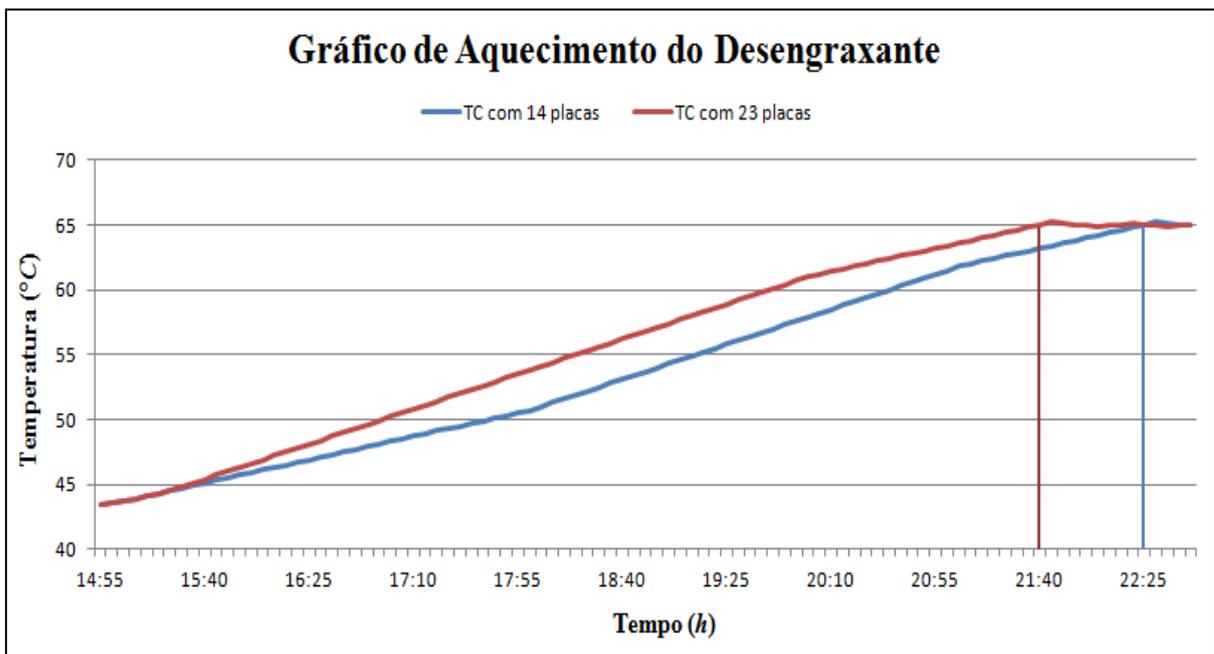
Para identificar a vazão de fluido desengraxante que passa pelo trocador de calor foi necessário medir a rotação do motor da bomba de desengraxe, essa medição foi realizada através do tacômetro da marca Minipa, modelo MDT-2238A com calibração válida até novembro de 2021. E para aferir a massa específica do desengraxante, foi utilizado um picnômetro PI001 com calibração até agosto de 2021.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O trocador de calor a placas da marca Alfa Laval, modelo M10-MFM, o qual integra o sistema de aquecimento de água de desengraxe na linha de pintura *e-coat*, foi avaliado aplicando a metodologia proposta para definir se poderá assumir uma quantidade maior de placas para melhorar seu rendimento térmico, e assim atingir o *setpoint* de trabalho em menos tempo. O sistema de aquecimento foi avaliado com duas configurações diferentes, uma delas na forma original de projeto, sendo que o trocador de calor nesta configuração conta com 14 placas, e da forma proposta com 23 placas.

Foi analisado o comportamento do aquecimento da água de desengraxe nas duas configurações, no gráfico apresentado na Figura 25 tem-se a comparação entre os dois processos de aquecimento do desengraxante, a primeira amostragem foi realizada no dia 28 de março na condição original com 14 placas no trocador de calor (TC), a segunda amostragem que foi realizada no dia 23 de maio na condição de teste com 23 placas no TC.

Figura 25 – Comparativo entre rampas de aquecimento na condição de atual e teste



Fonte: Autor (2021)

Na primeira amostragem com a configuração original do TC com 14 placas, pode-se verificar que o aquecimento iniciou às 14h55min na temperatura de 43,5 °C e chegou à temperatura de 65 °C à 22h25min. Neste processo de aquecimento foi necessário o tempo de

07h30min. Já na segunda amostragem com a configuração proposta de 23 placas no TC, pode-se verificar que o aquecimento iniciou às 14h55min na temperatura de 43,5 °C e chegou à temperatura de 65 °C à 21h40min. Neste processo de aquecimento foi necessário o tempo de 06h45min para a água de desengraxe atingir a temperatura desejada, ou seja, houve um ganho de 45 minutos nesse segundo processo.

4.1 ESTIMATIVA DE VAZÃO DO DESENGRAXANTE

Para estimar a vazão do desengraxe que passa pelo trocador de calor foi necessário acompanhar o funcionamento do sistema de aquecimento nas duas condições de avaliação e registrar alguns parâmetros de trabalho. As rotações dos motores da bomba da água de desengraxe e da bomba de água quente foram medidas diretamente no eixo do motor. Para essa medição foi utilizada o tacômetro mencionado na seção 3.2. Foram realizadas 10 medições para cada motor, e utilizou-se a média para realização dos cálculos. Na Tabela 4 são reportados os valores obtidos.

Tabela 4 – Dados coletados de rotação do motor da bomba de desengraxe

Medição	Condição atual n (rpm) <i>Bomba_{des f}</i>	Condição teste n (rpm) <i>Bomba_{des f}</i>
1	1755	1762
2	1757	1764
3	1756	1766
4	1756	1763
5	1754	1761
6	1757	1762
7	1757	1763
8	1756	1763
9	1756	1764
10	1756	1762
Média	1756	1763

Fonte: Autor (2021)

Para estimar a potência do motor, foram medidas as correntes dos motores das bombas da água de desengraxe nas duas situações avaliadas, as medições foram realizadas com alicate

amperímetro citado na seção 3.2. Para fins de cálculos, foram utilizadas as médias dentre as 10 medições. Na Tabela 5 são apresentados os valores obtidos.

Tabela 5 – Dados coletados de corrente do motor da bomba de desengraxe

Medição	Condição atual i (A) <i>Bomba_{des f}</i>	Condição teste i (A) <i>Bomba_{des f}</i>
1	9,5	9,8
2	9,7	10,1
3	9,6	10,1
4	9,6	9,9
5	9,4	9,7
6	9,7	9,8
7	9,7	9,9
8	9,6	9,9
9	9,6	10
10	9,6	9,8
Média	9,6	9,9

Fonte: Autor (2021)

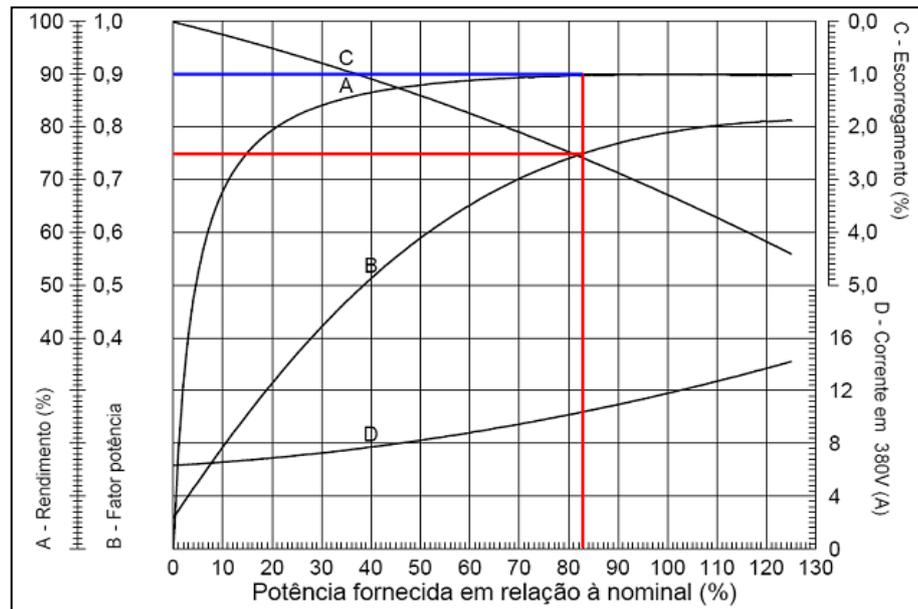
A seguir apresentam-se os cálculos para obtenção de dados para avaliação do trocador de calor na condição original com 14 placas no TC. Fazendo a relação da corrente medida (i) no motor com a corrente nominal (i') obtém-se a potência fornecida (P), através da equação que segue:

$$P = \frac{i}{i'} \cdot 100 \quad (1)$$

$$\therefore P = \frac{9,6}{11,7} \cdot 100 \cong 82\%$$

E com auxílio da curva B do gráfico da Figura 26, encontra-se o valor de 0,75 para fator de potência, e com auxílio da curva A, do mesmo gráfico, encontra-se o valor de 90% para rendimento do motor.

Figura 26 – Curvas de desempenho do motor da bomba na condição original



Fonte: Marcopolo (2021)

Todos os motores estão ligados à tensão de 380 V, e a seguir seguem os cálculos para estimar a vazão de entrada no trocador de calor na condição atual. Segue estimativa de potência ativa na rede de alimentação, onde P_i é a potência do motor em W, i é a corrente do motor em A, V é a tensão do motor e FP é o fator de potência informado na placa do motor elétrico.

$$P_i = i \cdot V \cdot \sqrt{3} \cdot FP \quad (2)$$

$$\therefore P_i = 9,6 \cdot 380 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,75 \cong 4739 \text{ W (6,40 Hp)}$$

Para encontrar a potência líquida de eixo foi utilizada a equação que segue, onde P_e é a potencia no eixo de saída do motor e η_m é o rendimento informado na placa do motor elétrico.

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} \cdot 100 \quad (3)$$

$$\therefore P_e = \frac{P_i \cdot \eta_m}{100} = \frac{4739 \cdot 90}{100} \cong 4265 \text{ W (5,7 Hp)}$$

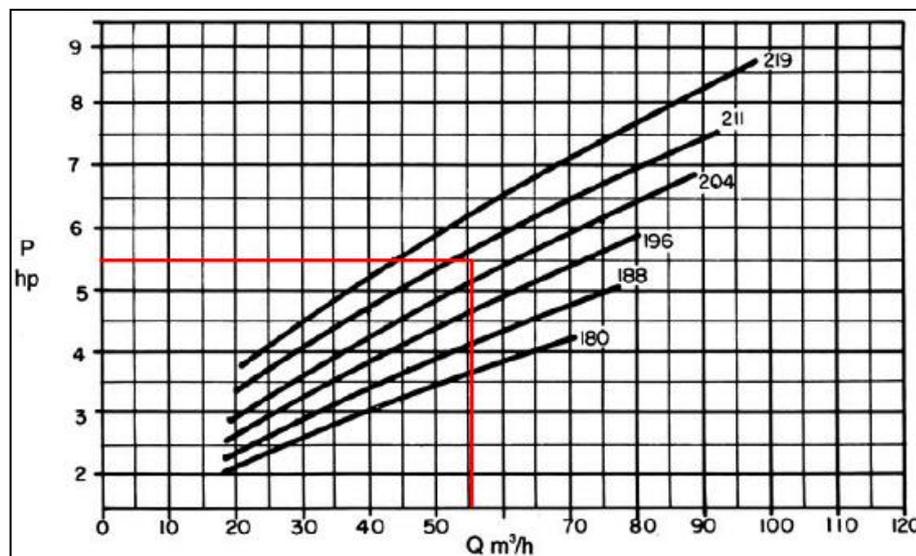
Para corrigir a potência medida, utilizou-se a curva característica da bomba do Anexo C, informações da folha de dados da bomba do Anexo D, curva característica do acionador Anexo E, e informações da folha de dados do acionador do Anexo F, onde a rotação nominal (n') é 1740 *rpm* e a massa específica da água (ρ') é de 1000 kg/m^3 . A rotação medida no motor (n) é de 1756 *rpm* e a massa específica do desengraxante (ρ) à 65 °C foi medida pelo laboratório da empresa que é 1017,38 kg/m^3 , usado o picnômetro mencionado na seção 3.2.

$$\frac{P_e}{P'_e} = \left(\frac{n}{n'}\right)^3 \cdot \frac{\rho}{\rho'} \quad (4)$$

$$\therefore P'_e = \frac{P_e}{\left(\frac{n}{n'}\right)^3} \cdot \frac{\rho'}{\rho} = \frac{5,75}{\left(\frac{1756}{1740}\right)^3} \cdot \frac{1000}{1017,38} \cong 4079 \text{ W (5,5 Hp)}$$

Conforme folha de dados da bomba, o diâmetro nominal do rotor da bomba é de 209 *mm* e segundo a curva da bomba, para motor com 5,5 *Hp* a vazão estimada é de 56 m^3/h .

Figura 27 – Curva característica da bomba na condição original



Fonte: Marcopolo (2021)

Utilizando a equação que segue corrige-se essa vazão para a condição real de operação, onde Q' é a vazão teórica e Q é a vazão real.

$$\frac{Q}{Q'} = \frac{n}{n'} \cdot \frac{\rho}{\rho'} \quad (5)$$

$$\therefore Q = Q' \cdot \frac{n}{n'} \cdot \frac{\rho}{\rho'} = 56 \cdot \frac{1740}{1756} \cdot \frac{1000}{1017,38} \cong 54,50 \text{ m}^3/\text{h} \cong 0,015 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para obter o fluxo mássico que passa pelo trocador de calor utilizou-se a equação que segue, onde \dot{m}_{des} é o fluxo de massa de desengraxante em kg/s , ρ é a massa específica do desengraxante e Q é a vazão de desengraxante.

$$\dot{m}_{des} = \rho \cdot Q \quad (6)$$

$$\therefore \dot{m}_{des} = 1017,38 \cdot 0,015 \cong 15,26 \text{ kg/s} \cong 54938 \text{ kg/h}$$

Para calcular a taxa de calor do trocador de calor utiliza-se a 1ª Lei da Termodinâmica para o volume de controle em torno da TC (lado do desengraxante), regime permanente, desprezando \dot{W}_{VC} , ΔEC e ΔEP , que resulta na equação que segue, onde \dot{Q} é taxa de calor trocada, \dot{m}_{des} é o fluxo de massa de desengraxante, h_s é a entalpia na saída do TC e h_e a entalpia que entra no TC. Considerando ainda o desengraxante como água pura, extrai-se das tabelas termodinâmicas os valores de entalpia.

$$\dot{Q} = \dot{m}_{des} \cdot (h_s - h_e) \quad (7)$$

$$\therefore \dot{Q} = 15,26 \cdot (284,6 - 263,8) \cong 317,40 \text{ kW}$$

Por uma equação semelhante aplicada para lado da água da caldeira, encontra-se o fluxo mássico da água quente que passa pelo TC:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{água,caldeira}} \cdot (h_e - h_s)_{\text{água,caldeira}}$$

$$\therefore \dot{m}_{\text{água,caldeira}} = \frac{\dot{Q}}{(h_e - h_s)_{\text{água,caldeira}}} = \frac{317,4}{(377 - 322,4)} \cong 5,81 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cong 20928 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Pela tabela A.7 no Anexo G, tem-se que a massa específica da água à 90 °C é de 965 kg/m³, e assim pode-se determinar a vazão de água quente no TC, onde Q é a vazão volumétrica, \dot{m} é o fluxo de massa e ρ é a massa específica.

$$Q_{\text{água,caldeira}} = \frac{\dot{m}_{\text{água,caldeira}}}{\rho_{\text{água caldeira}}} \quad (8)$$

$$\therefore Q_{\text{água,caldeira}} = \frac{5,81}{965} \cong 0,00602 \text{ m}^3/\text{s} \cong 21,67 \text{ m}^3/\text{h}$$

A diferença de temperatura média logarítmica ($DTML$) foi obtida pela equação que segue:

$$DTML = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln\left(\frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}\right)} = \frac{(T_{\text{água,e}} - T_{\text{des,s}}) - (T_{\text{água,s}} - T_{\text{des,e}})}{\ln\left(\frac{T_{\text{água,e}} - T_{\text{des,s}}}{T_{\text{água,s}} - T_{\text{des,e}}}\right)} \quad (9)$$

Onde ΔT_a é a diferença de temperatura na extremidade “a” (lado esquerdo) e ΔT_b na extremidade “b” (lado direito) de um TC duplo-tubo de correntes opostas tomado como referência, devendo-se calcular posteriormente o fator de correção “ F ” para corrigir o tipo de equipamento realmente usado. Assim, considerando as seguintes medidas de temperaturas obtidas: $T_{\text{água,e}} = 90$ °C; $T_{\text{água,s}} = 77$ °C; $T_{\text{des,e}} = 63$ °C; e $T_{\text{des,s}} = 68$ °C, tem-se então:

$$\therefore DTML = \frac{(90 - 68) - (77 - 63)}{\ln\left(\frac{90 - 68}{77 - 63}\right)} \cong 17,70 \text{ °C}$$

A seguir as equações para encontrar o fator de correção F que é função de parâmetros como p , q' , r e r_0 , definidos a seguir (PERUSSI, 2010).

$$p = \frac{T_{\text{água,e}} - T_{\text{água,s}}}{T_{\text{água,e}} - T_{\text{des,e}}} \quad (10)$$

Com as temperaturas acima mencionadas de $T_{\text{água}}$ e de T_{des} , tem se:

$$\therefore p = \frac{90 - 77}{90 - 63} \cong 0,48$$

$$q' = \frac{T_{des,s} - T_{des,e}}{T_{\acute{a}gua,e} - T_{des,e}} \quad (11)$$

$$\therefore q' = \frac{68 - 63}{90 - 63} \cong 0,18$$

$$r = \frac{DTML}{T_{\acute{a}gua,e} - T_{des,e}} \quad (12)$$

$$\therefore r = \frac{17,70}{90 - 63} \cong 0,66$$

$$r_0 = \frac{p - q'}{\ln\left(\frac{1 - q'}{1 - p}\right)} \quad (13)$$

$$\therefore r_0 = \frac{0,48 - 0,18}{\ln\left(\frac{1 - 0,18}{1 - 0,48}\right)} \cong 0,66$$

$$F = \frac{r}{r_0} \quad (14)$$

$$\therefore F = \frac{0,66}{0,66} = 1$$

A seguir a equação para cálculo do U coeficiente global de transferência de calor para uma área de troca térmica de $2,6 \text{ m}^2$, onde \dot{Q} é a taxa de transferência de calor, A é a área de troca térmica, F é o fator de correção da taxa de transferência de calor e $DTML$ é diferença de temperatura média logarítmica.

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot F \cdot DTML \quad (15)$$

$$\therefore U = \frac{\dot{Q}}{A \cdot F \cdot DTML} = \frac{317,40 \cdot 1000}{2,6 \cdot 1 \cdot 17,7} \cong 6897 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Para o cálculo da efetividade (ε), são necessários os valores das capacidades térmicas dos dois fluidos ($C = \dot{m} \cdot c_p$). O calor específico dos fluidos foi determinado dividindo o diferencial das entalpias pela diferença de temperaturas entre as entradas e saídas das duas correntes de fluido (água da caldeira e desengraxante). Através do cálculo acima encontra-se os valores de C_{min} e C_{max} que foram utilizados para o cálculo da efetividade (ε) do TC. Para estes casos foram utilizadas as tabelas termodinâmicas da água para encontrar as entalpias do desengraxante.

$$c_{p,água} = \frac{(h_{água,s} - h_{água,e})}{(T_{água,s} - T_{água,e})} \quad (16)$$

$$\therefore c_{p,água} = \frac{(322,4 - 377)}{(77 - 90)} \cong 4,20 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$c_{p,des} = \frac{(h_{des,s} - h_{des,e})}{(T_{des,s} - T_{des,e})} \quad (17)$$

$$\therefore c_{p,des} = \frac{(284,6 - 263,8)}{(68 - 63)} \cong 4,16 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

Cálculo das capacidades térmicas dos fluidos conforme equações que seguem:

$$C_{água} = \dot{m}_{água \text{ caldeira}} \cdot c_{p,água} \quad (18)$$

$$\therefore C_{água} = 5,81 \cdot 4,20 \cong 24,40 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$C_{des} = \dot{m}_{des} \cdot c_{p,des} \quad (19)$$

$$\therefore C_{des} = 15,26 \cdot 4,16 \cong 63,48 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

Como C_{min} corresponde ao valor da água que vem da caldeira, a efetividade (ε) do trocador de calor pode ser obtida pela equação que segue:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{m\acute{a}x}} = \frac{C_{\acute{a}gua} (T_{\acute{a}gua,e} - T_{\acute{a}gua,s})}{C_{min} (T_{\acute{a}gua,e} - T_{des,e})} \quad (20)$$

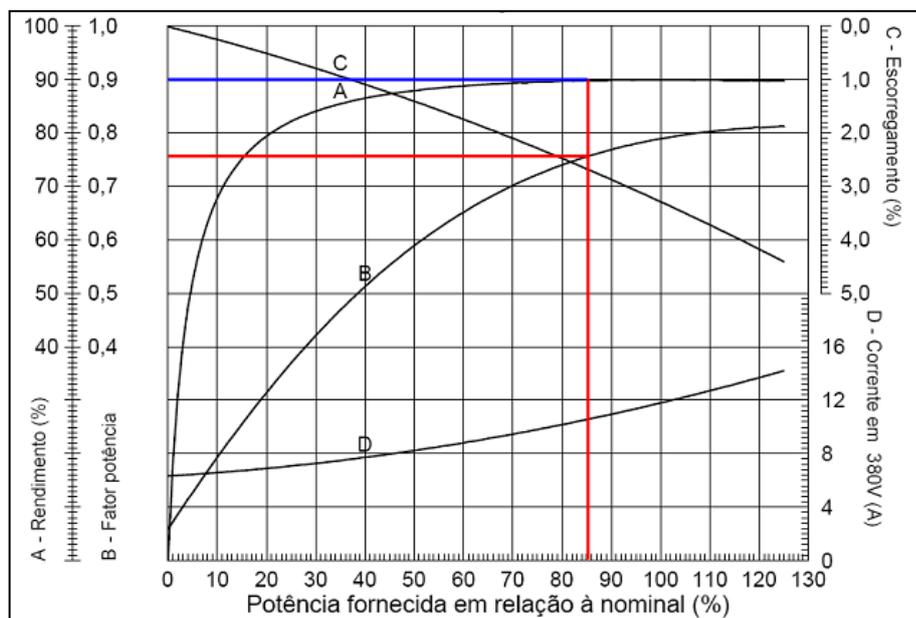
$$\therefore \varepsilon = \frac{(90 - 77)}{(90 - 63)} \cong 0,48$$

A seguir, são apresentados os cálculos para obtenção de dados para avaliação do trocador de calor na condição de teste com 23 placas no TC. Através da Equação 1 obtém-se a potência fornecida (P).

$$\therefore P = \frac{18,8}{21,5} \cdot 100 \cong 87\%$$

E com auxílio da curva B do gráfico da Figura 28, encontra-se o valor de 0,76 para fator de potência, e com auxílio da curva A, do mesmo gráfico, encontra-se o valor de 90 % para rendimento do motor.

Figura 28 - Curvas de desempenho do motor da bomba na condição de teste



Fonte: Marcopolo (2021)

Todos os motores estão ligados à tensão de 380 V, a seguir seguem os cálculos para estimar a vazão de entrada no trocador de calor na condição de teste com 23 placas no TC. A seguir, a estimativa de potência ativa na rede de alimentação através da Equação 2 e a potência líquida de eixo através da Equação 3:

$$\therefore P_i = 9,9 \cdot 380 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,76 \cong 4952 \text{ kW} \cong 6,6 \text{ Hp}$$

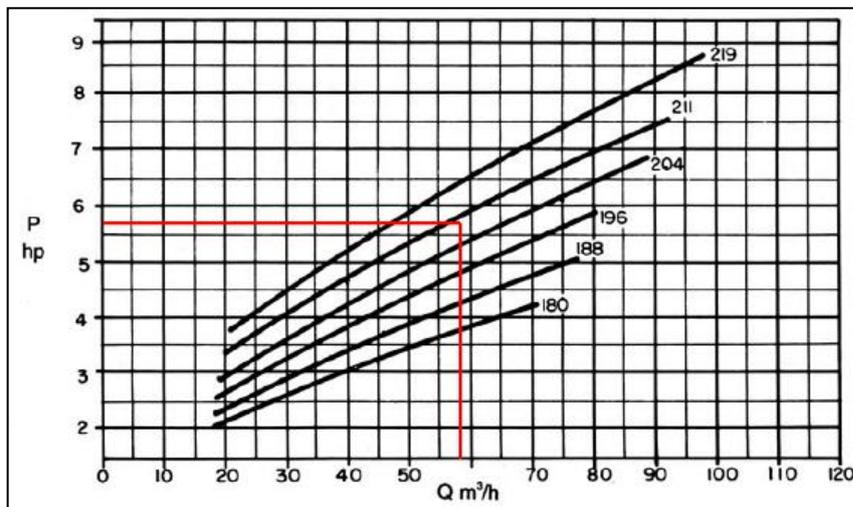
$$\therefore P_e = \frac{P_i \cdot \eta_m}{100} = \frac{4952 \cdot 90}{100} \cong 4457 \text{ W (6 Hp)}$$

Para corrigir a potência medida, utilizou-se a Equação 4, e através da curva característica da bomba do Anexo C, das informações da folha de dados da bomba do Anexo D, a curva característica do acionador do Anexo E, e informações da folha de dados do acionador do Anexo F, chegou-se a vazão estimada da bomba que recalca o desengraxante pelo trocador de calor.

$$\therefore P'_e = \frac{P_e}{\left(\frac{n}{n'}\right)^3} \cdot \frac{\rho'}{\rho} = \frac{5,98}{\left(\frac{1763}{1740}\right)^3} \cdot \frac{1000}{1017,38} \cong 5,65 \text{ Hp}$$

Conforme folha de dados da bomba, o diâmetro nominal do rotor da bomba é de 209 mm e segundo a curva da bomba, para motor com 5,65 Hp a vazão estimada é de 58 m³/h.

Figura 29 –Curva característica da bomba na condição de teste



Fonte: Marcopolo (2021)

Utilizando a equação 5 corrigimos essa vazão para a condição real de operação:

$$\therefore Q = Q' \cdot \frac{n}{n'} \cdot \frac{\rho}{\rho'} = 58 \cdot \frac{1740}{1756} \cdot \frac{1000}{1017,38} \cong 56,5 \text{ m}^3/\text{h} \cong 0,0157 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para obter o fluxo mássico de desengraxante que passa pelo trocador de calor utilizou-se a Equação 6.

$$\therefore \dot{m}_{des} = 1017,38 \cdot 0,0157 \cong 15,97 \text{ kg/s} \cong 57502 \text{ kg/h}$$

Para calcular a taxa de calor do trocador de calor utiliza-se a 1ª Lei da Termodinâmica para o volume de controle em torno da TC (lado do desengraxante), regime permanente, desprezando \dot{W}_{VC} , ΔEC e ΔEP , que resulta na Equação 7. Considerando ainda o desengraxante como água pura, extrai-se das tabelas termodinâmicas os valores de entalpia.

$$\therefore \dot{Q} = 15,97 \cdot (288,8 - 263,8) \cong 399,3 \text{ kW}$$

Por uma equação semelhante aplicada para lado da água da caldeira, encontra-se o fluxo mássico da água quente que passa pelo TC:

$$\therefore \dot{m}_{\text{água,caldeira}} = \frac{\dot{Q}}{(h_e - h_s)_{\text{água,caldeira}}} = \frac{399,3}{(377 - 305,7)} \cong 5,6 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cong 20161 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Pela tabela A.7 no Anexo G, tem-se que a massa específica da água à 90 °C é de 965 kg/m³, e assim pode-se determinar a vazão de água quente no TC através da Equação 8.

$$\therefore Q_{\text{água}} = \frac{5,6}{965} \cong 0,0058 \text{ m}^3/\text{s} \cong 20,89 \text{ m}^3/\text{h}$$

A diferença de temperatura média logarítmica (*DTML*) foi obtida pela Equação 9, considerando as seguintes medidas de temperaturas: $T_{\text{água,e}} = 90$ °C; $T_{\text{água,s}} = 73$ °C; $T_{des,e} = 63$ °C; e $T_{des,s} = 69$ °C, tem-se então:

$$\therefore DTML = \frac{(90 - 69) - (73 - 63)}{\ln\left(\frac{90 - 69}{73 - 63}\right)} \cong 14,83 \text{ } ^\circ\text{C}$$

A seguir, utilizou-se as Equações 10, 11, 12, 13 e 14 para encontrar o fator de correção F .

$$\therefore p = \frac{90 - 73}{90 - 63} \cong 0,63$$

$$\therefore q' = \frac{69 - 63}{90 - 63} \cong 0,22$$

$$\therefore r = \frac{12,04}{90 - 63} \cong 0,45$$

$$\therefore r_0 = \frac{0,63 - 0,22}{\ln\left(\frac{1 - 0,22}{1 - 0,63}\right)} \cong 0,55$$

$$\therefore F = \frac{0,45}{0,55} \cong 0,82$$

A seguir a equação para cálculo do coeficiente global de transferência de calor para uma área de troca térmica de $8,6 \text{ m}^2$:

$$U = \frac{\dot{Q}}{A \cdot F \cdot DTML} = \frac{399,3 \cdot 1000}{4,4 \cdot 0,82 \cdot 14,83} \cong 7463 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Para o cálculo do calor específico dos fluidos foi feita a divisão do diferencial das entalpias pela diferença de temperaturas pelas Equações 16 e 17. Através deste cálculo encontrou-se os valores das capacidades térmicas C_{min} e C_{max} , que foram utilizados para o cálculo da efetividade (ε) do TC. Para estes casos foram utilizadas as tabelas termodinâmicas da água para encontrar as entalpias do desengraxante.

$$\therefore c_{p,\text{água}} = \frac{(305,7 - 377)}{(73 - 90)} = 4,19 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$\therefore c_{p,des} = \frac{(288,8 - 263,8)}{(69 - 63)} = 4,17 \text{ kJ/kg} \cdot K$$

Cálculo das capacidades térmicas dos fluidos conforme Equações 18 e 19.

$$\therefore C_{\acute{a}gua} = 5,6 \cdot 4,19 = 23,46 \text{ kJ/kg} \cdot K$$

$$\therefore C_{des} = 15,97 \cdot 4,17 = 66,6 \text{ kJ/kg} \cdot K$$

Com isso o C_{min} correspondente ao $C_{\acute{a}gua}$, a efetividade (ε) do trocador de calor pode ser obtida pela Equação 20.

$$\therefore \varepsilon = \frac{(90 - 73)}{(90 - 63)} \cong 0,63$$

Com os valores da taxa de calor trocado, do fator de correção F e do $DTML$ foram calculados os valores dos coeficiente globais (U) que para a condição de TC com 14 placas foi de $6897 \text{ W/m}^2 \cdot K$ e, para condição de TC com 23 placas, o valor de U foi de $7463 \text{ W/m}^2 \cdot K$. observa-se que o TC na operação como indicado pelo fabricante no Anexo A, em que a capacidade do mesmo é de 620 kW, com o valor do $DTML$ de 29,11 °C e área de troca térmica de 2,6 m², o valor de U seria de aproximadamente $8192 \text{ W/m}^2 \cdot K$ (para $F \cong 1$).

Incropera et al.(2008) menciona que o coeficiente global U pode variar de 900 a 2500 $\text{W/m}^2 \cdot K$ em trocadores de calor água/água e valores elevados do coeficiente como nesse trabalho foram obtidos, são típicos de trocadores de calor com mudança de fase (condensadores e evaporadores). Para obter-se valores de U até 2500 $\text{W/m}^2 \cdot K$ na aplicação desse trabalho, com os valores obtidos de temperaturas, fluxos de massa e taxas de troca térmica, ter-se-ia que fazer uma averiguação mais detalhada da área de troca térmica de cada placa, ou ainda, um estudo mais detalhado das perdas de carga no fluxo do desengraxante e da água da caldeira que também podem influenciar para a obtenção destes valores de U , o que não foi possível fazer até o momento.

As efetividades (ε) calculadas foram de 0,48 para TC com 14 placas e de 0,63 para o arranjo com 23 placas. Isso mostra que o aumento do número de placas tornou o trocador de calor mais efetivo. Além da melhora encontrada na efetividade, também é importante ressaltar

a diminuição de 45 minutos no tempo de aquecimento do desengraxante, essa diminuição representa 10% de economia no consumo de gás natural e um aumento de produtividade 337,5 m^2 de peças que podem ser produzidas a mais no tempo em que o desengraxante ainda não estava na temperatura adequada para produzir. Sendo assim, recomenda-se a permanência da configuração do trocador de calor com 23 placas.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho buscou-se avaliar o comportamento de um trocador de calor a placas, que está instalado em um sistema de aquecimento de água de desengraxe do pré-tratamento em uma linha de pintura *e-coat*. A avaliação foi realizada em duas configurações diferentes do trocador de calor, ou seja, na condição atual com 14 placas e $2,6 m^2$ de área de troca térmica e na condição de teste com 23 placas e $4,4 m^2$ de área de troca térmica. Ambos foram testados na condição de trabalho do desengraxante a $65 ^\circ C$. Através da estimativa de vazão de desengraxante pela curva característica da bomba instalada no sistema de aquecimento e da apuração de dados de pressão e temperatura foi possível chegar a resultados que comprovam uma melhora em termos de efetividade (ϵ).

Além dos resultados de efetividade pode-se observar uma diminuição do tempo de aquecimento da água de desengraxe. Para situações idênticas de temperatura de início e fim, na configuração de teste do trocador de calor, observou-se uma diminuição de $45 min$ no tempo de aquecimento, isso em termos de produção equivale a $337,5 m^2$ de peças que deixariam de ser produzidas em uma eventual falha no sistema de aquecimento na condição original do TC. Além disso, essa diminuição no tempo de aquecimento reduz em torno de 10% o consumo de gás na rampa de aquecimento, pois não foram alterados parâmetros do queimador da caldeira para os testes realizados.

Como oportunidade de melhoria para futuros trabalhos, é proposto a instalação de medidores de vazão nas entradas do trocador de calor, tanto no lado da água quente, como no lado do desengraxante, o que é importante para validar os dados estimados neste trabalho. Também sugere-se uma avaliação do fator de deposição de impurezas na superfície de troca térmica, pois isso pode influenciar diretamente na efetividade do TC, e assim poder-se-á definir o intervalo adequado para limpeza do equipamento.

Para a caldeira de aquecimento, propõe-se a instalação de um medidor de vazão do gás natural para se conhecer o perfil de consumo de combustível do equipamento. E assim, poder propor melhorias no sistema de aquecimento da água utilizada nos trocadores de calor da linha de pintura *e-coat*, como por exemplo, a utilização do calor residual da estufa de cura do *e-coat* que atualmente é desperdiçado no meio ambiente. Tudo isso, para otimizar os recursos energéticos e financeiros da empresa, gerando maior lucratividade e tornando a empresa mais competitiva.

REFERÊNCIAS

ALTAFINI, C. R. **Aspectos gerais relacionados às caldeiras**. Disponível em:

<http://www.segurancaetrabalho.com.br/download/caldeiras-apostila.pdf> Acessado em: 27 set.

2020

BARTOLOTTI FILHO, C. **Amento da eficiência e produção de vapor com estudo de caso em uma caldeira aquatubular**. 2015. 76 f. Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Santos. 2015.

BAZZO, Edson. **Geração de Vapor**. Florianópolis. 2ª Edição - Editora da UFSC. 1995.

BECKEDORFF, L.E. **Má-distribuição de vazão em trocadores de calor tipo placas**. 2017. 78 f. Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville. 2017.

BECKMAN, B.B. **Estudo sobre recuperação da capacidade máxima de geração de vapor de uma caldeira**. 2019. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Universidade Estadual do Maranhão, como requisito parcial para a graduação em Engenharia Mecânica, São Luís. 2019.

DE BEM, P.P.T. **Minimização do efluente gerado em pré-tratamento de pintura automotiva**. 2008. 215 f. Dissertação apresentada como requisito para obter o título de Mestre em Engenharia Mecânica do curso de mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2008.

DE CAMARGOS, S.R., **Análise dos coeficientes convectivos e global de troca térmica de um trocador de calor de placas do tipo chevron**. 2017. 40 f. Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Química do UNIFOR-MG, Formiga. 2017.

DE CARVALHO, I.A., **Análise de eficiência energética de um trocador de calor de placas do tipo chevron**. 2018. 39 f. Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de engenharia Química do UNIFOR-MG, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química, Formiga. 2018.

DE MATOS, T.P. **Tratamento de superfícies metálicas por cataforese**. 2019. 153 f. Dissertação no âmbito do Mestrado em Química – Controle de Qualidade e Ambiente orientada pelo Professor Doutor Jorge L.G.F.S. Costa Pereira e apresentada ao Departamento de Química, no âmbito da unidade curricular Projeto Científico ou Projeto Industrial. Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal. 2019.

FERNANDES, C.S., DIAS, R.P., NÓBREGA, J.M., MAIA, J.M. **CFD Aplicada ao estudo de permutadores de calor de placas Chevron**. CMNE/CILAMCE. Porto, Portugal. 2007.

FÜHR, H.K. **proposta de ajustes em uma caldeira flamotubular**. 2016. 41 F. Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, Horizontina. 2016.

GAIDEX, C.D. **A influência da manutenção no desempenho térmico de um trocador de calor de placas**. 2019. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento Acadêmico de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa. 2019.

GARDENAL, A.L., SGUARIO, M. K. **Avaliação do desempenho de trocadores de calor**. 2016. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química, do Departamento de Engenharia Química, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa. 2016.

GULLICHSEN, J., PAULAPURO, H., AROMAA, J., KLARIN, A., ATTWOOD, B e BENNETT, D. *Materials, Corrosion Prevention, and Maintenance*. Papermaking Science and Technology, Book 15, Editora: TAPPI PRESS, 1999.

Guan, B., Liu, X., Zhang, T. Energy performance analysis on segmented liquid desiccant airconditioning system for bus spray-paint booths. 2020. 11 f. **Department of Building Science and Technology**, Tsinghua University, Beijing, 100084, China. 2020. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123898> Acessado em: 12 out. 2020

INCROPERA, et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

MOREIRA, M.P. **Avaliação de um trocador de calor utilizado no aquecimento de água de desengraxe**. 2015. 81 f. Relatório de Estágio II, apresentado como requisito parcial à conclusão do curso de Engenharia Mecânica na Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul. 2015.

Neto, C. de M., Amarante, M., Leite, K., Vitor, A., Dantas, B., Barroso, C., Silva, P., & Santos, W. (2018). Processo de pintura e revestimento superficial E-COAT. *Revista Pesquisa E Ação*, 4(1), 101-105. Recuperado de: <https://revistas.brazcubas.br/index.php/pesquisa/article/view/387> Acessado em: 12 out. 2020

OWNER, D.S., Painting Trends in the Automotive Industry. 2013. *Metalfinishing* September/October 2013, 38-40. Disponível em: <http://www.metalfinishingco.com/> Acessado em: 11 out. 2020

Pedro, J.S., Souza A.B., Gonçalves J.V.C., Pereira C. de S.S., Madureira M.T., Estudo preliminar da otimização do processo de pré-tratamento e-coat em uma planta de pintura automotiva. 2018. 10 f. *Brazilian Journal of Production Engineering* Disponível em: https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/V05N02_11/pdf Acessado em: 27 set. 2020

Perussi, R. **Análise do desempenho de trocador de calor de fluxo cruzado por simulação numérica**. 2010. 138 f. Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenheiros de São Carlos, São Paulo. 2010.

RIBEIRO, J.C. **Tratamento e reuso do efluente gerado em um processo de pintura industrial por eletrodeposição**. 2015. 86 f. Dissertação apresentada como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação pela Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo. 2015.

SHAH, R.K., KANDLIKAR, S.G. The influence of the number of thermal plates on plate heat exchanger performance. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 31, ed. 2, p. 227-241, 1988.

SHAH, R. K., SEKULIĆ, Dušan P. **Fundamentals of heat exchanger design**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 941 p. 2003.

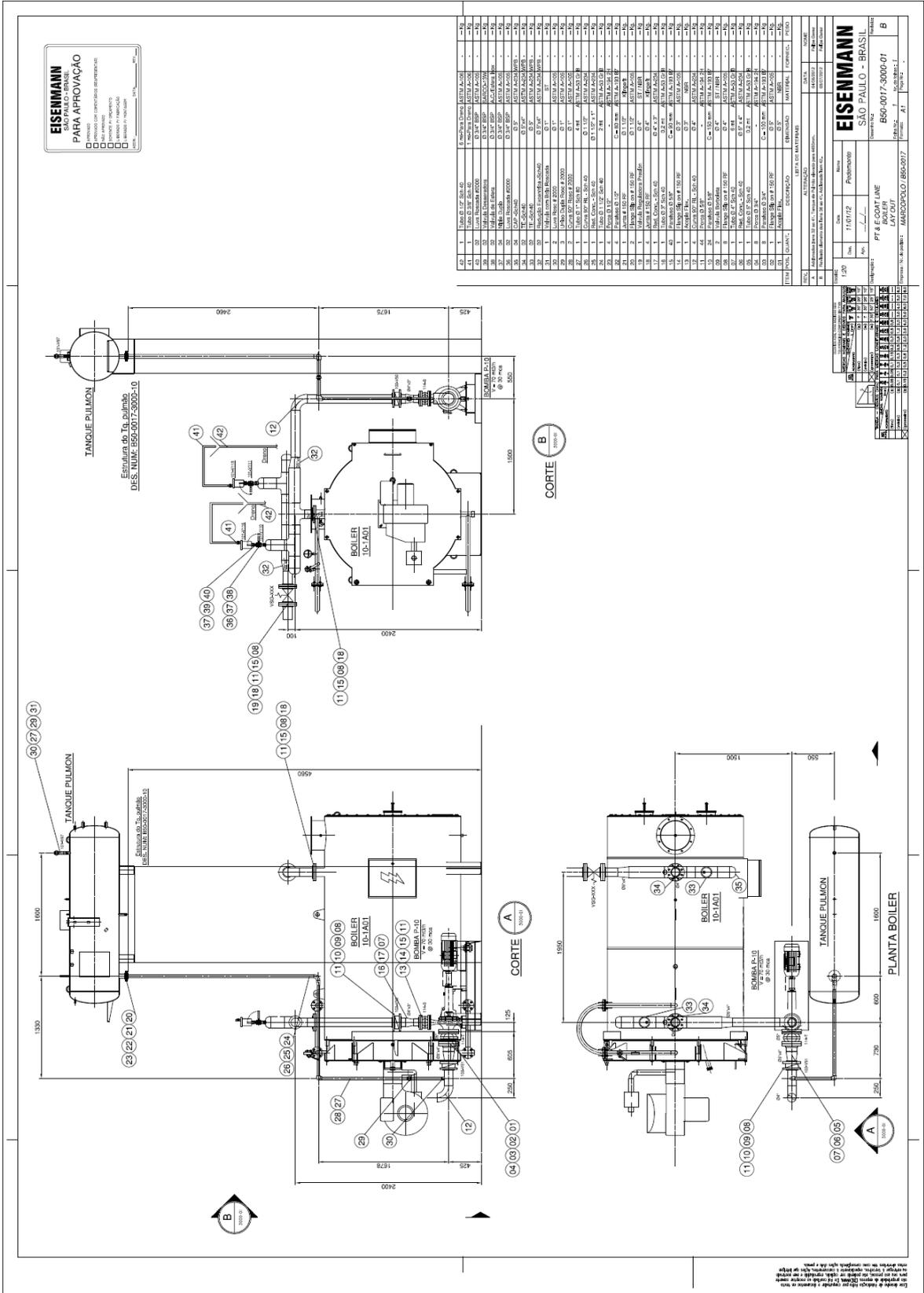
SOARES, B.B. **A utilização do modelo de simulação computacional para análise e modificação de um sistema de produção de pinturas automotivas**. 2013. 130 f. Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul. 2013.

STENSTRASSER, A.M. **Projeto de trocador de calor a placas por meio de simulação computacional**. 2018. 64 f. Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Alimentos, Departamento de Engenharia Química e de Alimentos do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2018.

VERGNHANINI FILHO, R. Metodologia simplificada de cálculo do rendimento térmico de caldeiras. **Revista IPT | Tecnologia e Inovação** v.2, n.7, p. 28-40 abr., 2018. Disponível em: <http://revista.ipt.br/index.php/revistaIPT/article/view/54> Acessado em: 18 out. 2020

ANEXO B

CALDEIRA CAD-HP 1500 ARAUTERM

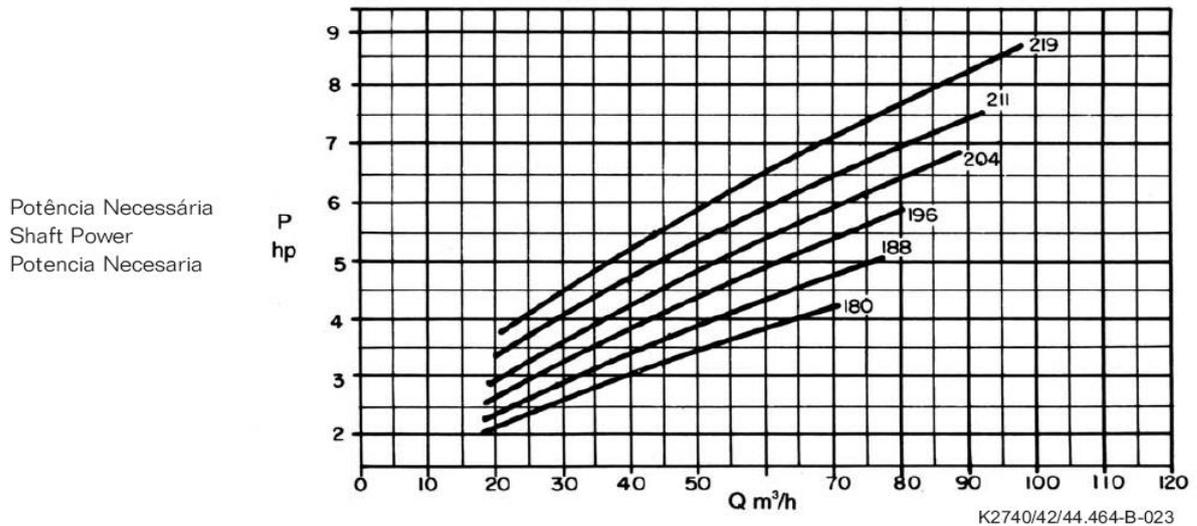
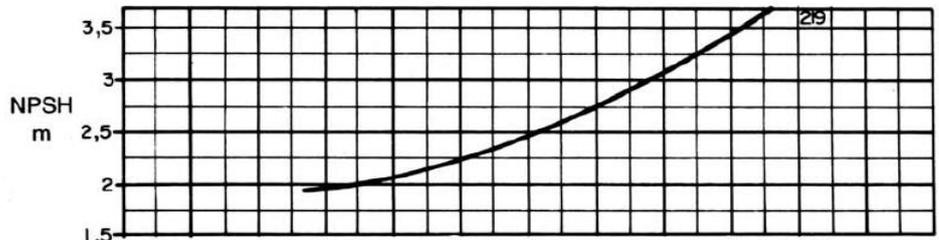
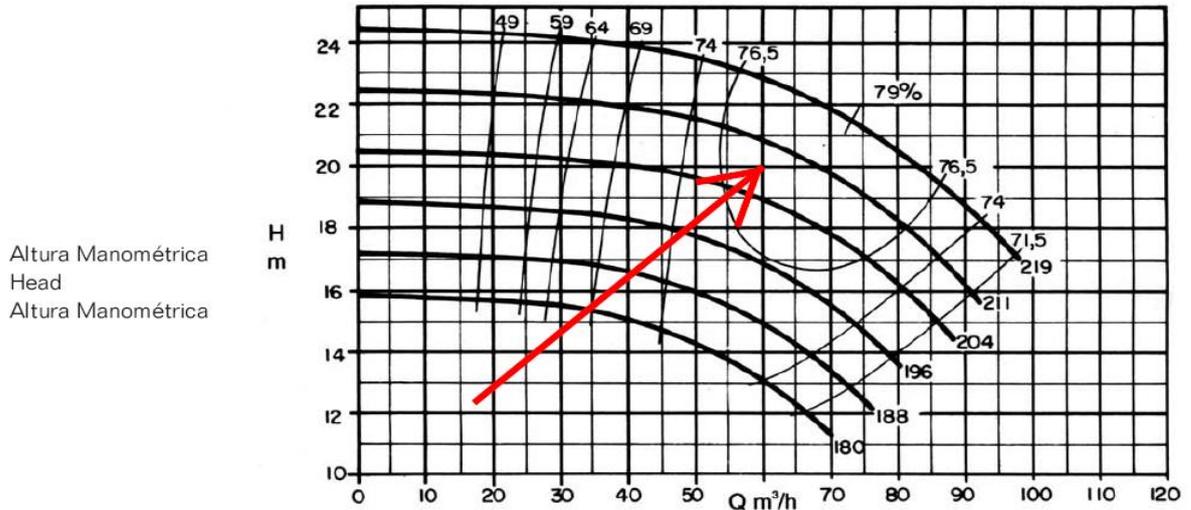


Este projeto é propriedade da EISENMANN S.A. e não pode ser reproduzido, total ou parcialmente, sem a autorização expressa da EISENMANN S.A.

ANEXO C

CURVA CARACTERÍSTICA BOMBA DESENGRAXE NO TC

Bomba Tipo Pump Type Tipo de Bomba	KSB MEGANORM KSB MEGABLOC KSB MEGACHEM KSB MEGACHEM V	Tamanho Size Tamaño	65-200	
Oferta n° Project - No. Oferta - n°	Item n° Item - No. Pos - n°	Velocidade Nominal Nom. Rotative Speed Velocidad Nominal	1750 rpm	



K2740/42/44.464-B-023

Dados válidos para densidade de 1 kg/dm³ e viscosidade cinemática até 20 mm²/s.
Data applies to a density of 1 kg/dm³ and Kinematic viscosity up to 20 mm²/s.
Datos válidos para densidad 1 kg/dm³ y viscosidad cinemática hasta 20 mm²/s.

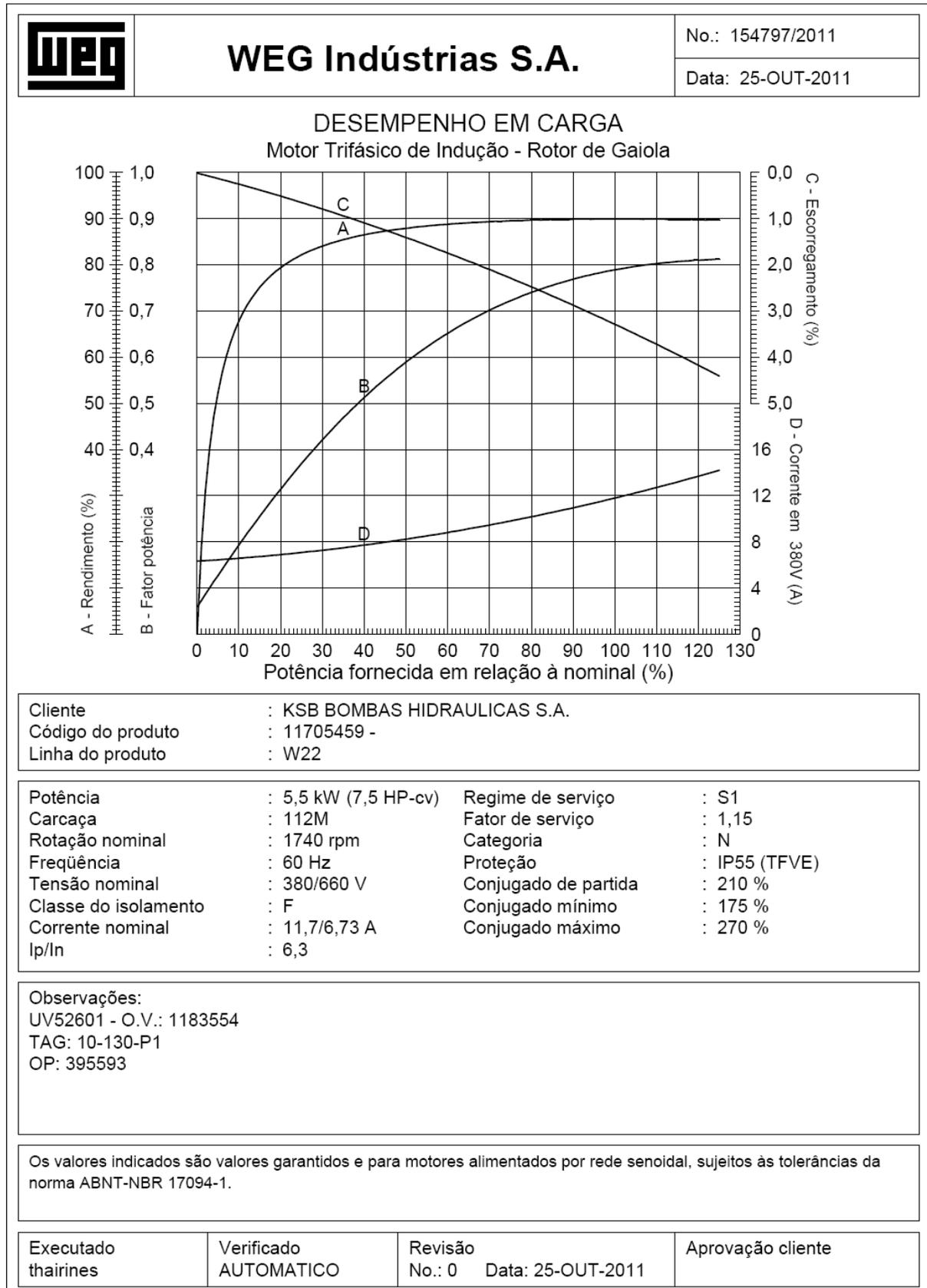
Garantia das características de funcionamento conforme ISO 9906 anexo A.
Operating data according to ISO 9906 annex A.
Garantía de las características de funcionamiento según ISO 9906 suplemento A.

ANEXO D
FOLHA DE DADOS DA BOMBA

FOLHA DE DADOS - BOMBAS HORIZONTAIS														
1	CLIENTE EISENMANN DO BRASIL EQTOS IND LTDA				REFERÊNCIA		NÚMERO		DATA		RESPONSÁVEL			
2					S/ CONSULTA		0							
3					N/PROPOSTA		109CI16282							
4					S/ PEDIDO		B50-0017-16						CARLOS ABE	
5					Rua José Rabello Potella, 400				N/ OP		395593		PEDRO-CI	
6					13225-100 Tel.(011)4596-8500									
7	QT. 1	Modelo da Bomba: KSB MEGACHEM 65-200			N/ITEM Nº	8		TAG Nº	10-130-P1					
8	SERVIÇO: RECIRCULAÇÃO DESENGRAXE				BOCAIS	DIAM(mm)	NORMA	CLASSE	POSIÇÃO					
9	LÍQUIDO A BOMBEAR: DESENGRAXANTE 5%				Sucção	100mm	ANSI B16.1	125# FF	<input checked="" type="checkbox"/> Horizontal	<input type="checkbox"/> Vertical				
10					Descarga	65mm	ANSI B16.1	125# FF	<input type="checkbox"/> Horizontal	<input checked="" type="checkbox"/> Vertical				
11					Nº Estágios: 1									
12	TEMPERATURA DE OPERAÇÃO: 85 °C				CARÇAÇA: Bipartida <input type="checkbox"/> Axialmente <input type="checkbox"/> Radialmente									
13	DENSIDADE: 1 kg/dm³				Montagem <input type="checkbox"/> Suporte <input checked="" type="checkbox"/> Pé <input type="checkbox"/> Linha de Centro									
14	VISCOSIDADE: 0 cSt				ROTOR: Tipo <input checked="" type="checkbox"/> Fechado <input type="checkbox"/> Aberto <input type="checkbox"/> Tubular									
15	VAZÃO NOMINAL: 60 m³/h				Entrada <input checked="" type="checkbox"/> Simples <input type="checkbox"/> Dupla									
16	ALTURA MANOMÉTRICA TOTAL: 20 m				Montagem <input checked="" type="checkbox"/> Em Balanço <input type="checkbox"/> Entre Mancais									
17	PRESSÃO DE SUCÇÃO: 0 kg/cm²g				Fluxo <input checked="" type="checkbox"/> Radial <input type="checkbox"/> Misto									
18	PRESSÃO DE DESCARGA: 2 kg/cm²g				Diâmetro máx.: 219 proj.: 209 mín.: 180 mm									
19	PRESSÃO DIFERENCIAL: 2 kg/cm²				MANCAIS: Tipo <input checked="" type="checkbox"/> Rolamentos <input type="checkbox"/> Deslizantes Lubrific. <input checked="" type="checkbox"/> Óleo <input type="checkbox"/> Graxa									
20	NPSH requerido/disponível: 3 N.I. m				<input type="checkbox"/> Sem <input checked="" type="checkbox"/> Com Copo de Ressuprimento Automático									
21	ROTAÇÃO NOMINAL: 1740 rpm				VEDAÇÃO: <input type="checkbox"/> Gaxeta Material <input type="checkbox"/> Execução Cod. Nº									
22	RENDIMENTO NOMINAL: 77 %				<input checked="" type="checkbox"/> Selo Mecânico									
23	POTÊNCIA ABSORVIDA NOMINAL: 5,8 cv				<input checked="" type="checkbox"/> Sem <input type="checkbox"/> Com Lq.Externo									
24	MOTOR RECOMENDADO: 7,5 cv				Vazão l/min Pressão kgf/cm²									
25	AMT DE SHUT-OFF: 22,01 m				RESFRIAM.: <input type="checkbox"/> Caixa Gaxetas <input type="checkbox"/> Apeta Gaxetas									
26	VAZÃO MÍNIMA DA BOMBA: 21 m³/h				<input type="checkbox"/> Suporte Mancais <input type="checkbox"/> Pedestal									
27	GD² DA BOMBA (COM ÁGUA): 0,0985 kgm²				Consumo total água resfriamento l/s									
28					CONEXÕES: <input type="checkbox"/> Respiro <input checked="" type="checkbox"/> Manômetro/Manovacúô.									
29					<input checked="" type="checkbox"/> Gotejamento <input checked="" type="checkbox"/> Dreno									
30	Fator de Correção de Viscosidade para Vazão 1,00				SENTIDO DE ROTAÇÃO: Visto lado de acionamento: Horário									
31	Fator de Correção de Viscosidade para Altura 1,00				PINTURA: <input checked="" type="checkbox"/> Padrão KSB-BRN5 <input type="checkbox"/> Especial - Anexo									
32	Fator de Correção de Viscosidade para Rendim. 1,00													
33														
34	Combinação de Materiais - Código: <input type="checkbox"/> Ver ETC / CPP													
35														
36														
37	<input checked="" type="checkbox"/> Conforme Indicado Abaixo													
38	CORPO A48CL30				<input checked="" type="checkbox"/> P/ Bomba e Motor <input checked="" type="checkbox"/> Aço Estr. Soldado									
39	ROTOR A48CL30				<input type="checkbox"/> Chapa de Aço Dobrada <input type="checkbox"/> Base Leve									
40	ANEL DESGASTE DO CORPO AISI316				<input type="checkbox"/> Cod. Chumb. p/ Base Leve 008998830									
41	ANEL DESGASTE DO ROTOR AISI316				Código: 062206181									
42	EIXO SAE1045				Marca: KSB GENERICO Modelo: AH82									
43	LUVA PROTETORA DO EIXO AISI316				Espaçador: 140 mm									
44					Código: 061108750									
45					Material <input checked="" type="checkbox"/> Aço <input type="checkbox"/> Latão									
46					Código: 061339084									
47	PADRÃO DE QUALIDADE E TESTES				Marca: FLEX_A_SEAL Cód. API BSPGP									
48	<input checked="" type="checkbox"/> Padrão KSB				Modelo: 45MMBF2-G9-TRFRF/E <input type="checkbox"/> Norma BRN 14									
49	<input checked="" type="checkbox"/> Previsto Plano de Controle de Qualidade-PCQ-Anexo				Código: IEO									
50					Plano API: 11 <input type="checkbox"/> Norma BRN 15									
51					Código: 7,5 CV 1740 rpm Forma Constr. B3D									
52	DESENHOS:				Marca: weawzz plus 3 Fases 380/660V Volts									
53	<input type="checkbox"/> Não Previsto				Proteção: NPSH requerido 112M									
54	<input checked="" type="checkbox"/> Previstos Lista de Desenhos e Documentos-Anexo				Código: POSSIÉ									
55														
56														
57														
58														
59														
60														
61														
62														
63														
64														
65														
66	Revisão 0													
67	Data 6/10/2011													
68	Nome RENATO-CI													
					CODIGO DO PRODUTO:		X20117000000							

ANEXO E

CURVA CARACTERÍSTICA DO ACIONADOR



ANEXO F
FOLHA DE DADOS DO ACIONADOR

	WEG Indústrias S.A.	No.: 154797/2011																					
		Data: 25-OUT-2011																					
FOLHA DE DADOS Motor Trifásico de Indução - Rotor de Gaiola																							
Cliente : KSB BOMBAS HIDRAULICAS S.A. Código do produto : 11705459 Linha do produto : W22																							
Carcaça : 112M Potência : 5,5 kW (7,5 HP-cv) Frequência : 60 Hz Número de pólos : 4 Rotação nominal : 1740 rpm Escorregamento : 3,33 % Tensão nominal : 380/660V Corrente nominal : 11,7/6,73 A Corrente de partida : 73,7/42,4 A Ip/In : 6,3 Corrente a vazio : 6,35/3,66 A Conjugado nominal : 3,08 kgfm Conjugado de partida : 210 % Conjugado máximo : 270 % Categoria : N Classe do isolamento : F Elevação de temperatura : 80 K Tempo de rotor bloqueado : 16 s (quente) Fator de serviço : 1,15 Regime de serviço : S1 Temperatura ambiente : -20°C a +40°C Altitude : 1000 m	Proteção : IP55 (TFVE) Forma construtiva : B3D Sentido de rotação : Ambos Massa aproximada* : 44,0 kg Momento de inércia : 0,0206 kgm ² Nível de pressão sonora : 56,0 dB(A) (global)	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Carga</th> <th>Fator potência</th> <th>Rendimento (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>100%</td> <td>0,79</td> <td>90,0</td> </tr> <tr> <td>75%</td> <td>0,72</td> <td>89,1</td> </tr> <tr> <td>50%</td> <td>0,59</td> <td>88,4</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Mancal</th> <th>Quantidade (lubrificante)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Dianteiro</td> <td>6207-ZZ</td> <td>-----</td> </tr> <tr> <td>Traseiro</td> <td>6206-ZZ</td> <td>-----</td> </tr> </tbody> </table> Intervalo de lubrificação: ----- Graxa - MOBIL POLYREX EM	Carga	Fator potência	Rendimento (%)	100%	0,79	90,0	75%	0,72	89,1	50%	0,59	88,4		Mancal	Quantidade (lubrificante)	Dianteiro	6207-ZZ	-----	Traseiro	6206-ZZ	-----
Carga	Fator potência	Rendimento (%)																					
100%	0,79	90,0																					
75%	0,72	89,1																					
50%	0,59	88,4																					
	Mancal	Quantidade (lubrificante)																					
Dianteiro	6207-ZZ	-----																					
Traseiro	6206-ZZ	-----																					
Observações: UV52601 - O.V.: 1183554 TAG: 10-130-P1 OP: 395593																							
Os valores indicados são valores garantidos e para motores alimentados por rede senoidal, sujeitos às tolerâncias da norma ABNT-NBR 17094-1. Nível de ruído com tolerância de +3 dB(A). (*) Peso aproximado sujeito a alteração após fabricação dos motores.																							
Executado thairines	Verificado AUTOMATICO	Revisão No.: 0 Data: 25-OUT-2011																					
Aprovação cliente																							

ANEXO G

TABELA DE PROPRIEDADES DA ÁGUA

Tabela A.7
Propriedades da Água (Unidades SI)

Temperatura $T(^{\circ}\text{C})$	Massa Específica, ρ (kg/m^3)	Viscosidade Dinâmica, μ ($\text{N} \cdot \text{s/m}^2$)	Viscosidade Cinemática, ν (m^2/s)	Tensão Superficial, σ (N/m)	Pressão de Vapor, p_v (kPa)	Módulo de Compressibilidade, E_c (GPa)
0	1000	1,76E-03	1,76E-06	0,0757	0,661	2,01
5	1000	1,51E-03	1,51E-06	0,0749	0,872	
10	1000	1,30E-03	1,30E-06	0,0742	1,23	
15	999	1,14E-03	1,14E-06	0,0735	1,71	
20	998	1,01E-03	1,01E-06	0,0727	2,34	2,21
25	997	8,93E-04	8,96E-07	0,0720	3,17	
30	996	8,00E-04	8,03E-07	0,0712	4,25	
35	994	7,21E-04	7,25E-07	0,0704	5,63	
40	992	6,53E-04	6,59E-07	0,0696	7,38	
45	990	5,95E-04	6,02E-07	0,0688	9,59	
50	988	5,46E-04	5,52E-07	0,0679	12,4	2,29
55	986	5,02E-04	5,09E-07	0,0671	15,8	
60	983	4,64E-04	4,72E-07	0,0662	19,9	
65	980	4,31E-04	4,40E-07	0,0654	25,0	
70	978	4,01E-04	4,10E-07	0,0645	31,2	
75	975	3,75E-04	3,85E-07	0,0636	38,6	
80	972	3,52E-04	3,62E-07	0,0627	47,4	
85	969	3,31E-04	3,41E-07	0,0618	57,8	
90	965	3,12E-04	3,23E-07	0,0608	70,1	2,12
95	962	2,95E-04	3,06E-07	0,0599	84,6	
100	958	2,79E-04	2,92E-07	0,0589	101	