



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Samuel Filipe Bronze Lameiro

**ANÁLISE DE REAPROVEITAMENTO
ENERGÉTICO DE CALOR RADIANTE DE
EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS**

**Dissertação no âmbito do Mestrado em Energia e Ambiente do curso de
Engenharia Mecânica orientada pelo Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues
Gaspar e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica.**

agosto de 2020

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Análise de Reaproveitamento Energético de Calor Radiante de Equipamentos Industriais

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Analysis of Energy Reuse of Radiant Heat of Industrial Equipments

Autor

Samuel Filipe Bronze Lameiro

Orientadores

Adélio Manuel Rodrigues Gaspar

Alexandra Margarida Germano Fortunato

Júri

Presidente	Professor Doutor José Carlos Miranda Góis Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva
Vogais	Ribeiro Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



SRAMPORT – Transmissões Mecânicas, Lda.

Coimbra, agosto, 2020

Agradecimentos

Um projeto de tamanha envergadura como uma dissertação, não seria concretizável sem o apoio de diversas pessoas, apoio esse que se revelou indispensável, nomeadamente, no decurso da situação que atravessamos devido à pandemia pelo Covid-19, com exigência de novos comportamentos na interação entre as partes envolvidas.

Deste modo, gostaria de agradecer a todos aqueles que, direta ou indiretamente, me auxiliaram na concretização do trabalho, designadamente:

Ao Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar, orientador, pela disponibilidade e pelos conhecimentos transmitidos ao longo do meu trajeto académico.

À Engenheira Alexandra Fortunato e ao Engenheiro Paulo Carvalho, pela simpatia e pela disponibilidade com que me auxiliaram na resolução de problemas.

À SRAMPORT e respetivos colaboradores, que, apesar do curto período em que frequentei as instalações, me acolheram com simpatia e tornaram possível vivenciar o quotidiano num ambiente industrial.

À minha família e amigos, pelo apoio incondicional prestado no decorrer deste trabalho.

Resumo

A presente exposição, efetuada no âmbito da Dissertação de Mestrado, propõe descrever o estudo da situação energética dos equipamentos consumidores de energia na sociedade SRAMPORT - Transmissões Mecânicas, Lda., concretamente, os fornos industriais, e analisar a viabilidade económica da implementação de uma série de medidas de reaproveitamento de energia térmica.

Numa breve introdução apresenta-se a empresa, com referência ao seu objeto social, componentes produzidos e consumos energéticos no ano de 2019.

Segue-se uma exposição detalhada sobre a caracterização dos principais equipamentos existentes nas instalações da empresa, designadamente, as linhas de fornos contínuos e os fornos de tratamento térmico delta. Descrevem-se os cálculos para apuramento dos valores de consumo associados ao seu funcionamento e respetivos custos económicos.

Partindo da situação atual, foram identificadas as perdas que ocorrem através das paredes dos fornos e analisada a possibilidade de utilização dos gases resultantes da combustão do gás natural, como energia alternativa para aquecimento de água usada noutros processos.

Das várias medidas objeto de estudo, apurou-se que as mais rentáveis, dentro do contexto socio-económico da empresa, seriam as medidas ligadas ao aquecimento da água através da utilização de permutadores de calor instalados nas chaminés dos fornos de funcionamento contínuo, respetivamente, no sistema de lavagem da zona de BARIAGEM da linha 1, permitindo à empresa poupar cerca de 3 498,12 €/ano, com retorno do investimento entre 1 a 2 anos, e no sistema de lavagem intermédio das linhas contínuas, potenciando uma poupança de 828,19 €/ano, com retorno variável entre 6 a 17 anos, dependendo da chaminé escolhida.

Palavras-chave: Energia, Recuperação de calor, Gases de combustão, Perdas térmicas, Fornos industriais, Permutadores de calor.

Abstract

The present exhibition, carried out within the scope of the Master's Dissertation, proposes to describe the study of the energy situation of energy-consuming equipment in the company SRAMPORT – Mechanical Transmissions, Lda., specifically, industrial furnaces, and to analyze the economic feasibility of implementing a series of measures for reusing thermal energy.

In a brief introduction, the company is presented, with reference to its corporate purpose, components produced and energy consumption in 2019.

This is followed by a detailed presentation on the characterization of the main equipment existing at the company's facilities, namely, the lines of continuous furnaces and delta heat treatment furnaces. The calculations for the consumption values associated with their operation and the respective economic costs are described.

Based on the current situation, the losses that occur through the walls of the furnaces were identified and the possibility of using the gases resulting from the combustion of natural gas as an alternative energy for heating water used in other processes was analyzed.

Of the various measures studied, it was found that the most profitable, within the socio-economic context of the company, would be the measures linked to the heating of water through the use of heat exchangers installed in the chimneys of continuous operation furnaces, respectively, in the washing system in the *BARIAGEM* zone of line 1, allowing the company to save around 3 498.12 €/year, with a payback between 1 to 2 years, and in the intermediate washing system of the continuous lines, enhancing savings of 828.19 €/year, with variable payback between 6 to 17 years, depending on the chimney chosen.

Keywords Energy, Heat recovery, Combustion gases, Thermal losses, Industrial furnaces, Heat exchangers.

Índice

Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	vii
Simbologia e Siglas	viii
Simbologia.....	viii
Siglas e acrónimos	viii
1. Introdução.....	10
1.1. Fundamentos e objetivos	11
1.2. A Empresa.....	11
1.3. O processo fabril.....	12
1.4. Os consumos de energia	13
2. Estudo dos fornos industriais.....	14
2.1. Fornos de Tratamento Térmico de Cementação e Têmpera com Funcionamento Contínuo (CTC).....	14
2.1.1. Fornos CTC: Descrição dos tratamentos efetuados.....	15
2.1.2. Fornos CTC: Caraterísticas dos processos	16
2.2. Fornos de Tratamento Térmico Delta (TTD)	29
2.2.1. Fornos TTD: Descrição dos tratamentos efetuados.....	29
2.2.2. Fornos TTD: Caraterísticas dos processos	30
3. Medidas de aproveitamento Energético	33
3.1. Aquecimento da água de lavagem da zona de BARIAGEM da Linha 1	33
3.2. Aquecimento da água do segundo sistema de lavagem nas linhas de fornos contínuos.....	40
3.3. Porta para fornos TTD	42
4. Medidas adicionais	44
4.1. Alteração da estrutura e composição dos fornos TTD de funcionamento a energia elétrica	44
4.2. Renovação do isolamento interior dos fornos CTC.....	46
4.3. Aquecimento do ar de secagem do segundo sistema de lavagem e secagem dos fornos CTC	46
5. Conclusões.....	49
Referências bibliográficas	51
Anexo A – Fotografias termográficas dos fornos TTD.....	53
Anexo B – Fotografias exteriores dos fornos TTD	54
Anexo C – Propriedades das chaminés de austenitização	55
Anexo D – Coeficiente global de transferência de calor	57
Anexo E – Tabela de preços de tubo de cobre	58
Apêndice A - Perdas nos fornos de austenização	59

Apêndice B – Perdas nos fornos de revenido	61
Apêndice C –Perdas nos fornos de TTD (Gás natural)	63
Apêndice D –Perdas nos fornos de TTD (Energia elétrica)	65
Apêndice E – Dimensionamento dos permutadores.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Exemplos da gama de transmissões produzidas	12
Figura 1.2 - Desagregação da energia em função do consumo (a) e Desagregação da energia em função do custo (b)	13
Figura 2.1 - Representação das Linhas de Fornos Contínuos de Tratamento Térmico.....	14
Figura 2.2 - Evolução da temperatura da água da rede (SRAMPORT, 2001)	16
Figura 2.3 - Sistema de lavagem e secagem da zona da BARIAGEM (SRAMPORT, 2010)	17
Figura 2.4 - Fornos de Austenização (SRAMPORT, 2010).....	19
Figura 2.5 - Interior dos fornos de austenização após desmantelamento da retorta (SRAMPORT, 2013).....	20
Figura 2.6 - Fotografias frontal (a) e traseira (b), captadas pela câmara termográfica ThermoCAM SC640 (2010).....	21
Figura 2.7 - Forno de Revenido (SRAMPORT, 2010)	27
Figura 2.8 - Esquematização dos fornos intermitentes de tratamento térmico delta (SRAMPORT, 2018).....	29
Figura 2.9 - Fotografias dos fornos TTD a gás natural (a) e elétricos (b) (SRAMPORT, 2010).....	30
Figura 3.1 - Evolução das temperaturas dos fluidos dependendo do tipo de corrente (Lienhard, 2003).....	34
Figura 3.2 - Esquema do permutador de calor a instalar na medida 4.1	35
Figura 3.3 - Esquema do permutador de calor a instalar na medida 4.2	41
Figura 4.1 - Representação da configuração atual dos fornos TTD elétricos.....	45
Figura 4.2 - Representação da configuração proposta para os fornos TTD elétricos.....	46
Figura 4.3 - Esquema do aquecimento do ar da segunda máquina de secagem	47

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 - Consumo anual da empresa para o ano de 2019 (SRAMPORT, 2020)	13
Tabela 2.1 – Parâmetros de limpeza na zona de BARIAGEM da Linha 1 (SRAMPORT, 2020).....	17
Tabela 2.2 – Parâmetros de limpeza na zona de BARIAGEM da Linha 2 (SRAMPORT, 2020).....	18
Tabela 2.3 - Dados relativos aos consumos dos fornos de austenização.....	20
Tabela 2.4 – Temperaturas das paredes exteriores dos fornos de austenização [°C]	22
Tabela 2.5 - Coeficientes de transmissão de calor por convecção [W/(m ² .K)].....	24
Tabela 2.6 – Custos associados às perdas térmicas nos fornos de austenização	24
Tabela 2.7 - Medições das resistências elétricas de aquecimento da água (Afonso, M.J.P. (2016)).....	25
Tabela 2.8 - Medições das resistências elétricas de aquecimento do ar (Afonso, M.J.P. (2016)).....	26
Tabela 2.9 – Registo de temperaturas das paredes exteriores dos fornos de revenido [°C]	28
Tabela 2.10 - Coeficientes de convecção de calor nos fornos de revenido [W/(m ² .K)]	28
Tabela 2.11 - Custos associados às perdas energéticas nos fornos de revenido.....	28
Tabela 2.12 - Registo de temperaturas das paredes exteriores nos fornos de TTD [°C].....	31
Tabela 2.13 - Coeficientes de convecção de calor nos fornos de TTD	31
Tabela 2.14 - Custos associados às perdas energéticas nos fornos de TTD	32
Tabela 3.1 - Resultados do permutador de calor para aquecimento da EBS.....	40
Tabela 3.2 - Resultados dos permutadores de calor no sistema de lavagem intermédio.....	42
Tabela 3.3 – Poupança anual por forno com a instalação da porta para várias reduções de temperatura.....	43
Tabela 3.4 – Poupança anual total com a instalação das portas para várias reduções de temperatura.....	43
Tabela 4.1 - Resultados dos permutadores de calor no sistema de secagem intermédio	48

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

ΔT – Diferença de temperatura

ΔT_{ml} – Diferença de temperatura média logarítmica

ε – Emissividade [-]

$\eta_{permutador}$ – Rendimento do permutador [-]

σ – Constante de Stefan-Boltzmann, $5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

A – Área da superfície de transferência térmica, m^2

C_p – Calor específico a pressão constante, $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

h – Coeficiente de transferência de calor por convecção, $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

\overline{Nu}_L – Número de Nusselt [-]

Pr – Número de Prandtl [-]

\dot{Q} – Potência, W

Ra_L – Número de Rayleigh [-]

T – Temperatura, °C ou K

T_{fe} – Temperatura do fluido frio à entrada do permutador, °C

T_{fs} – Temperatura do fluido frio à saída do permutador, °C

T_{qe} – Temperatura do fluido quente à entrada do permutador, °C

T_{qs} – Temperatura do fluido quente à saída do permutador, °C

U – Coeficiente global de transferência de calor, $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

Siglas e acrônimos

COV – Símbolo químico do Composto Orgânico Volátil

CTC - Tratamento Térmico de Cementação e Têmpera com Funcionamento

Contínuo

FCH – Tratamento Térmico de Cementação e Têmpera

PCI – Poder Calorífico Inferior

PREn – Plano de Racionalização do consumo Energético

SGCIE – Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia

tep – Tonelada Equivalente de Petróleo

TTD – Tratamento Térmico Delta

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho realizado no âmbito da Dissertação do Mestrado de Engenharia Mecânica, teve como fundamento o estágio curricular realizado na empresa SRAMPORT - Transmissões Mecânicas Lda., com sede em Coimbra, cujo principal objeto social é a produção e montagem de componentes para bicicletas.

No campo industrial a necessidade de produzir mais com o menor custo continua a ser o principal objetivo desde a criação deste setor. É claro que a rapidez e qualidade do produto final também são parâmetros importantes, mas a subsistência de uma boa empresa reside na sua capacidade de produzir ou de fornecer produtos e/ou serviços garantindo o mínimo de custo unitário de produção, ou seja, o custo que a empresa tem de suportar por unidade de produto.

Existem inúmeras formas de diminuir esse custo, nomeadamente, reorganizando o processo de produção, otimizando equipamentos e mão-de-obra ou através da implementação de medidas de reaproveitamento energético. Esta última forma, tema deste trabalho, prende-se na necessidade de aproveitar energia que, de outra forma, seria dissipada para o meio envolvente. A título de exemplo, poderá indicar-se a energia térmica dos gases de combustão de equipamentos alimentados por gás natural, que geralmente apresentam temperaturas elevadas, ou o calor radiante emitido por parte de equipamentos industriais, fruto de um isolamento deteriorado ou apenas incapaz de preservar a elevada temperatura imposta no seu interior.

A problemática da recuperação de energia representa um tema discutido ao longo de vários anos pela empresa, quer pela realização de auditorias, quer por abordagens feitas por Ferreira, V.A.R. (2010) e mais tarde por Afonso, M.J.P. (2016). Nelas, encontram-se dissertações sobre os principais equipamentos consumidores de energia da empresa, respetivamente acompanhados por medidas com vista ao aumento da eficiência energética. Deste modo, esta exposição irá seguir a mesma linha de investigação, com o estudo dos vários consumidores de energia existentes e consequente apresentação de medidas propiciadoras de consumos energéticos alternativos e mais rentáveis.

1.1. Fundamentos e objetivos

De acordo com o Decreto-Lei n.º 71/2008 de 15 de abril, as instalações consumidoras intensivas de energia que apresentem consumos anuais iguais ou superiores a 500 tep estão abrangidas pelo Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (SGCIE). Consequência disto, é a imposição da realização de um plano de racionalização do consumo energético (PREn), resultado de auditorias energéticas onde se implementam medidas de aumento de eficiência energética. A SRAMPORT apresentou um consumo energético superior a este valor no ano de 2018, pelo que, este trabalho terá também a vertente de servir como base para a adoção de novas medidas de eficiência energética.

Como objetivos principais e específicos da dissertação, pretende-se analisar a situação atual de perdas de energia térmica pelas paredes dos fornos industriais da empresa, e propor algumas medidas de melhoria capazes de fornecer a energia necessária para as necessidades de alguns processos metalúrgicos. São, também, abordados outros temas de carácter económico, que apesar de não corresponderem propriamente a um reaproveitamento energético, constituem possíveis melhorias nos processos.

1.2. A Empresa

A SRAMPORT – Transmissões Mecânicas, Lda. representa o grupo norte-americano SRAM, responsável pela produção do mais variado tipo de componentes para bicicletas. Situa-se na zona industrial da Pedrulha, concelho de Coimbra, e é atualmente a única unidade das 15 instalações espalhadas pelo mundo situada na Europa. Tal facto, permitiu à SRAMPORT estabelecer-se como o principal responsável pela criação de transmissões mecânicas para bicicletas do grupo, tendo também a seu encargo a montagem de cubos e rodas. Todo o processo de desenvolvimento e manufatura dos componentes que constituem as correntes, como os eixos, rolos e placas, é efetuado dentro das instalações das SRAMPORT. Exemplos dos produtos fabricados estão presentes na **Figura 1.1**.

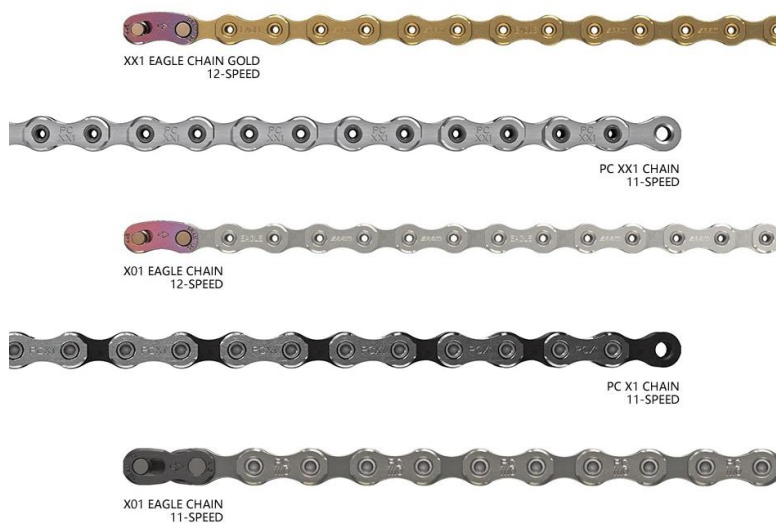


Figura 1.1 - Exemplos da gama de transmissões produzidas

1.3. O processo fabril

Para a produção das transmissões, a empresa dispõe de um conjunto de fornos industriais diferenciados, cada um com propósitos específicos, de modo a garantirem peças com acabamentos e características técnicas distintas e de elevado nível.

Dentro das instalações é possível encontrar 3 grupos de fornos, onde o combustível consumido varia entre energia elétrica e gás natural:

- Fornos de Tratamento Térmico Delta (TTD);
- Fornos de Tratamento Térmico de Cementação e Têmpera (FCH);
- Fornos de Tratamento Térmico de Cementação e Têmpera de Funcionamento Contínuo (CTC).

Desde a chegada da matéria-prima (geralmente aço) até ao produto final (correntes), todos os componentes necessários à criação das transmissões sofrem diversos processos de corte, prensagem, lavagem e tratamento térmico, garantindo assim uma panóplia alargada de resultados com excelente qualidade para o mais variado tipo de funções.

1.4. Os consumos de energia

Durante o ano de 2019, a empresa consumiu energia elétrica, gás natural, gás propano e gasóleo, num total de 758,316 tep (unidade de medida que possibilita a comparação direta entre diferentes formas de energia). Os dados referentes ao consumo do ano de 2019 estão presentes na **Tabela 1.1**.

Tabela 1.1 - Consumo anual da empresa para o ano de 2019 (SRAMPORT, 2020)

	Consumo	Custo anual	Custo unitário	Unidade tep
Energia elétrica	2 427 818 kWh	248 767,55 €	0,102465 €/kWh	521,981 tep
Propano (GPL)	1 448 kg	3 016,00 €	2,082873 €/kg	1,636 tep
Gás Natural	255 779 m ³	112 506,95 €	0,439860 €/m ³	231,508 tep
Gasóleo	3 689,27 L	4 417,14 €	1,197293 €/L	3,191 tep

Para melhor visualização da importância de cada tipo de energia, foi feita a desagregação dos consumos por tipo de energia, **Figura 1.2 (a) e (b)**.

Pode verificar-se que os tipos de energia consumidos em maior quantidade são a energia elétrica e o gás natural, sendo que, o gasóleo e o propano aparecem com percentagens residuais. Este facto não é surpreendente, já que os fornos industriais presentes na empresa consomem esses dois tipos de energia.

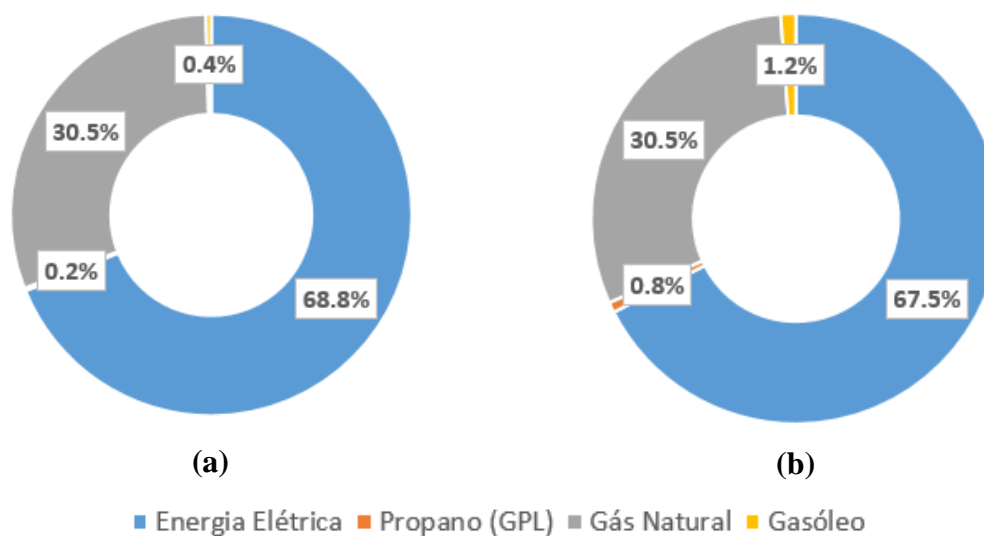


Figura 1.2 - Desagregação da energia em função do consumo (a) e Desagregação da energia em função do custo (b)

2. ESTUDO DOS FORNOS INDUSTRIAIS

2.1. Fornos de Tratamento Térmico de Cementação e Têmpera com Funcionamento Contínuo (CTC)

As linhas de fornos contínuos de produção iniciam-se com uma máquina de lavagem, seguida de outra de secagem, um forno de austenização, onde pode ocorrer um tratamento de têmpera ou cementação, um tanque com banho de polímero, um segundo sistema de lavagem e secagem, e, por fim, um forno de revenido.

Apesar de idênticas, cada linha é responsável pelo tratamento de uma determinada gama de componentes, com tempos de lavagem, secagem ou até mesmo temperaturas de funcionamento diferentes.

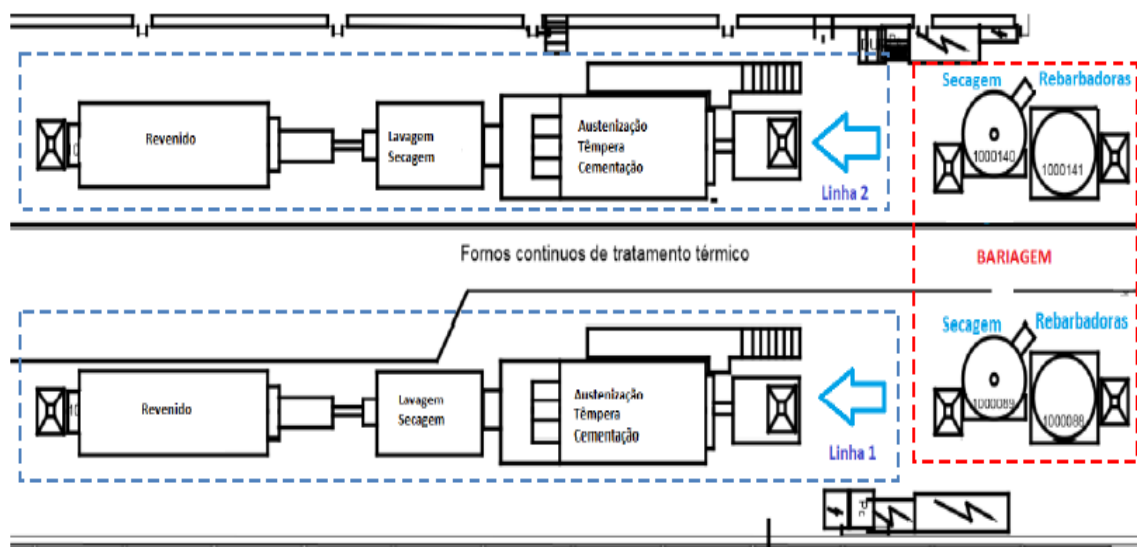


Figura 2.1 - Representação das Linhas de Fornos Contínuos de Tratamento Térmico

2.1.1. Fornos CTC: Descrição dos tratamentos efetuados

O processo tem início com a chegada do lote de peças de aço a uma das referidas linhas contínuas. Devido aos processos de corte e maquinação realizado em etapas anteriores, as peças chegam cobertas de rebarbas e gorduras. Se nada for feito, os tratamentos térmicos impostos pelo conjunto de operações das linhas contínuas geram peças com propriedades técnicas de baixa qualidade. Por isso, a primeira fase a realizar é a lavagem e posterior secagem das peças, que acontece na zona da BARIAGEM.

A lavagem efetua-se através de uma mistura entre detergente desengordurante diluído em água à temperatura ambiente, em concentrações predefinidas e distintas entre linhas. Já a secagem advém da injeção de ar quente, à temperatura de 50°C, sobre as peças, eliminando humidades ou quaisquer outros solventes presentes.

Concluída a limpeza inicial, o operador desloca as peças para a entrada do forno de austenização, onde terá lugar a primeira fase dos tratamentos térmicos. Um elevador encarrega-se de depositar as peças para o interior de uma retorta que, através de movimentos rotativos, vai movendo-as por toda a extensão do forno. Durante os 25 minutos do ciclo, as peças permanecem num ambiente com temperaturas que podem chegar aos 880°C.

Chegadas à extremidade do forno, as peças são mergulhadas num banho de polímero à temperatura constante de 50°C, originando um arrefecimento controlado por choque térmico. A extração do banho é feita com recurso a um tapete magnético.

Arrefecidas e envolvidas nos resíduos do banho polimérico, as peças são encaminhadas para o interior de outra retorta, inserida num segundo conjunto de máquinas de lavagem e secagem. Decomposta em duas fases, a lavagem é feita através da injeção de uma mistura de água e desengordurante (banho desengordurante) e da injeção de apenas água (banho passivante), ambos à temperatura de 50°C. Ainda no interior da retorta, é injetado ar a 100°C, finalizando o processo de limpeza.

As peças são então depositadas sobre um tapete rolante, que as encaminha para o forno de revenido, cujo funcionamento é bastante semelhante ao dos fornos anteriores. As peças são introduzidas no interior de uma retorta que se encarrega de as transportar à sua outra extremidade. Visto que os tratamentos térmicos realizados até então tornam o aço menos resistente ao choque, a passagem pelo forno de revenido garante o aquecimento a uma temperatura inferior, entre 213°C e 250°C, para que, depois, quando as peças caírem no

reservatório final, possam ser arrefecidas lentamente por uma corrente de ar gerada por um ventilador. Garante-se, assim, um aumento da sua ductilidade e da sua elasticidade.

2.1.2. Fornos CTC: Características dos processos

O ponto agora em análise pretende abordar mais detalhadamente as características subjacentes às etapas constituintes das acima referenciadas linhas contínuas.

Através da contagem do número de lotes tratados, verificou-se que, o número diário varia entre 8 a 10 lotes, pelo que, para efeitos de cálculo nas secções seguintes, será usado como valor de referência 9 lotes.

As linhas operam 24 horas por dia, durante todos os dias úteis da semana, ao longo de praticamente todo o ano. São feitas paragens durante três semanas em agosto e uma semana em dezembro, onde não só cessa a produção, como são também desligados todos os equipamentos.

De acordo com a informação obtida na análise às propriedades da água utilizada nas lavagens, presente na **Figura 2.2**, a água chega à temperatura média de 18.2°C, com um mínimo de 12.3°C em dezembro e máximo de 22.5°C em julho.

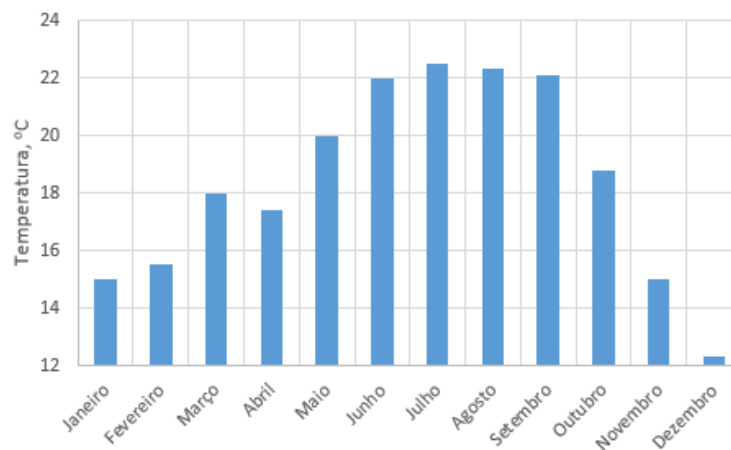


Figura 2.2 - Evolução da temperatura da água da rede (SRAMPOR, 2001)

2.1.2.1. Fornos CTC: Caraterização da zona de BARIAGEM

Tendo em conta as especificidades das peças a tratar, é necessário submetê-las a diferentes condições de lavagem e secagem, de forma a que estas se tornem mais eficientes. Nesta linha de raciocínio, foi considerado que as respetivas máquinas, presentes na **Figura 2.3**, tinham de ser programadas com diferentes ciclos de lavagem e secagem, de modo a que, com o simples conhecimento do lote de peças a tratar, o operador pudesse imediatamente selecionar qual o ciclo que melhor se adequava.



Figura 2.3 - Sistema de lavagem e secagem da zona da BARIAGEM (SRAMPORT, 2010)

O número e especificidades dos ciclos diferem entre si e entre linhas, com volumes de mistura (água e detergente desengordurante) e durações de lavagem e secagem diferentes. As **Tabelas 2.1 e 2.2** mostram as diferenças existentes entre ciclos.

Tabela 2.1 – Parâmetros de limpeza na zona de BARIAGEM da Linha 1 (SRAMPORT, 2020)

Linha 1				
Ciclo	Duração [s]	Volume [L]	Caudal [m ³ /h]	Secagem [s]
1	3600	100	0,10000	1200
4	1920	90	0,16875	1200
6	5100	90	0,06353	1200

Tabela 2.2 – Parâmetros de limpeza na zona de BARIAGEM da Linha 2 (SRAMPORT, 2020)

Linha 2				
Ciclo	Duração [s]	Volume [L]	Caudal [m³/h]	Secagem [s]
6	6300	110	0,06286	1800
8	4800	100	0,07500	2700

Dado que cada ciclo requer um caudal diferente de mistura, pode não existir um consumo constante de água ao longo do dia. No entanto, é possível concluir que, na pior das situações, ou seja, naquela em que seria necessário consumir mais volume de água por unidade de tempo, os referidos 9 lotes diários da linha 1 requereriam o ciclo de lavagem e secagem 4, e os da linha 2 o respetivo ciclo 8.

Uma particularidade da máquina de lavagem da linha 1 é que esta, apesar de apresentar a mistura de lavagem com maior concentração de detergente do que na linha 2, requer que o operador insira manualmente 0,5 kg de detergente no início de cada processo de lavagem, independentemente do ciclo escolhido, a fim de obter resultados satisfatórios na remoção das impurezas.

De certo modo, este acréscimo representa uma deficiência do processo, pois a lavagem tem de ser complementada com a adição de mais detergente. Sabendo que esse detergente tem um custo de 3,16 €/kg, o custo anual deste suplemento é estimado em 3 498,12 €, de acordo com (2.2):

$$Funcionamento = 365 - (2 * 4 * 11) - 31 = 246 \frac{\text{dias}}{\text{ano}} \quad (2.1)$$

$$Custo\ anual = 246 * 9 * 0,5 * 3,16 = 3498,12 \frac{\text{€}}{\text{ano}} \quad (2.2)$$

2.1.2.2. Fornos CTC: Caraterização dos fornos de austenização

Fabricados pela AICHELIN, estes são os fornos de maior dimensão que se podem encontrar nas instalações da empresa, **Figura 2.4**. São fornos com uma idade avançada, estimada em mais de 30 anos. São fabricados em aço com pintura em alumínio de

alta temperatura, tendo como dimensões exteriores 4,761 m de comprimento, 2,136 m de largura e 2,386 m de altura. O seu funcionamento é assegurado pela existência de 8 queimadores alimentados a gás natural.



Figura 2.4 - Fornos de Austenização (SRAMPORT, 2010)

Relativamente ao tipo de consumo registado, os fornos subdividem-se em dois tipos:

- Consumo em produção;
- Consumo em vazio.

A alimentação de gás natural é feita com base na temperatura registada no seu interior. Assim, enquanto estão a realizar um tratamento térmico, sempre que a temperatura é inferior a um dado valor limite, os queimadores ligam e registam um determinado consumo, denominado consumo em produção. Caso a temperatura ultrapasse um outro valor limite, os queimadores desligam-se, deixam de registar consumo, e o ciclo recomeça quando é atingido o limite inferior para a temperatura. Se, porventura, o forno não estiver a realizar tratamento térmico, como é o caso dos fins-de-semana, então o mesmo acontece, porém, com consumo mais baixo quando os queimadores estão ligados, pois apenas é preciso manter a atmosfera no seu interior a uma temperatura constante. A este consumo dá-se o nome de consumo em vazio. A **Tabela 2.3** representa os valores relativos aos consumos dos fornos, onde as duas percentagens listadas foram arbitradas com base nos resultados obtidos por

Afonso, M.J.P. (2016) e nas percentagens do consumo de gás natural de cada equipamento da empresa.

Tabela 2.3 - Dados relativos aos consumos dos fornos de austenização

	Linha 1	Linha 2
Consumo de gás natural em produção [kg/h]	6,73	8,72
Percentagem do consumo de gás natural em vazio relativamente ao consumo em produção	40%	40%
Percentagem do tempo diário em produção	55%	55%

A **Figura 2.5**, fotografia da última intervenção ao interior dos fornos, revela a existência de defeitos na camada de tijolo refratário lateral. O isolamento, que nessa zona é composto por quatro filas de tijolo refratário 250x124x64mm, uma camada de lã de rocha de 70mm e a própria parede do forno de 7mm, que constitui também uma resistência, embora desprezável, à transferência de calor, são os responsáveis pela preservação da energia térmica no interior do forno. Logo, qualquer falha nas características destes componentes manifesta-se num acréscimo da temperatura das paredes exteriores.



Figura 2.5 - Interior dos fornos de austenização após desmantelamento da retorta (SRAMPORT, 2013)

Através da consulta de fotografias disponibilizadas pela empresa, tiradas com recurso a uma câmara termográfica por Ferreira, V.A.R. (2010), foi possível verificar quais as zonas do forno que apresentavam as maiores perdas. Uma nota importante a ter em conta é que em medições deste tipo, é preciso ter especial atenção à parametrização dos equipamentos, já que a temperatura apresentada é o resultado da medição do fluxo de radiação recebido, usando, por isso, a emissividade como parâmetro principal. Nesta situação, as fotografias tiradas, como mostram as **Figuras 2.6 e 2.7**, foram registadas com emissividade igual a 0,92. Este valor não corresponde à emissividade das paredes do forno, que sendo em aço com pintura em alumínio de alta temperatura, apresenta emissividade de 0,52, segundo Paula, S.H. (2010, 11 de março).

Assim, as fotografias servem apenas para identificação das zonas de maior perda de energia. Não tendo sido possível registar as temperaturas das faces superiores para posterior comparação, constatou-se, no entanto, que são as paredes laterais que estão termicamente mais fragilizadas. As faces frontal e traseira apresentam também temperaturas muito elevadas, por serem as zonas de entrada e saída da retorta, respetivamente, não existindo nenhum isolamento nessa secção.

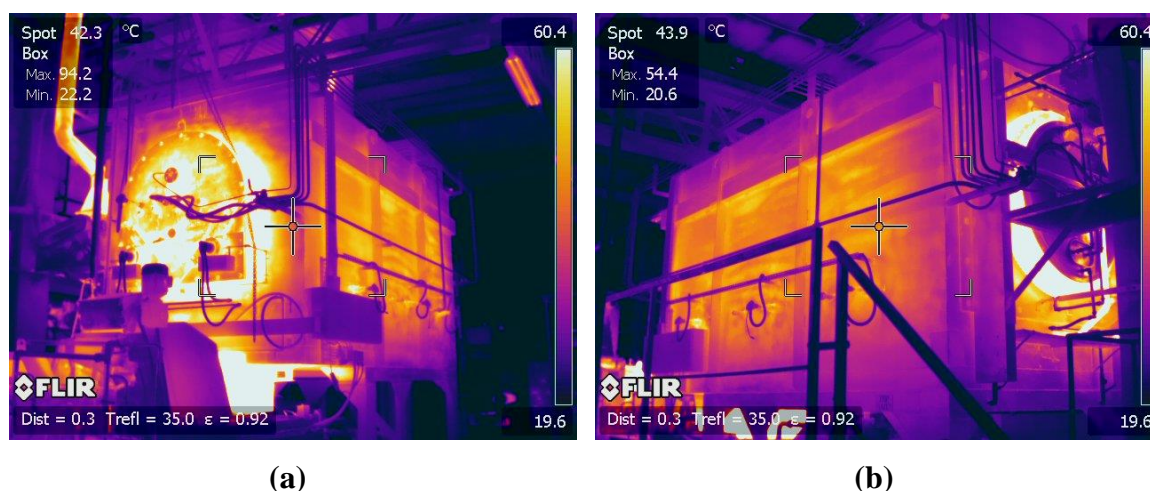


Figura 2.6 - Fotografias frontal (a) e traseira (b), captadas pela câmara termográfica ThermoCAM SC640 (2010)

Com o auxílio de um pirómetro, e após correta calibração da emissividade para 0,52, foram medidas as temperaturas das paredes exteriores dos fornos. Visto que a temperatura não é uniforme ao longo da extensão de cada face, foram registadas as

temperaturas de vários pontos e feita uma média aritmética. Os resultados encontram-se listados na **Tabela 2.4**. Como mais uma vez não se conseguiu determinar a temperatura da face superior, devido às dimensões dos fornos, esta foi arbitrada como sendo igual à temperatura da parede inferior.

Tabela 2.4 – Temperaturas das paredes exteriores dos fornos de austenização [°C]

	Linha 1	Linha 2
Face frontal	90	90
Face traseira	80	80
Face superior	50	54.5
Face inferior	50	54.5
Face lateral esquerda	50	54.5
Face lateral direita	80	80

Através das temperaturas registadas, passa a ser possível calcular a potência perdida pelas paredes exteriores para o meio envolvente, que ocorrem apenas por convecção e radiação, sendo a condução de calor desprezável. Assim, o resultado traduz-se por (2.3):

$$\dot{Q}_{perdas\ pelas\ paredes} = \dot{Q}_{convecção} + \dot{Q}_{radiação} \quad (2.3)$$

A potência convectiva determina-se utilizando a Lei de Newton para o arrefecimento, sendo h o coeficiente de transferência de calor por convecção, A a área de transferência de calor perpendicular ao fluxo de calor e ΔT a diferença entre a temperatura da superfície e a do ambiente do meio envolvente.

$$\dot{Q}_{convecção} = h * A * \Delta T = h * A * (T_s - T_{\infty}) \quad (2.4)$$

Já a potência radiativa é dada pela Lei de Stefan-Boltzmann, onde σ representa a constante de Stefan-Boltzmann, igual a $5,67E-8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$, ε a emissividade da superfície, T_s a temperatura da superfície e T_{∞} a temperatura do meio envolvente, ambas em Kelvin.

$$Q_{radiação} = \sigma * \varepsilon * A * (T_s^4 - T_{\infty}^4) [W] \quad (2.5)$$

Até ao momento, as únicas incógnitas do problema são a temperatura do meio envolvente e o coeficiente de transferência de calor por convecção. Após a medição da temperatura do ambiente em redor dos equipamentos das linhas contínuas durante vários dias, verificou-se que esta não regista oscilações significativas, tendo-se mantido em torno dos 25°C.

Já o coeficiente de convecção será calculado recorrendo às funcionalidades do Excel, dado que este parâmetro dependerá não só das propriedades do fluido envolvente, neste caso o ar, como também da temperatura da superfície, da sua geometria, orientação e tipo de convecção existente.

Na situação em análise, não existe nenhuma fonte externa a condicionar o movimento do fluido, pelo que, são apenas os gradientes de temperatura a gerar diferenças de densidade, que, por sua vez, promovem o movimento do fluido. Trata-se, por isso, de uma situação de convecção natural. Para este tipo de convecção, existem três correlações diferentes para calcular o h dependendo das características das paredes.

No caso de convecção natural em parede plana vertical, é usada (2.6):

$$\overline{Nu}_L = \left(0,825 + \frac{0,387 * Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right)^2, \text{ para toda a gama de } Ra_L \quad (2.6)$$

No caso de uma parede plana horizontal onde a superfície superior está a uma temperatura superior à da envolvente, usa-se o seguinte conjunto de equações:

$$\overline{Nu}_L = 0,54 * Ra_L^{1/4} \quad 10^4 \leq Ra_L \leq 10^7 \quad (2.7)$$

$$\overline{Nu}_L = 0,15 * Ra_L^{1/3} \quad 10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11} \quad (2.8)$$

Por fim, no caso de uma parede plana horizontal onde a superfície inferior está a uma temperatura superior à da envolvente, usa-se a seguinte equação:

$$\overline{Nu}_L = 0,52 * Ra_L^{1/5} \quad 10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10} \quad (2.9)$$

Os valores dos coeficientes para cada situação estão presentes na **Tabela 2.5**.

Tabela 2.5 - Coeficientes de transmissão de calor por convecção [W/(m².K)]

	Linha 1	Linha 2
Face frontal	5,05	5,05
Face traseira	4,84	4,84
Face superior	10,14	10,71
Face inferior	1,72	1,78
Face lateral esquerda	3,87	4,06
Face lateral direita	4,84	4,84

De acordo com os valores de referência obtidos em Portgás (2018), a massa volúmica média do gás natural distribuído na rede é igual a 0,8404 kg/m³ e o seu poder calorífico inferior (PCI) é 47.752 MJ/kg, sendo estes valores necessários para determinar qual o custo anual de gás natural realizado por estes equipamentos. Assim, e juntamente com a informação constante das tabelas que antecedem, procede-se ao cálculo das potências térmicas, (2.3), de cada face do forno, onde os custos associados às perdas calculadas estão presentes na **Tabela 2.6**. Os cálculos subjacentes a estes resultados encontram-se no **APÊNDICE A**.

Tabela 2.6 – Custos associados às perdas térmicas nos fornos de austenização

	Linha 1	Linha 2	Total	Unidades
Consumo	18 146,70	23 514,04	41 660,74	€/ano
	16,13%	20,90%	37,03%	% do total anual
Perdas por convecção	1 821,82	2 000,21	3 821,96	€/ano
	10,04%	8,51%	9,17%	% do consumo
Perdas por radiação	1 423,67	1 527,54	2 951,21	€/ano
	7,85%	6,50%	7,08%	% do consumo
Total de perdas	3 245,49	3 527,69	6 773,17	€/ano
	17,88%	15,00%	16,26%	% do consumo

Comprova-se que as perdas contabilizadas representam um custo anual de 6 773,17 €, equivalente a 16,26% dos gastos associados ao funcionamento dos fornos.

2.1.2.3. Fornos CTC: Caracterização da segunda etapa de Lavagem/Secagem

De modo a preservar o bom funcionamento da máquina de lavar, é recomendado que o operador renove a água do interior dos respetivos tanques uma vez por turno. Havendo 3 turnos por dia, de 8 horas cada, é então recomendado renovar a água 3 vezes por dia.

Atualmente, o aquecimento é feito mediante 8 resistências elétricas para a lavagem com desengordurante e através de um aquecedor submerso no banho para a lavagem passivada. Tal como o funcionamento dos fornos de austenização, o aquecimento não se efetua de um modo contínuo, havendo períodos em que as resistências são desligadas automaticamente assim que a temperatura atinge os 50°C, e, novamente, ligadas quando a temperatura começa a baixar. Logo, para se conhecer qual o custo anual da energia elétrica das resistências, é necessário determinar qual é o tempo efetivo que estão ligadas, e medir as propriedades de corrente e resistência elétrica nesse intervalo de tempo. Estes dados foram recolhidos por Afonso, M.J.P. (2016), onde foi cronometrado o tempo que as resistências se encontravam ligadas e desligadas, sendo feita uma comparação percentual para cada ciclo *ON-OFF*. Depois, registou-se a corrente e a resistência elétrica medida, a fim de determinar o consumo elétrico durante o período de medições. Destes procedimentos, obtiveram-se os resultados transcritos na **Tabela 2.7** e o respetivo custo anual, (2.12).

Tabela 2.7 - Medições das resistências elétricas de aquecimento da água (Afonso, M.J.P. (2016))

ON	13,0	57,0	80,0	58,0	68,0	74,0	17,0	s
OFF	26,0	245,0	150,0	72,0	225,0	58,0	49,0	s

- Tempo total ligada (ON) = 367,0 s
- Tempo total desligada (OFF) = 825,0 s

$$\text{Fração de tempo em ON} = \left(\frac{367,0}{367,0 + 825,0} \right) * 100 = 30,79\% \quad (2.10)$$

- Corrente elétrica medida = 11 A
- Resistência elétrica medida = 36,7 Ω
- Preço unitário médio da energia elétrica em 2019 = 0.102598 €/kWh

$$\text{Funcionamento}_{\text{anual}} = (246 * 24 * 30,79\%) = 1817,76 \text{ h} \quad (2.11)$$

$$Custo_{anual} = 1817,76 * \left(\frac{36,7 * 11^2}{1000} \right) * 0.102598 = 828,19 \text{ €} \quad (2.12)$$

A secagem processa-se com a injeção de ar retirado diretamente do ambiente. A aspiração do ar é feita com recurso a uma bomba de aspiração, que aspira o ar ambiente para o interior de uma conduta retangular de seção 260x230mm, onde o caudal final, depois de aquecido a 100°C, foi medido em 1000 m³/s pelos senhores Artur Serrano e João Paulo com auxílio de um anemómetro de turbina. A **Tabela 2.8** representa os valores também obtidos por Afonso, M.J.P. (2016).

Tabela 2.8 - Medições das resistências elétricas de aquecimento do ar (Afonso, M.J.P. (2016))

ON	70,0	73,0	77,0	s
OFF	193,0	195,0	197,0	s

- Tempo total ligada (ON) = 220,0 s
- Tempo total desligada (OFF) = 585,0 s

$$Fração \text{ de tempo em ON} = \left(\frac{220,0}{220,0 + 585,0} \right) * 100 = 27,33\% \quad (2.13)$$

- Corrente elétrica medida = 41 A
- Resistência elétrica medida = 19.6 Ω

$$Funcionamento_{anual} = (246 * 24 * 27,33\%) = 1613,52 \text{ h} \quad (2.14)$$

$$Custo_{anual} = 1613,52 * \left(\frac{19,6 * 41^2}{1000} \right) * 0.102598 = 5 \ 454,27 \text{ €} \quad (2.15)$$

2.1.2.4. Fornos CTC: Caraterização dos fornos de revenido

Os fornos de revenido, **Figura 2.7**, são fornos semelhantes aos de fornos de austenização, cujas principais diferenças são as dimensões exteriores (3,558 m de comprimento, 1,700 de largura e 1,606 m de altura) e o número de queimadores de gás natural (apenas 3).



Figura 2.7 - Forno de Revenido (SRAMPOR, 2010)

Na impossibilidade de extrair os valores de temperaturas das paredes exteriores a partir das fotografias da câmara termográfica, pelos motivos enumerados no ponto **2.1.2.2**, foi também aqui efetuada uma medição das temperaturas com recurso ao termómetro digital. A **Tabela 2.9** mostra os valores obtidos para cada face dos fornos, onde mais uma vez, a temperatura da face superior foi estimada como sendo igual à da inferior. Os valores dos coeficientes para cada situação estão presentes na **Tabela 2.10**. Os custos associados ao funcionamento destes fornos estão presentes na **Tabela 2.11**. Conclui-se que as perdas contabilizadas representam um custo anual de 1 155,01 €, equivalente a 12,16% dos gastos associados ao funcionamento dos fornos. Os cálculos alusivos a estes resultados encontram-se no **APÊNDICE B**.

Tabela 2.9 – Registo de temperaturas das paredes exteriores dos fornos de revenido [°C]

	Linha 1	Linha 2
Face frontal	60,0	60,0
Face traseira	60,0	60,0
Face superior	33,0	33,0
Face inferior	33,0	33,0
Face lateral esquerda	33,0	38,3
Face lateral direita	46,0	33,0

Tabela 2.10 - Coeficientes de convecção de calor nos fornos de revenido [W/(m².K)]

	Linha 1	Linha 2
Face frontal	4,33	4,33
Face traseira	4,33	4,33
Face superior	6,94	6,94
Face inferior	1,50	1,50
Face lateral esquerda	2,81	3,27
Face lateral direita	3,75	2,81

Tabela 2.11 - Custos associados às perdas energéticas nos fornos de revenido

	Linha 1	Linha 2	Total	Unidades
Consumo	5 537,73	3 961,60	9 499,33	€/ano
	4,92%	3,52%	8,44%	% do total anual
Perdas por convecção	324,97	288,90	613,88	€/ano
	5,87%	7,29%	6,46%	% do consumo
Perdas por radiação	285,14	255,99	541,13	€/ano
	5,15%	6,46%	5,70%	% do consumo
Total de perdas	610,11	544,89	1 155,01	€/ano
	11,02%	13,75%	12,16%	% do consumo

2.2. Fornos de Tratamento Térmico Delta (TTD)

Também com o propósito de efetuar tratamentos térmicos, encontram-se na empresa cinco fornos intermitentes para tratamento térmico delta, sendo que três são alimentados por energia elétrica e dois por gás natural. Tal como nos fornos contínuos, estes apresentam dois tipos de consumo: um em produção e outro em vazio.

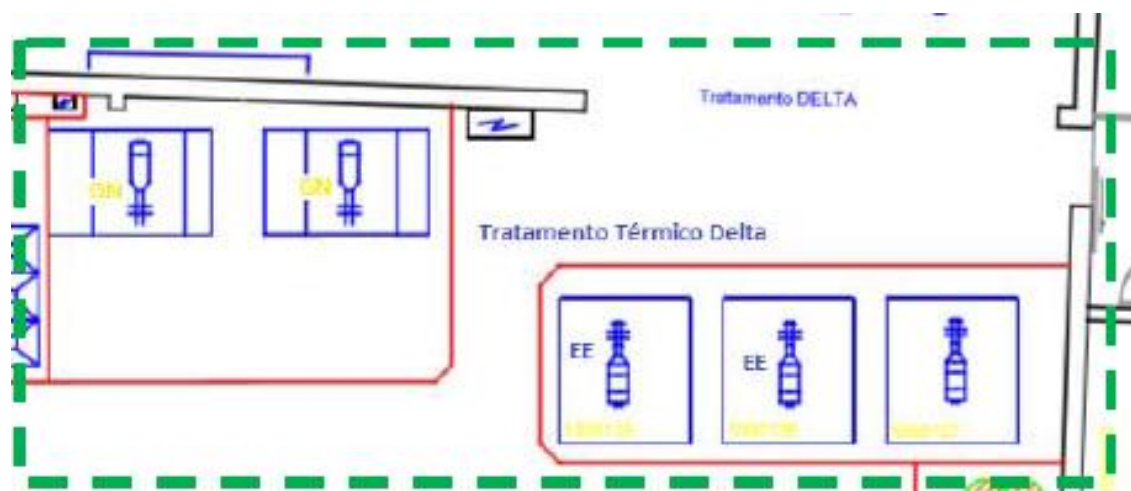


Figura 2.8 - Esquematização dos fornos intermitentes de tratamento térmico delta (SRAMPORT, 2018)

2.2.1. Fornos TTD: Descrição dos tratamentos efetuados

O ciclo de operação nesta secção da fábrica tem início com a submersão das peças numa mistura de elementos químicos sob a forma de pó, dentro de um recipiente metálico. Este processo é efetuado manualmente pelo operador, que insere aproximadamente 50 kg de peças juntamente com diversas proporções de elementos químicos, consoante as características pretendidas (por exemplo, correntes mais ou menos resistentes, mais ou menos dúcteis...). De seguida, o operador insere o recipiente no interior de um dos fornos, onde ocorrem reações químicas originadas pela elevada temperatura, nunca inferior a 500°C.

2.2.2. Fornos TTD: Características dos processos

De forma idêntica aos fornos CTC, também estes fornos se encontram a operar 24 h/dia durante todos os dias úteis do ano, fazendo as pausas nas semanas de agosto e dezembro. A nível de consumos, estes fornos registam, igualmente, um consumo em produção e outro em vazio.

São fabricados em aço com pintura em alumínio de alta temperatura, tendo como dimensões exteriores 1,850 m de comprimento, 1,300 de largura e 2,000 m de altura (**Figura 2.9**)

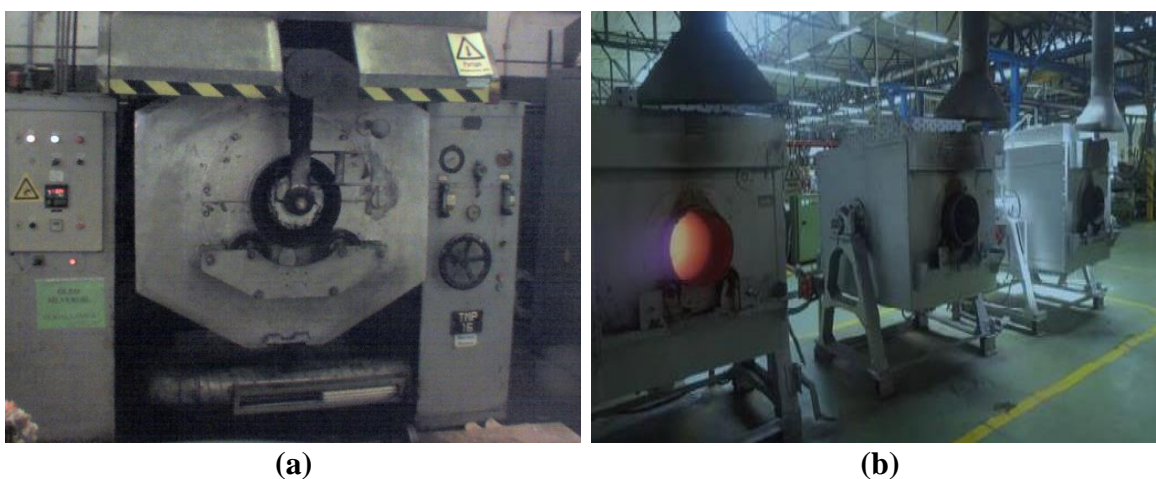


Figura 2.9 - Fotografias dos fornos TTD a gás natural (a) e elétricos (b) (SRAMPORT, 2010)

Uma particularidade destes fornos é que a entrada, com diâmetro de 0,270 m, fica destapada durante o período de vazio, permitindo contacto direto entre o meio envolvente e o interior do forno. O **ANEXO A** revela as fotografias termográficas desta situação.

As temperaturas das paredes exteriores foram registadas segundo a metodologia adotada em **2.1.2.2**. Foram medidos vários pontos das superfícies, e feita uma média com base no tipo de combustível consumido e no período de funcionamento. Assim, obteve-se a **Tabela 2.12**, que representa a situação média existente nos fornos. Face às temperaturas registadas, foram obtidos os seguintes coeficientes de transferência de calor por convecção, presentes na **Tabela 2.13**. Os custos associados ao funcionamento destes fornos estão presentes na **Tabela 2.14**.

Tabela 2.12 - Registo de temperaturas das paredes exteriores nos fornos de TTD [°C]

	Energia Elétrica		Gás Natural	
	Produção	Vazio	Produção	Vazio
Zona de entrada	250,00	500,00	250,00	500,00
Face frontal	72,92	61,98	160,00	136,00
Face traseira	71,50	60,78	116,00	98,60
Face superior	71,67	60,92	115,00	97,75
Face inferior	50,00	42,50	53,33	45,33
Face lateral esquerda	50,00	42,50	50,00	42,50
Face lateral direita	51,60	43,86	70,00	59,50

Tabela 2.13 - Coeficientes de convecção de calor nos fornos de TTD

	Energia Elétrica		Gás Natural		Unidades
	Produção	Vazio	Produção	Vazio	
Zona de entrada	6,63	7,19	6,63	7,19	W/(m ² .K)
Face frontal	4,70	4,37	6,04	5,79	W/(m ² .K)
Face traseira	4,66	4,33	5,53	5,25	W/(m ² .K)
Face superior	12,46	11,43	15,46	14,42	W/(m ² .K)
Face inferior	2,24	2,08	2,30	2,14	W/(m ² .K)
Face lateral esquerda	3,90	3,51	3,90	3,51	W/(m ² .K)
Face lateral direita	3,98	3,59	4,62	4,28	W/(m ² .K)

Tabela 2.14 - Custos associados às perdas energéticas nos fornos de TTD

	Energia elétrica	Gás natural	Total	Unidades
Consumo	55 489,69	23 701,83	92 538,19	€/ano
	22,31%	21,07%	-	% do total anual
Perdas por convecção	4 040,42	2 915,45	6 955,87	€/ano
	7,28%	12,30%	-	% do consumo
Perdas por radiação	3 259,15	2 022,53	5 281,68	€/ano
	5,87%	8,53%	-	% do consumo
Total de perdas	7 299,57	4 937,98	12 237,55	€/ano
	13,15%	20,83%	-	% do consumo

Verifica-se que os custos de funcionamento elétrico representam 22,31% da fatura de eletricidade, com um custo anual de 55 489,69 €. Já as perdas por convecção e radiação pelas paredes totalizam 13,15% deste valor, igual a 7 299,57 €/ano.

Os custos de funcionamento a gás natural correspondem a 21,07% do custo total para essa energia, num total de 23 701,83€. Em perdas térmicas pelas paredes, totalizam 20,83% desse valor, correspondente a 4 937,98 €/ano.

Os cálculos referentes aos resultados acima expostos encontram-se no **APÊNDICE C** (fornos a energia elétrica) e **APÊNDICE D** (fornos a gás natural).

Os resultados permitem concluir que a dissipação de energia é superior nos fornos a gás natural, pois a percentagem de perdas é superior. As fotografias do **ANEXO B** reforçam este resultado, onde se observa o elevado grau de degradação das paredes exteriores frontal e superior.

3. MEDIDAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

Como se infere do ponto 1.4 desta dissertação, os consumos de energia elétrica e de gás natural representam a maior fatia do consumo anual da empresa. Por isso, é de todo relevante estudar medidas que traduzam num decréscimo desse valor, tornando os processos mais eficientes e económicos.

Nesta perspetiva, foram estudadas formas alternativas para reduzir esses consumos, tais como:

- o desenvolvimento de procedimentos no sentido de se permitir que a água necessária nas lavagens das peças seja aquecida por outras fontes que não a energia elétrica;
- suprimir a inserção de detergente adicional aquando da primeira lavagem das peças;
- a poupança de energia derivada do eventual fechamento da entrada dos fornos TTD quando vazios.

3.1. Aquecimento da água de lavagem da zona de BARIAGEM da Linha 1

De acordo com (2.2), são gastos anualmente 3 498,12 € em detergente adicionado a mais na lavagem da linha 1. Numa tentativa de eliminar este gasto, propõe-se a instalação de um permutador de calor que permita que a água atinja os 40°C, utilizando-se apenas a energia dos gases de exaustão emitidos por um dos fornos contínuos.

De acordo com Kärcher – Brasil (2020), para lavadoras de alta pressão, afirma-se que a velocidade dos processos químicos de remoção das impurezas aumenta duas vezes a cada aumento de 10°C na temperatura da água. Não só se verifica um aumento na dissolução das impurezas, como também uma redução no tempo de secagem, pois o maior gradiente de temperatura favorece a rapidez de secagem. Contudo, é preciso ter em consideração que estes dados dizem respeito a máquinas de lavar a alta pressão, cujo modo de operação é diferente do apresentado pelas máquinas da zona da BARIAGEM. Apesar de

se tornar mais eficiente, os ganhos reais na remoção dos óleos e gorduras para este caso só se poderiam quantificar realizando uma comparação entre peças lavadas à temperatura atual e peças lavadas a 40°C. Como tal, não havendo dados sobre esta comparação, foi estipulado que o aumento de temperatura seria suficiente para tornar obsoleta a necessidade de introduzir o detergente extra por lavagem por parte do operador.

Sendo um problema de dimensionamento de permutadores, será utilizado o método da diferença de temperaturas média logarítmica (DTML), expresso por (3.1):

$$\dot{Q} = U * A * \Delta T_{ml} \quad (3.1)$$

onde \dot{Q} é a potência térmica, U o coeficiente global de transferência de calor, A a área de transferência de calor e ΔT_{ml} a diferença de temperatura média logarítmica. A equação deste último depende do tipo de corrente verificado entre os fluidos. Para a situação em análise, será considerado um escoamento em contracorrente, como mostra a **Figura 3.1**:

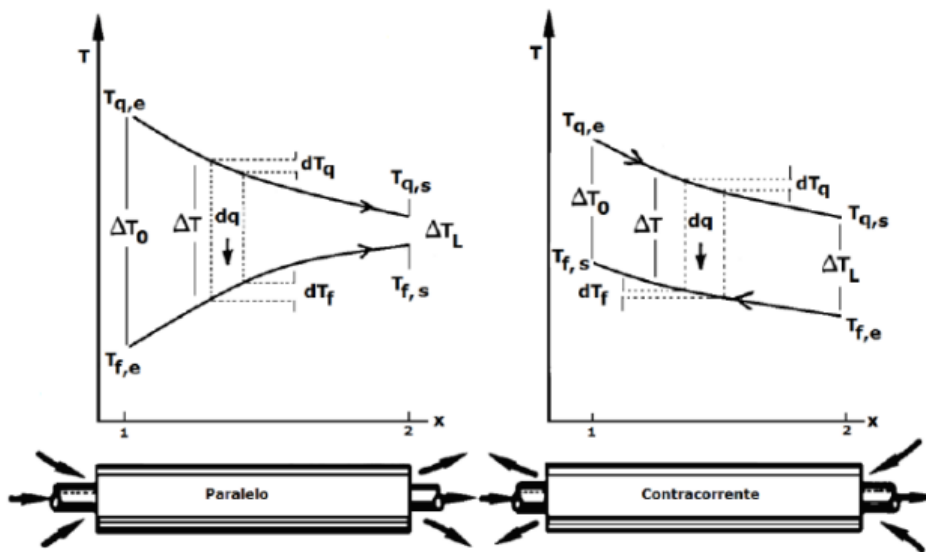


Figura 3.1 - Evolução das temperaturas dos fluidos dependendo do tipo de corrente (Lienhard, 2003)

Deste modo, ΔT_{ml} é calculada segundo (3.2):

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{qs} - T_{fe}) - (T_{qe} - T_{fs})}{\ln \frac{(T_{qs} - T_{fe})}{(T_{qe} - T_{fs})}} \quad (3.2)$$

Pretende-se que o permutador seja composto pela inserção de um tubo de cobre, sob a forma de serpentina, colocado no interior da chaminé responsável pela libertação dos gases de exaustão dos fornos. Atualmente, as chaminés apresentam um determinado caudal de exaustão, dependente do seu diâmetro. Logo, ao se inserir a serpentina, que representa um obstáculo à circulação dos gases, a sua velocidade nessa seção teria de aumentar de forma a que o caudal se mantivesse constante. É, por isso, necessário aumentar o diâmetro da seção ocupada de modo a que a velocidade se mantenha inalterada ao longo da chaminé.

A **Figura 3.2** retrata em pormenor o permutador idealizado. Para minimizar as perdas de calor, será necessário que as áreas exteriores da chaminé e do tubo que faz a ligação entre a serpentina e o depósito de armazenamento sejam devidamente isolados do ponto de vista térmico.

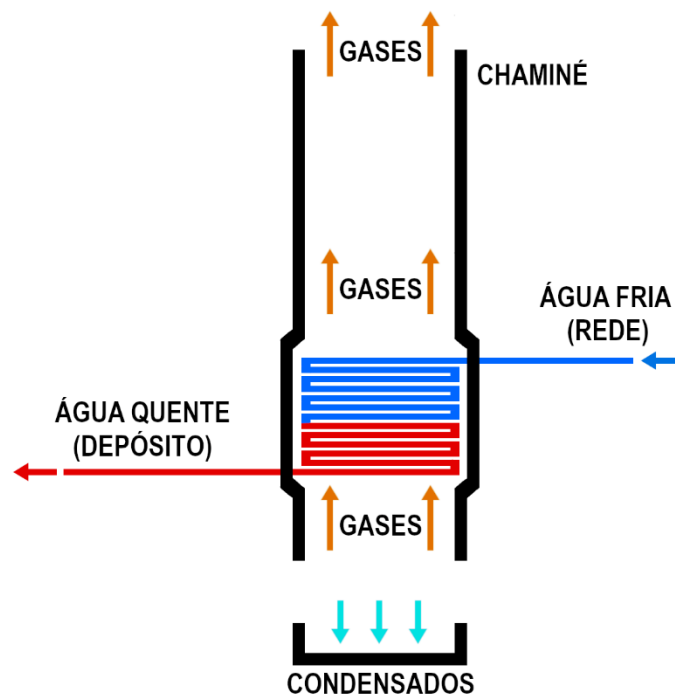


Figura 3.2 - Esquema do permutador de calor a instalar na medida 4.1

Com este sistema, poderá haver formação de condensados, como consequência do arrefecimento dos gases da combustão do gás natural. Ao analisar a equação (3.3), que representa a reação química da combustão do gás natural (CH_4), observa-se a formação dos compostos CO_2 , H_2O e N_2 , podendo surgir também vestígios de CO ou COV , mas em percentagens muito reduzidas.



Dado que a chaminé está em contacto direto com o ar atmosférico, à pressão de 1 atm, também os gases de exaustão terão esse valor, aproximadamente. Com a redução da temperatura dos gases após as trocas de calor no permutador e no caso da pressão parcial de vapor de água dos gases (dependente da temperatura inicial) ser superior à pressão de vapor de água no estado de saturação (dependente da temperatura final), ocorrerá um fenómeno de condensação, onde parte do vapor de água gerado pela combustão passa para o estado líquido, sendo, por isso, necessário instalar um tabuleiro de recolha dos condensados.

Tendo presente o que foi referido anteriormente, torna-se necessário responder às seguintes questões:

- Qual é o caudal de água que se pretende aquecer?
- Será necessário instalar um depósito anexo ao permutador?
- Qual a chaminé mais viável para a instalação do permutador?

Quanto à primeira questão, numa situação crítica e segundo os dados constantes na **Tabela 2.1**, poderá considerar-se que o caudal a garantir para o aquecimento será o do ciclo 4, porque é o que exige maior quantidade de água por unidade de tempo, com 90 L em 1920 s.

No que toca à segunda questão, sabendo que a lavagem é feita inserindo o volume total da água no interior da máquina no início de cada operação, poderá concluir-se que o aquecimento pode ser feito gradualmente, com a instalação de um depósito de inércia para acumular a água aquecida e garantir que esta pode ser usada na sua totalidade no momento em que é requerida. Sendo o cálculo do caudal de água a aquecer igual ao caudal da situação crítica referida, torna-se necessário garantir que o depósito a utilizar tenha capacidade igual ou superior a 100L, para permitir que numa situação de ciclo 1 exista o volume inicial exigido para a lavagem. De acordo com o estabelecido no Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto, é aconselhado que o aquecimento de águas sanitárias para armazenamento em depósitos se realize a uma temperatura igual ou superior a 60°C, recomendação estabelecida para evitar o desenvolvimento da bactéria *legionella*.

Finalmente, no respeitante à terceira questão, cumpre determinar qual a chaminé ideal para acomodar o permutador e permitir o aquecimento do caudal de água necessário. Como o intuito deste trabalho foi o de apresentar um conjunto de soluções que permitam à SRAMPORT obter resultados mais eficientes e económicos, os cálculos foram realizados

tendo em conta várias possibilidades. Em consequência, foram tidos em conta os resultados energéticos obtidos tanto nos fornos de austenização como nos de revenido.

Estabelecidos os parâmetros fundamentais à resolução, é tempo de começar a calcular as variáveis envolvidas no dimensionamento. A primeira etapa será representada por (3.4), onde se determina a potência térmica que se pretende transferir dos gases para promover o aquecimento da água.

$$\dot{Q} = \frac{\dot{m}_{\text{água}} * C_{p,\text{água}} * (T_{\text{inicial,água}} - T_{\text{final,água}})}{\eta_{\text{permutador}}} \quad (3.4)$$

Arbitrando o rendimento do permutador como sendo 95%, valor típico para permutadores do tipo ar-água, disponibilizado pelo Professor Doutor José Carlos Miranda Góis, determina-se a primeira estimativa para a temperatura final dos gases, considerando que não existe condensação. Como o calor específico a pressão constante dos gases depende da sua temperatura média, o problema é resolvido através de um processo iterativo.

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{inicial,gases}} * C_{p,\text{inicial,gases}} * (T_{\text{inicial,gases}} - T_{\text{final,gases}}) \quad (3.5)$$

Nota: O valor do calor específico a pressão constante dos gases foi determinado com base numa equação também disponibilizada pelo Professor Doutor José Carlos Miranda Góis, presente em (3.6).

$$C_{p,\text{gases}} = (1.7823249999987 * 10^{-7} * \Delta T^2 + 0.000177910150000069 * \Delta T + 1.16500403499999) \quad (3.6)$$

Convém realçar o seguinte aspeto: os gases de exaustão, após entrarem em contacto com a superfície exterior da serpentina, a qual se encontra a uma temperatura inferior a 100°C, dão lugar à ocorrência de um fenómeno de condensação de parte do vapor de água presente nos mesmos. No entanto, este acontecimento foi desprezado por se considerar que a criação de condensados nesta fase seria muito baixa.

Assim, apenas se irá considerar o fenómeno de condensação ocorrido aquando da diminuição, abaixo de 100°C, da temperatura dos gases de exaustão, que se manifesta após a permuta de energia no interior da chaminé.

Em face do explanado, e atendendo ao resultado obtido da temperatura final dos gases, é possível traçar três conclusões:

- **Temperatura igual ou superior a 100°C:** o vapor de água presente nos gases mantém o mesmo caudal, não havendo condensação;
- **Temperatura inferior a 100°C:** Ocorre condensação do vapor de água. Em consequência, a temperatura final dos gases terá de ser novamente calculada, pois a condensação do vapor é uma reação exotérmica, e por isso, a temperatura final real dos gases será mais alta, sendo o aumento residual;
- **Temperatura inferior a 60°C:** Se a temperatura final dos gases for inferior à temperatura de saída da água, então verifica-se que a energia necessária ao aquecimento é superior àquela que os gases conseguem fornecer. Neste caso, o aquecimento total é impossível.

Nas situações com ocorrência de condensação, o novo valor da temperatura final dos gases efetua-se aplicando o teorema da conservação de energia para obter as equações do balanço energético, (3.7), e do balanço mássico, (3.8).

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\text{aquecimento da água}} + \dot{Q}_{\text{condensação}} \quad (3.7)$$

$$\dot{m}_{\text{inicial,gases}} = \dot{m}_{\text{final,gases}} + \dot{m}_{\text{condensados}} \quad (3.8)$$

O problema passa a ter duas incógnitas: a nova temperatura final dos gases e o caudal de condensados formados. No entanto, de acordo com (3.10), a potência térmica gerada pela condensação varia com o calor latente de vaporização, que por sua vez varia com a temperatura final dos gases. Ou seja, para cada valor de temperatura, existe um novo valor do calor latente, que por sua vez origina um novo valor para o caudal de condensados. Para resolver esta situação, deve-se fixar uma das variáveis e resolver em ordem à restante. Assim, foi fixada a temperatura final, considerando que esta seria 1°C superior à temperatura final obtida sem o fenómeno de condensação.

$$\dot{Q}_{\text{aquecimento da água}} = \dot{m}_{\text{água}} * C_{p,\text{água}} * (T_{\text{inicial,água}} - T_{\text{final,água}}) \quad (3.9)$$

$$\dot{Q}_{condensação} = \dot{m}_{condensados} * h_{fg} \quad (3.10)$$

Dependendo da possibilidade dos gases em realizar o aquecimento, está-se em condições de determinar (3.2). O coeficiente global de transferência de calor, U , é obtido através do **ANEXO D**, onde o valor médio para o caso dos fluidos serem água e gases, e o material de superfície transmissora ser cobre é $13,1 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$. Assim, a área de transferência necessária para a permuta calcula-se através da equação (3.1).

Consultado uma tabela de preços de tubos de cobre no mercado, presente no **ANEXO E**, e estipulando diversos parâmetros com base nos custos associados à criação e instalação de permutadores, obteve-se a **Tabela 3.1**, que representa as características do permutador e a estimativa do período de retorno do investimento. A resolução está exposta na íntegra no **APÊNDICE E**.

- Tubo Cobre Nu em Vara 42x1mm = 23,11€/m
- Massa volúmica do cobre = 8960 kg/m³
- Comprimento de tubo por cada volta na serpentina = 2 m
- Depósito de inércia: Aquafer – 100L = 375,00€
- Custo da criação da serpentina = 10,00€/m
- Custo da mão-de-obra para instalar = 240,00€/dia
- Duração da instalação = 3 dias
- Custos adicionais de instalação* = 50% do valor total
- Custos anuais de manutenção = 7% do resultado

* A percentagem de custos adicionais de instalação engloba não só os custos associados à alteração de diâmetro da chaminé, mas também todos os custos de equipamentos e material que serão necessários para o correto funcionamento do sistema.

Tabela 3.1 - Resultados do permutador de calor para aquecimento da EBS

	Linha 1		Linha 2	
	Austenização	Austenização	Revenido	Revenido
O aquecimento é possível?	Sim	Sim	Sim	Não
Temperatura final dos gases [°C]	91,91	125,15	77,85	48,11
São gerados condensados?	Sim	Não	Sim	-
Caudal de condensados [kg/h]	82,994	0,000	44,489	-
Caudal final de gases [kg/h]	1243,256	1591,250	914,161	-
Área de permuta [m ²]	7,14	4,68	8,96	-
Peso da serpentina [kg]	63,96	41,91	80,25	-
Altura da serpentina [m]	1,20	0,77	1,51	-
Número de voltas da serpentina	28	18	35	-
Custo de instalação [€]	3 832,52	2 883,72	4 533,42	-
Manutenção anual [€]	268,28	201,86	317,34	-
Estimativa do Payback	2 anos	1 ano	2 anos	-

3.2. Aquecimento da água do segundo sistema de lavagem nas linhas de fornos contínuos

Tal como para a hipótese da lavagem na zona da BARIAGEM da linha 1, projetou-se instalar um permutador de calor para aquecimento da água no segundo sistema de lavagem.

Nesta situação, será avaliada a viabilidade do aquecimento da água nas lavagens das linhas 1 e 2 ser feito utilizando a energia dos gases expelidos pelos fornos das respetivas linhas.

Diferente do funcionamento na zona de BARIAGEM, o aquecimento agora exige duas etapas:

- Aquecimento de 300L ao longo de 7,5 horas, para o interior de um depósito de inércia, de forma a que a renovação dos tanques a cada turno seja feita de imediato;

- Aquecimento de um caudal predefinido de água de forma a manter a temperatura nos tanques por volta dos 50°C.

Deste modo, conclui-se que nesta situação são necessários dois permutadores, instalados em série, sendo o primeiro responsável pelo aquecimento da água para o depósito, e o segundo pela manutenção da temperatura dos tanques.

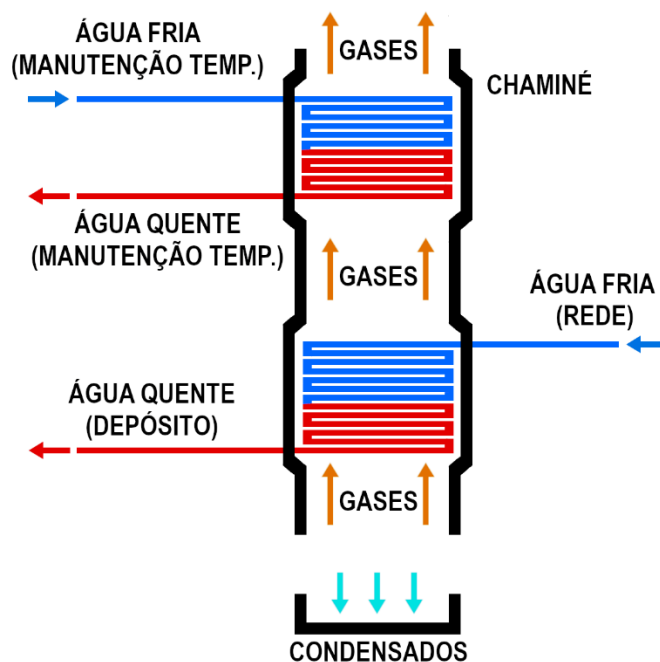


Figura 3.3 - Esquema do permutador de calor a instalar na medida 4.2

Seguindo a mesma metodologia adotada no ponto 4.1, obtém-se a **Tabela 3.2**. Nesta situação, o depósito selecionado para a instalação apresentava uma capacidade de 300L e um custo de 959,00€. A resolução completa do problema encontra-se presente no **APÊNDICE E**.

Tabela 3.2 - Resultados dos permutadores de calor no sistema de lavagem intermédio

		Linha 1		Linha 2	
		Austenização	Austenização	Revenido	Revenido
O aquecimento é possível?		Sim	Sim	Sim	Sim
Temperatura final dos gases [°C]		99,31	130,45	86,72	59,81
São gerados condensados?		Sim	Não	Sim	Sim
Caudal de condensados [kg/h]		112,156	0,000	58,373	45,041
Caudal final de gases [kg/h]		1214,090	1591,250	900,277	740,287
Permutador 1	Área [m ²]	2,18	1,45	2,63	5,59
	Peso [kg]	19,53	13,03	23,60	51,11
	Altura [m]	0,34	0,26	0,43	0,95
	Nº de voltas	8	6	10	22
	Instalação [€]	1 920,40	1 640,54	2 095,63	3 236,58
	Manutenção [€/ano]	134,43	114,84	146,69	226,56
Permutador 2	Área [m ²]	1,61	1,00	2,10	6,43
	Peso [kg]	14,41	8,95	18,84	57,64
	Altura [m]	0,26	0,17	0,34	1,08
	Nº de voltas	6	4	8	25
	Instalação [€]	1 700,25	1 465,28	1 890,56	3 560,30
	Manutenção [€/ano]	134,43	114,84	146,69	226,56
Estimativa do Payback		7 anos	6 anos	8 anos	17 anos

3.3. Porta para fornos TTD

A instalação de uma porta que minimize as perdas de calor sofridas pelos fornos enquanto estão vazios já tinha sido pensada pelos engenheiros da SRAMPORT. Através da **Tabela 2.12**, verifica-se que a região da entrada é a que apresenta as maiores temperaturas, traduzindo-se num custo de 331,06 €/ano por cada forno a gás natural e 773,68 €/ano por cada forno a energia elétrica, sendo que, ao existirem três elétricos e dois a gás natural, o valor total do custo das perdas ascende a 2 983,17 €/ano.

Na impossibilidade de saber qual o material que seria utilizado no fecho dos referidos fornos, foram estipuladas várias reduções de temperaturas possíveis e apurados os correspondentes valores de poupança energética.

A **Tabela 3.3** traduz os resultados obtidos para cada forno.

Tabela 3.3 – Poupança anual por forno com a instalação da porta para várias reduções de temperatura

	Fornos a energia elétrica	Fornos a gás natural
Redução de 20%	248,79 €/ano	123,43 €/ano
Redução de 40%	456,21 €/ano	211,85 €/ano
Redução de 60%	598,01 €/ano	273,04 €/ano
Redução de 80%	690,95 €/ano	313,75 €/ano

A **Tabela 3.4** traduz os resultados obtidos para a poupança total.

Tabela 3.4 – Poupança anual total com a instalação das portas para várias reduções de temperatura

	Fornos a energia elétrica	Fornos a gás natural
Redução de 20%	746,36 €/ano	246,86 €/ano
Redução de 40%	1 368,62 €/ano	423,70 €/ano
Redução de 60%	1 794,03 €/ano	546,08 €/ano
Redução de 80%	2 072,85 €/ano	627,51 €/ano

4. MEDIDAS ADICIONAIS

Seguindo a orientação do ponto anterior, foram ainda consideradas outras medidas destinadas a reduzir os custos anuais da empresa, mas que, por carecerem de viabilidade económica ou de dados que permitam a total realização dos seus cálculos, foram inseridas neste capítulo. Tais medidas são:

- a alteração da estrutura e composição dos fornos TTD de funcionamento a energia elétrica;
- a renovação do isolamento interior dos fornos CTC;
- o aquecimento do ar de secagem do segundo sistema de lavagem e secagem dos fornos CTC.

O mérito das presentes matérias analisadas será assim apenas uma base de trabalho para uma futura avaliação económica a efetuar pela empresa.

4.1. Alteração da estrutura e composição dos fornos TTD de funcionamento a energia elétrica

Atualmente, os fornos de tratamento térmico delta de funcionamento elétrico são compostos por 12 blocos de resistências, dispostos em grupos de 3 pelas faces laterais, superior e inferior.

Em caso de avaria de uma das resistências, todos os blocos de resistências têm de ser substituídos, sendo o acesso efetuado através da remoção da parte superior do forno, com a dificuldade acrescida da existência de uma camada de pó isolante entre o bloco de resistências superior e a cobertura.

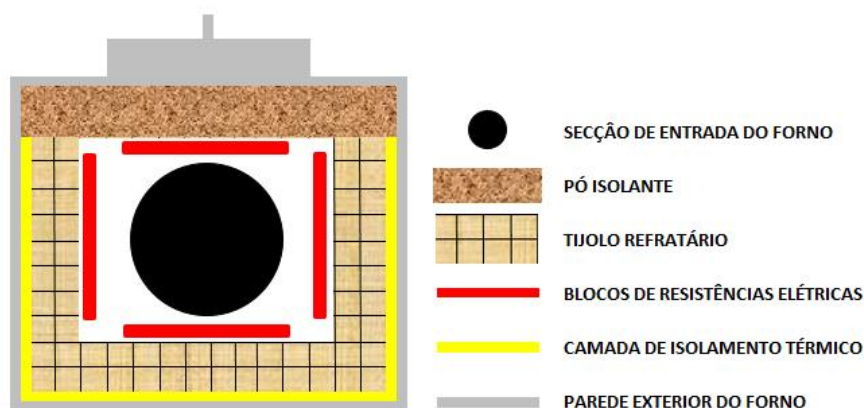


Figura 4.1 - Representação da configuração atual dos fornos TTD elétricos

Em suma, todo o processo de reparação demora cerca de 5 dias:

- 2 dias para que o forno arrefeça até à temperatura ambiente;
- 1 dia para realizar o desmantelamento e iniciar a substituição;
- 1 dia para terminar a reparação e proceder à montagem;
- 1 dia para aquecer o forno até à temperatura de produção.

Se, por exemplo, o forno avariar na segunda-feira, só poderá entrar em funcionamento na segunda-feira da semana seguinte, já que os fornos não produzem durante o fim-de-semana.

Uma solução possível para o problema passa pela modificação da configuração interior dos fornos, de modo a terem apenas 3 blocos de resistências e uma camada de tijolo refratário ao invés da camada de pó isolante. Estas resistências passam a ser iguais às utilizadas pelos fornos de tratamento térmico FCH, e em caso de avaria, não só não precisam de ser substituídas na sua totalidade, como a reparação não requer um desmantelamento tão complexo, podendo ser feito removendo apenas a parte frontal do forno.

O período de reparação passa para 4 dias (com a desmontagem, a reparação e a montagem a ocorrerem no mesmo dia) e o custo da substituição passa de 12 blocos de resistências para apenas 1 bloco. O processo de conversão dos fornos foi estimado em 1 mês para cada forno, podendo ser feito em agosto para minimizar o tempo de paragem.

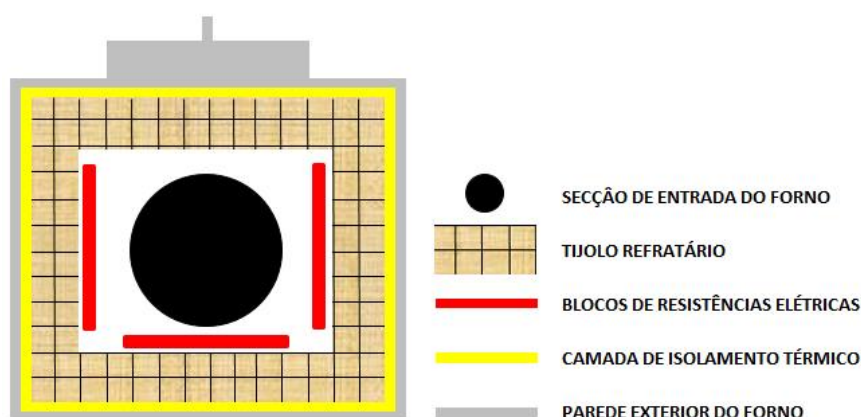


Figura 4.2 - Representação da configuração proposta para os fornos TTD elétricos

4.2. Renovação do isolamento interior dos fornos CTC

No decorrer do estágio, foi solicitada por parte da empresa SRAMPORT um estudo sobre a possibilidade de ser efetuada uma intervenção no isolamento interior dos fornos de austenização, com vista a reduzir as perdas de energia, uma vez que, ao melhorar/renovar o seu isolamento, permitiria uma diminuição nos valores da potência desperdiçada através das paredes.

Para tal, foi contactada a empresa ISONOVUS – Thermal Solutions, no sentido de avaliar uma total substituição do interior dos fornos, ao que foi esclarecido que os ganhos térmicos obtidos com a renovação do isolamento seriam irrisórios em relação ao investimento elevado que a empresa teria de fazer, exigindo períodos de retorno duradouros.

4.3. Aquecimento do ar de secagem do segundo sistema de lavagem e secagem dos fornos CTC

Finalmente, foi ainda solicitada a avaliação sobre a possibilidade de se efetuar o aquecimento do ar utilizado no segundo sistema de secagem, através da instalação de dois permutadores, sendo que, um deles aqueceria água, a circular num circuito fechado, através da energia disponível nos gases de exaustão, e o outro faria a troca de energia entre a água aquecida e o ar aspirado do exterior.

O esquema que se segue ilustra a proposta apresentada à empresa.

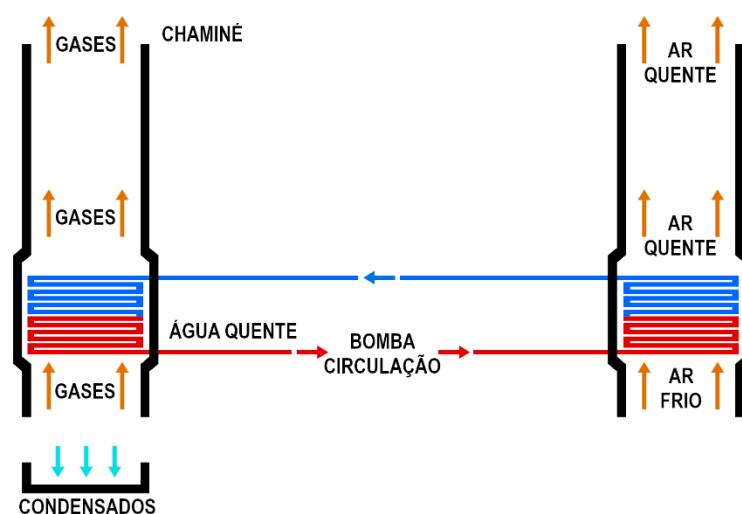


Figura 4.3 - Esquema do aquecimento do ar da segunda máquina de secagem

Esta proposta revelou-se impraticável, porquanto, ao analisar quais as chaminés mais viáveis para esta construção, concluiu-se que apenas as chaminés dos fornos de austenização seriam as mais adequadas, porque apenas neste tipo de forno, a temperatura dos gases de exaustão é superior à temperatura final desejada para o ar de secagem - 100°C.

Analisando a situação mais detalhadamente, verifica-se que os gases do forno de austenização da linha 1 apresentam uma diferença de temperatura de apenas 5°C, relativamente à temperatura final do ar, tornando o aquecimento no conjunto de 2 permutadores praticamente residual e, por isso, impraticável.

Na hipótese de serem utilizados os gases da linha 2, dado que, neste caso, a temperatura final da água do circuito fechado pode variar entre 100°C - temperatura final de aquecimento do ar - e 136°C - temperatura inicial dos gases de exaustão – o aquecimento só seria possível se o sistema de permutadores fosse complementado com as resistências elétricas já existentes, porque só a energia gerada pelos gases não é suficiente para substituir totalmente as atuais resistências.

Em face desta conclusão, foram efetuados os cálculos do dimensionamento dos permutadores, considerando diferentes valores da temperatura da água do circuito fechado, concluindo-se que o período de retorno seria menos extenso se a temperatura fosse igual a 110°C.

Deste modo, foi obtida a situação descrita na **Tabela 4.1**, onde se pode ver que com uma temperatura de 110°C, o melhor período de retorno registado é de 23 anos.

Tabela 4.1 - Resultados dos permutadores de calor no sistema de secagem intermédio

		Linha 2: Austenização
O aquecimento é possível?		Parcialmente
Fração de potência térmica fornecida pelo conjunto de permutadores		27%
Fração de potência térmica fornecida pelas resistências elétricas		63%
Temperatura final da água do circuito fechado [°C]		110
Permutador 1	Área [m ²]	15,38
	Peso [kg]	137,81
	Altura [m]	2,58
	Nº de voltas	60
	Instalação [€]	7 010,44
	Manutenção [€/ano]	490,73
Permutador 2	Área [m ²]	24,95
	Peso [kg]	223,51
	Altura [m]	4,17
	Nº de voltas	97
	Instalação [€]	10 698,55
	Manutenção [€/ano]	748,90
Estimativa do Payback		23 anos

O aproveitamento da energia, além de ser apenas possível na linha 2, teria de ser sempre complementado com as resistências já existentes, pelo que não existiria qualquer benefício acrescido a curto prazo para a empresa, traduzindo-se, por outro lado, num encargo adicional gerado pelo investimento necessário. Todos os cálculos efetuados no âmbito deste problema estão presentes no **APÊNDICE E**.

5. CONCLUSÕES

Em face de todo o exposto, é de parecer que são os fornos contínuos os maiores consumidores de gás natural da empresa, por serem responsáveis por cerca de 45,47% do consumo global daquele combustível. Já os fornos de tratamento térmico delta consomem 30,14% de gás natural e 32,61% da energia elétrica.

Apesar destes valores terem sido obtidos com base nos dados mais recentes da empresa (valores do consumo obtidos em 2019 e consumos específicos dos equipamentos em 2018), é possível que não traduzam a situação real. Para os cálculos foi necessário recorrer a dados obtidos por Afonso, M.J.P. (2016), e após a devida adaptação, foi determinado que, no caso das linhas de fornos contínuos, os resultados teriam de considerar que o caudal de gás natural consumido em vazio representava 40% do consumido em produção, e que este por sua vez ocorreria durante 55% do período de funcionamento.

Para os fornos de TTD, as mesmas variáveis tiveram de ser arbitradas, visto não existir suporte para as verificar. O consumo em vazio foi igualmente definido em 40% do consumo em produção e este foi considerado em 55% do período de funcionamento.

Relativamente às três medidas de eficiência energética, apresentadas no ponto 3, verifica-se que a que é relativa ao aquecimento da água da máquina de lavar da zona da BARIAGEM da linha 1 representa a solução mais vantajosa, pois exige apenas um período de retorno entre 1 a 2 anos, consoante a localização do respetivo permutador.

Por outro lado, quanto ao aquecimento da água do segundo sistema de lavagem, concluiu-se que, devido à necessidade da existência de dois permutadores por chaminé e do baixo custo da energia elétrica consumida, os períodos de retorno mais vantajosos serão obtidos no caso da instalação dos mesmos ser efetuada numa das chaminés dos fornos de austenização ou do forno de revenido da linha 1, em que os referidos períodos de retorno podem variar entre 6 e 8 anos. A mesma instalação no forno de revenido da linha 2 seria desaconselhável, já que o período de retorno estimado é de 17 anos.

No tocante à terceira medida proposta - porta para fornos de TTD -, sendo conhecida a situação atual do acesso aos fornos, ou seja, a ausência de qualquer tampa ou porta na entrada, e verificando-se que a temperatura registada no local variava entre 250°C e 500°C, concluiu-se que as perdas de energia térmica nos fornos elétricos representam

11,08% do custo anual do seu funcionamento, correspondendo ao montante de 2 879,32 €/ano. Com referência aos fornos a gás natural, os valores de perdas ascendem a 5,61% do custo anual, o que representa um valor de 662,12 €/ano. Com o fecho dos fornos, a empresa obteria seguramente uma poupança razoável, tudo dependerá do material utilizado na composição das portas de entrada.

Os resultados obtidos para as medidas propostas assentam também no pressuposto de que a temperatura dos gases de exaustão se mantém constante ao longo do período de funcionamento dos respetivos permutadores, independentemente dos fornos responsáveis pelo fornecimento dos mesmos gases estarem em produção ou em vazio.

No respeitante ao conjunto de medidas adicionais, referidas no ponto 4, estas foram apresentadas em separado, em virtude da sua implementação ser economicamente inviável ou de não serem conhecidos os custos reais da sua implementação, já que estes estão dependentes de orçamentos a solicitar a empresas especializadas, o que não foi possível devido à existência da pandemia.

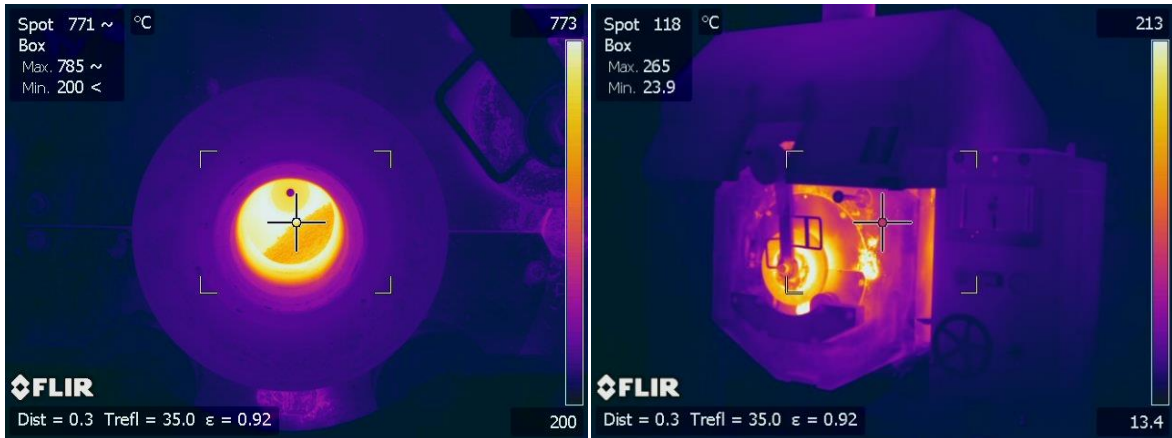
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SRAMPORT Lda. (2018), “Auditoria Energética e Plano de Racionalização dos Consumos de Energia (PREn) – ANO DE 2018”, Coimbra.
- Afonso, M.J.P. (2016), “Análise energética de uma indústria metalomecânica: balanços detalhados dos fornos de cementação e têmpera”. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial. Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Ferreira, V.A.R. (2010), “Medidas de eficiência energética aplicadas à empresa SRAMPORT, Lda.”. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial. Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto. “Diário da República n.º 159/2013, Série I”. Ministério da Economia e do Emprego. Lisboa.
- Portgás (2018), “Sobre o gás natural: Composição do gás natural e Equivalências energéticas”, Acedido em 9 de agosto de 2020, em: <https://www.portgas.pt/index.php?id=486>
- Kärcher – Brasil (2020), “Benefícios das lavadoras de alta pressão a água quente”, Acedido em 19 de fevereiro de 2020, em: <https://www.karcher.com.br/br/linha-professional/lavadoras-de-alta-pressao/beneficios-das-lavadoras-de-alta-pressao-a-agua-quente.html>
- “Overall Heat Transfer Coefficients for Fluids - Heat Exchanger Surface Combinations”, Acedido em 8 de Agosto de 2020, no Web site da: Engineering ToolBox - Resources, Tools and Basic Information for Engineering and Design of Technical Applications!: https://www.engineeringtoolbox.com/overall-heat-transfer-coefficients-d_284.html
- “Nusselt number”, Acedido a 3 de Agosto de 2020 no Web site da Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Nusselt_number#Free_convection_at_a_vertical_wall
- Paula, S.H. (2010, 11 de março), “Tabela de emissividades”, Acedido em 9 de Agosto de 2020, no Web site da: Docsity: <https://www.docsity.com/pt/tabela-de-emissividades/4723831/>
- “Transferência de Calor”, Acedido a 3 de agosto de 2020, no Web site do: Portal Laboratórios Virtuais de Processos Químicos: http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=248&Itemid=422
- “Tubo Cobre Nu em Vara”, Acedido em 8 de Agosto de 2020, no Web site da: Pinto & Cruz – Tubagens e Sistemas: <https://tubagens.pintocruz.pt/pt/loja/14725-tubo-cobre-nu-em-vara-detail.html>

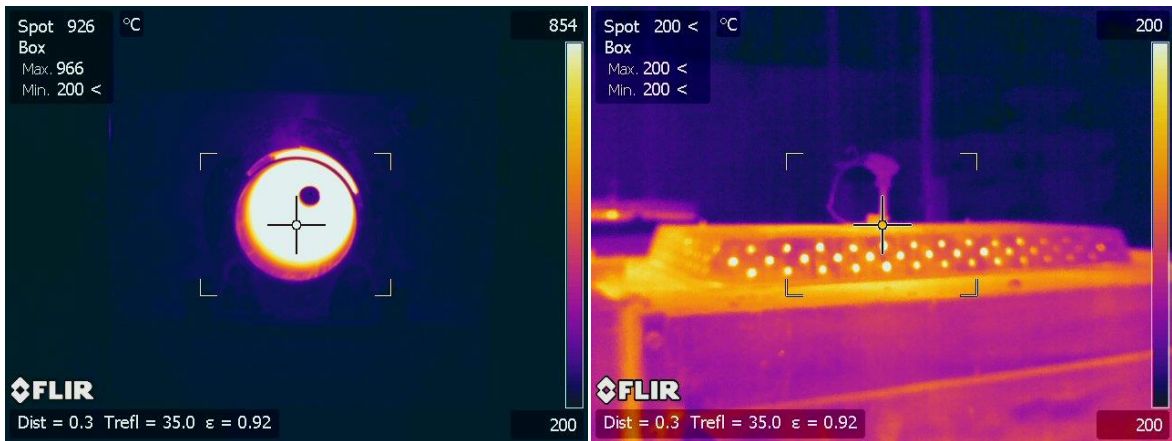
“Depósito de Inércia Aquafer – 300 L”, Acedido em 8 de Agosto de 2020, no Web site da: Smartfire – A Loja Online nº1 em Aquecimento: <https://www.smartfire.pt/produto/deposito-de-inercia-aquafer-300l/>.

“Depósito de Inércia Aquafer – 100 L”, Acedido em 8 de Agosto de 2020, no Web site da: Smartfire – A Loja Online nº1 em Aquecimento: <https://www.smartfire.pt/produto/deposito-de-inercia-aquafer-100l/>.

ANEXO A – FOTOGRAFIAS TERMOGRÁFICAS DOS FORNOS TTD

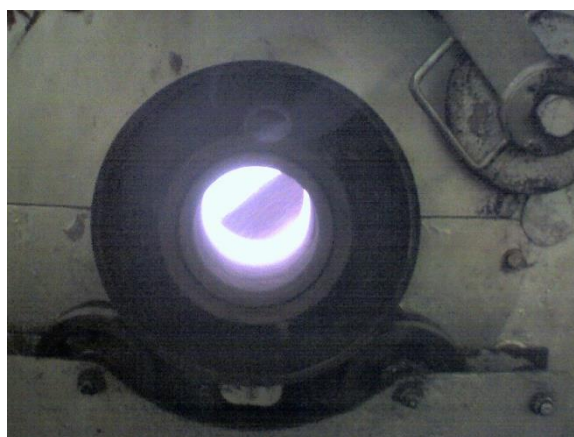


Fotografias da câmara termográfica nos fornos TTD a gás natural



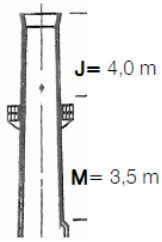
Fotografias da câmara termográfica nos fornos TTD a energia elétrica

ANEXO B – FOTOGRAFIAS EXTERIORES DOS FORNOS TTD



ANEXO C – PROPRIEDADES DAS CHAMINÉS DE AUSTENITIZAÇÃO

1. Chaminé do forno de austenitização da linha 1.

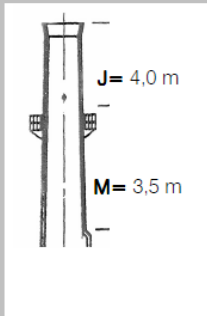
	Características da Fonte Fixa Pontual		Cumprimento da NP 2167
	Geometria da Secção	Circular;	--
	Diâmetro Interno da Chaminé	$\varnothing = 0,25 \text{ m}$	--
	Área da Secção	$A = 0,049 \text{ m}^2$	--
	Número de Tomas de Amostragem	1	Sim
	Número de Pontos de Amostragem	Ponto central	--
	Comprimento dos Segmentos Rectilíneos Livres de Perturbações e Adjacentes à Toma de Amostragem	$M \geq 5 \varnothing; J \geq 5 \varnothing;$	Sim
	Plataforma de Amostragem*	Permanente	Sim
Altura da Chaminé (cota máxima em relação ao solo)	10,71 m		

* Permite a realização, em segurança, dos procedimentos de amostragem.

2. Gases de exaustão do forno de austenitização da linha 1

Parâmetro	Média
Temperatura Média [°C]	105 ± 4
Temperatura Média [K]	378 ± 4
Pressão Absoluta Efluente [Pa]	101160 ± 1168
Velocidade do Escoamento [m/s]	$6,0 \pm 0,2$
Pressão Diferencial [Pa]	$23,8 \pm 0,4$
Caudal Efectivo [m³/h]	1061 ± 106
Caudal Volúmico Seco [m³/h] _{PTN}	746 ± 75
Massa Molecular Húmida [g/mol]	$28,7 \pm 0,1$
O ₂ [%]	$17,3 \pm 0,2$
CO ₂ [%]	$2,0 \pm 0,1$
CO [mg/m³] _{PTN}	$299,2 \pm 13,1$
H ₂ O [%]	$2,5 \pm 0,1$

3. Chaminé do forno de austenitização da linha 2

	Características da Fonte Fixa Pontual		Cumprimento da NP 2167
	Geometria da Secção	Circular;	
Diâmetro Interno da Chaminé	$\varnothing = 0,30 \text{ m}$		--
Área da Secção	$A = 0,071 \text{ m}^2$		--
Número de Tomas de Amostragem	1		Sim
Número de Pontos de Amostragem	Ponto central		--
Comprimento dos Segmentos Rectilíneos Livres de Perturbações e Adjacentes à Toma de Amostragem	$M \geq 5 \varnothing; J \geq 5 \varnothing;$		Sim
Plataforma de Amostragem*	Permanente		Sim
Altura da Chaminé (cota máxima em relação ao solo)	10,71 m		

* Permite a realização, em segurança, dos procedimentos de amostragem.

4. Gases de exaustão do forno de austenitização da linha 2

Parâmetro	Média
Temperatura Média [°C]	136 ± 4
Temperatura Média [K]	409 ± 4
Pressão Absoluta Efluente [Pa]	101110 ± 1168
Velocidade do Escoamento [m/s]	5,0 ± 0,2
Pressão Diferencial [Pa]	15,3 ± 0,2
Caudal Efectivo [m³/h]	1273 ± 110
Caudal Volúmico Seco [m³/h] _{FTN}	834 ± 72
Massa Molecular Húmida [g/mol]	28,8 ± 0,1
O ₂ [%]	18,6 ± 0,2
CO ₂ [%]	1,7 ± 0,1
CO [mg/m³] _{FTN}	22,9 ± 1,2
H ₂ O [%]	1,6 ± 0,1

5. Propriedades da chaminé e dos gases de exaustão dos fornos de revenido

	Forno de Revenido (linha 1)	Forno de Revenido (linha 2)
Diâmetro da chaminé	0,200 m	0,200 m
Caudal mássico	958,65 kg/h	798,66 kg/h
Temperatura média	95°C	70°C

ANEXO D – COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Average overall heat transmission coefficients for some common fluids and surface combinations as Water to Air, Water to Water, Air to Air, Steam to Water and more

Fluid	Material in Transmission Surface	Fluid	Overall Heat Transmission Coefficient - U -	
			(Btu/(ft ² hr °F))	(W/(m ² K))
Water	Cast Iron	Air or Gas	1.4	7.9
Water	Mild Steel	Air or Gas	2.0	11.3
Water	Copper	Air or Gas	2.3	13.1
Water	Cast Iron	Water	40 - 50	230 - 280
Water	Mild Steel	Water	60 - 70	340 - 400
Water	Copper	Water	60 - 80	340 - 455
Air	Cast Iron	Air	1.0	5.7
Air	Mild Steel	Air	1.4	7.9
Steam	Cast Iron	Air	2.0	11.3
Steam	Mild Steel	Air	2.5	14.2
Steam	Copper	Air	3.0	17
Steam	Cast Iron	Water	160	910
Steam	Mild Steel	Water	185	1050
Steam	Copper	Water	205	1160
Steam	Stainless Steel	Water	120	680

ANEXO E – TABELA DE PREÇOS DE TUBO DE COBRE

Tubo Cobre Nu Em Vara 5m 35x1mm 2200154	Diâmetro: 35 Mm Espessura: 1mm	Comprimento: 5m Obs: Preço Por Metro; Quantidade Mínima 5mt	€ 18,75
Tubo Cobre Nu Em Vara 5m 42x1mm 2200158	Diâmetro: 42 Mm Espessura: 1mm	Comprimento: 5m Obs: Preço Por Metro; Quantidade Mínima 5mt	€ 23,11
Tubo Cobre Nu Em Vara 5m 42x1,5mm 2200160	Diâmetro: 42 Mm Espessura: 1,5mm	Comprimento: 5m Obs: Preço Por Metro; Quantidade Mínima 5mt	€ 30,54

APÊNDICE A - PERDAS NOS FORNOS DE AUSTENIZAÇÃO

1. Área das paredes exteriores.

Face	$A_{\text{superfície}}$	
<i>Frontal</i>	5.096	m^2
<i>Traseira</i>	5.096	m^2
<i>Superior</i>	10.169	m^2
<i>Inferior</i>	10.169	m^2
<i>Lateral Esquerda</i>	11.360	m^2
<i>Lateral Direita</i>	11.360	m^2

2. Coeficientes de transferência de calor por convecção.

	50	54.5	80	90	$^{\circ}C$
<i>Vertical</i>	3.87	4.06	4.84	5.05	$W.m^{-2}.K^{-1}$
<i>Horizontal: superior</i>	10.14	10.71	13.16	13.90	$W.m^{-2}.K^{-1}$
<i>Horizontal: inferior</i>	1.72	1.78	2.05	2.12	$W.m^{-2}.K^{-1}$

3. Resultados das potências térmicas de convecção e radiação das paredes.

Face	Forno de austenização - L1			Forno de austenização - L2			
	$Q_{\text{convecção}}$	$Q_{\text{radiação}}$	Q_{total}	$Q_{\text{convecção}}$	$Q_{\text{radiação}}$	Q_{total}	
<i>Frontal</i>	1674.291	1426.053	3100.344	1674.291	1426.053	3100.344	W
<i>Traseira</i>	1355.935	1149.855	2505.790	1355.935	1149.855	2505.790	W
<i>Superior</i>	2577.563	900.379	3477.942	3213.155	1086.354	4299.509	W
<i>Inferior</i>	437.520	900.379	1337.899	534.903	1086.354	1621.257	W
<i>Lateral Esquerda</i>	1099.794	1005.761	2105.555	1362.050	1213.503	2575.553	W
<i>Lateral Direita</i>	3022.288	2562.949	5585.237	3022.288	2562.949	5585.237	W
Total	10167.391	7945.376	18112.767	11162.622	8525.068	19687.690	W
	10.167	7.945	18.113	11.163	8.525	19.688	kW

4. Custos anuais de funcionamento.

	Linha 1	Linha 2	Total	
Consumo específico	42.60	55.20	97.80	kg GN/t produto
%Consumo em vazio	40%	40%	40%	%kg GN/h
Caudal de GN em produção	6.73	8.72	15.44	kg GN/h
	260.42	337.45	597.87	MJ/h
Caudal de GN em vazio	2.69	3.49	6.18	kg GN/h
	104.17	134.98	239.15	MJ/h
% Em produção	55%	55%	55%	%/dia
% Em stand-by	45%	45%	45%	%/dia
Dias de produção	246	246	246	dia/ano
Produção Anual	3247.20	3247.20	3247.20	h/ano
Vazio Anual	4768.80	4768.80	4768.80	h/ano
Consumo anual de GN em produção	21841.04	28301.06	50142.10	kg/ano
	25988.86	33675.71	59664.56	m ³ /ano
	11431.46	14812.60	26244.06	€/ano
	10.16%	13.17%	23.33%	%/total
Consumo anual de GN em vazio	12830.20	16625.04	29455.24	kg/ano
	15266.77	19782.30	35049.07	m ³ /ano
	6715.24	8701.44	15416.69	€/ano
	5.97%	7.73%	13.70%	%/total
Consumo Global	18146.70	23514.04	41660.74	€/ano
	16.13%	20.90%	37.03%	%/total

5. Custos anuais de energia perdida pelas paredes.

	Linha 1	Linha 2	Total	
Consumo em produção	260.42	337.45	597.87	MJ/h
Consumo em stand-by	104.17	134.98	239.15	MJ/h
Consumo total	364.59	472.43	837.02	MJ/h
Perdas associadas à convecção	36.60	40.19	76.79	MJ/h
	10.04%	8.51%	9.17%	%/total
	1821.82	2000.14	3821.96	€/ano
Perdas associadas à radiação	28.60	30.69	59.29	MJ/h
	7.85%	6.50%	7.08%	%/total
	1423.67	1527.54	2951.21	€/ano
Perdas globais pelas paredes	65.21	70.88	136.08	MJ/h
	17.88%	15.00%	16.26%	%/total
	3245.49	3527.69	6773.17	€/ano

APÊNDICE B – PERDAS NOS FORNOS DE REVENIDO

1. Área das paredes exteriores.

Face	$A_{\text{superfície}}$	
<i>Frontal</i>	2.730	m^2
<i>Traseira</i>	2.730	m^2
<i>Superior</i>	6.049	m^2
<i>Inferior</i>	6.049	m^2
<i>Lateral Esquerda</i>	5.714	m^2
<i>Lateral Direita</i>	5.714	m^2

2. Coeficientes de transferência de calor por convecção.

	33	38.3	46	60	$^{\circ}C$
<i>Vertical</i>	2.81	3.27	3.75	4.33	$W.m^{-2}.K^{-1}$
<i>Horizontal: superior</i>	6.94	8.22	9.57	11.27	$W.m^{-2}.K^{-1}$
<i>Horizontal: inferior</i>	1.50	1.66	1.83	2.04	$W.m^{-2}.K^{-1}$

3. Resultados das potências térmicas de convecção e radiação das paredes.

Face	Forno de revenido - L1			Forno de revenido - L2			
	$Q_{\text{convecção}}$	$Q_{\text{radiação}}$	Q_{total}	$Q_{\text{convecção}}$	$Q_{\text{radiação}}$	Q_{total}	
<i>Frontal</i>	413.359	355.535	768.894	413.359	355.535	768.894	W
<i>Traseira</i>	413.359	355.535	768.894	413.359	355.535	768.894	W
<i>Superior</i>	335.990	157.456	493.446	335.990	157.456	493.446	W
<i>Inferior</i>	72.579	157.456	230.034	72.579	157.456	230.034	W
<i>Lateral Esquerda</i>	128.280	148.749	277.029	248.772	253.936	502.708	W
<i>Lateral Direita</i>	450.077	416.621	866.698	128.280	148.749	277.029	W
Total	1813.644	1591.351	3404.995	1612.339	1428.666	3041.005	W
	1.814	1.591	3.405	1.612	1.429	3.041	kW

4. Custos anuais de funcionamento.

	Linha 1	Linha 2	Total	
Consumo específico	13.00	9.30	22.30	kg GN/t produto
%Consumo em vazio	40%	40%	40%	%kg GN/h
Caudal de GN em produção	2.05	1.47	3.52	kg GN/h
	79.47	56.85	136.32	MJ/h
Caudal de GN em vazio	0.82	0.59	1.41	kg GN/h
	31.79	22.74	54.53	MJ/h
% Em produção	55%	55%	55%	%/dia
% Em stand-by	45%	45%	45%	%/dia
Dias de produção	246	246	246	dia/ano
Produção Anual	3247.20	3247.20	3247.20	h/ano
Stand-by Anual	4768.80	4768.80	4768.80	h/ano
Consumo anual de GN em produção	6665.11	4768.11	11433.22	kg/ano
	7930.87	5673.62	13604.50	m ³ /ano
	3488.47	2495.60	5984.07	€/ano
	3.10%	2.22%	5.32%	%/total
Consumo anual de GN em vazio	3915.32	2800.96	6716.28	kg/ano
	4658.87	3332.89	7991.76	m ³ /ano
	2049.25	1466.00	3515.26	€/ano
	1.82%	1.30%	3.12%	%/total
Consumo Global	5537.73	3961.60	9499.33	€/ano
	4.92%	3.52%	8.44%	%/total

5. Custos anuais de energia perdida pelas paredes.

	Linha 1	Linha 2	Total	
Consumo em produção	79.47	56.85	136.32	MJ/h
Consumo em stand-by	31.79	22.74	54.53	MJ/h
Consumo total	111.26	79.59	190.85	MJ/h
Perdas associadas à convecção	6.53	5.80	12.33	MJ/h
	5.87%	7.29%	6.46%	%/total
	324.97	288.90	613.88	€/ano
Perdas associadas à radiação	5.73	5.14	10.87	MJ/h
	5.15%	6.46%	5.70%	%/total
	285.14	255.99	541.13	€/ano
Perdas globais pelas paredes	12.26	10.95	23.21	MJ/h
	11.02%	13.75%	12.16%	%/total
	610.11	544.89	1155.01	€/ano

APÊNDICE C – PERDAS NOS FORNOS DE TTD (GÁS NATURAL)

1. Área das paredes exteriores.

Face	$A_{\text{superfície}}$	
<i>Entrada</i>	0.108	m^2
<i>Frontal</i>	2.492	m^2
<i>Traseira</i>	2.600	m^2
<i>Superior</i>	2.405	m^2
<i>Inferior</i>	2.405	m^2
<i>Lateral Esquerda</i>	3.700	m^2
<i>Lateral Direita</i>	3.700	m^2

2. Coeficientes de transferência de calor por convecção.

	42.50	45.33	50.00	53.33	59.50	70.00	97.75	
<i>Vertical</i>	3.51	3.67	3.90	4.05	4.28	4.62	5.24	$W.m^{-2}.K^{-1}$
<i>Horizontal: superior</i>	9.01	9.47	10.14	10.57	11.28	12.31	14.42	$W.m^{-2}.K^{-1}$
<i>Horizontal: inferior</i>	2.08	2.14	2.24	2.30	2.40	2.54	2.84	$W.m^{-2}.K^{-1}$
	98.60	115.00	116.00	136.00	160.00	250.00	500.00	
<i>Vertical</i>	5.25	5.52	5.53	5.79	6.04	6.63	7.19	$W.m^{-2}.K^{-1}$
<i>Horizontal: superior</i>	14.48	15.46	15.52	16.56				$W.m^{-2}.K^{-1}$
<i>Horizontal: inferior</i>	2.85	2.99	2.99	3.14				$W.m^{-2}.K^{-1}$

3. Resultados das potências térmicas de convecção e radiação das paredes.

Face	Forno de TTD - Produção			Forno de TTD - Vazio			
	$Q_{\text{convecção}}$	$Q_{\text{radiação}}$	Q_{total}	$Q_{\text{convecção}}$	$Q_{\text{radiação}}$	Q_{total}	
<i>Entrada</i>	160.311	212.417	372.728	367.136	1107.760	1474.896	
<i>Frontal</i>	2032.343	2006.249	4038.591	1603.081	1478.806	3081.888	W
<i>Traseira</i>	1309.385	1152.340	2461.724	1005.510	858.364	1863.874	W
<i>Superior</i>	3347.099	1049.262	4396.361	2523.096	781.642	3304.738	W
<i>Inferior</i>	156.719	245.335	402.055	104.806	169.222	274.028	W
<i>Lateral Esquerda</i>	361.138	327.588	688.726	227.433	220.929	448.362	W
<i>Lateral Direita</i>	768.429	650.595	1419.024	546.898	473.775	1020.673	W
Total	8135.423	5643.786	13779.209	6377.960	5090.498	11468.458	W
	8.135	5.644	13.779	6.378	5.090	11.468	kW

4. Custos anuais de funcionamento.

	1 003 066	1 000 002	Total	
Consumo específico	358.40	357.30	715.70	kg GN/t produto
%Consumo em vazio	40%	40%	40%	
Caudal de GN em produção	4.37	4.41	8.79	kg GN/h
	169.29	170.85	340.14	MJ/h
Caudal de GN em vazio	1.75	1.77	3.51	kg GN/h
	67.72	68.34	136.06	MJ/h
% Em produção	55%	55%	55%	%/dia
% Em vazio	45%	45%	45%	%/dia
Dias de produção	246	246	246	dia/ano
Produção Anual	3247.20	3247.20	3247.20	h/ano
Stand-by Anual	4768.80	4768.80	4768.80	h/ano
Consumo anual de GN em produção	14198.32	14328.77	28527.09	kg/ano
	16894.71	17049.94	33944.66	m ³ /ano
	7431.31	7499.59	14930.90	€/ano
	6.61%	6.67%	13.27%	%/total
Consumo anual de GN em vazio	8340.59	8417.23	16757.82	kg/ano
	9924.55	10015.74	19940.29	m ³ /ano
	4365.41	4405.52	8770.94	€/ano
	3.88%	3.92%	7.80%	%/total
Consumo Global	11796.72	11905.11	23701.83	€/ano
	10.49%	10.58%	21.07%	%/total

5. Custos anuais de energia perdida pelas paredes.

	1 003 066	1 000 002	Total	
Consumo em produção	169.29	170.85	340.14	MJ/h
Consumo em vazio	67.72	68.34	136.06	MJ/h
Consumo total	237.01	239.19	476.20	MJ/h
Perdas associadas à convecção	29.29	29.29	58.58	MJ/h
	12.36%	12.24%	12.30%	%/total
	1457.72	1457.72	2915.45	€/ano
Perdas associadas à radiação	20.32	20.32	40.64	MJ/h
	8.57%	8.49%	8.53%	%/total
	1011.27	1011.27	2022.53	€/ano
Perdas globais pelas paredes	49.61	49.61	99.21	MJ/h
	20.93%	20.74%	20.83%	%/total
	2468.99	2468.99	4937.98	€/ano

APÊNDICE D – PERDAS NOS FORNOS DE TTD (ENERGIA ELÉTRICA)

1. Área das paredes exteriores.

Face	$A_{\text{superfície}}$	
<i>Entrada</i>	0.108	m^2
<i>Frontal</i>	2.492	m^2
<i>Traseira</i>	2.600	m^2
<i>Superior</i>	2.405	m^2
<i>Inferior</i>	2.405	m^2
<i>Lateral Esquerda</i>	3.700	m^2
<i>Lateral Direita</i>	3.700	m^2

2. Coeficientes de transferência de calor por convecção.

	42.50	43.86	50.00	51.60	60.78	60.92	$^{\circ}C$
<i>Vertical</i>	3.51	3.59	3.90	3.98	4.33	4.33	$W.m^{-2}.K^{-1}$
<i>Horizontal: superior</i>	9.01	9.23	10.14	10.35	11.42	11.43	$W.m^{-2}.K^{-1}$
<i>Horizontal: inferior</i>	2.08	2.11	2.24	2.27	2.42	2.42	$W.m^{-2}.K^{-1}$
	61.98	71.50	71.67	72.92	250.00	500.00	$^{\circ}C$
<i>Vertical</i>	4.37	4.66	4.66	4.70	6.63	7.19	$W.m^{-2}.K^{-1}$
<i>Horizontal: superior</i>	11.54	12.45	12.46	12.57			$W.m^{-2}.K^{-1}$
<i>Horizontal: inferior</i>	2.44	2.56	2.56	2.58			$W.m^{-2}.K^{-1}$

3. Resultados das potências térmicas de convecção e radiação das paredes.

Face	Forno de TTD - produção			Forno de TTD - stand-by			
	$Q_{\text{convecção}}$	$Q_{\text{radiação}}$	Q_{total}	$Q_{\text{convecção}}$	$Q_{\text{radiação}}$	Q_{total}	
<i>Entrada</i>	160.311	245.097	405.408	367.136	1278.184	1645.321	W
<i>Frontal</i>	560.773	546.182	1106.955	402.723	399.558	802.281	W
<i>Traseira</i>	563.024	549.096	1112.120	402.648	400.844	803.492	W
<i>Superior</i>	1398.692	510.148	1908.840	987.328	372.508	1359.836	W
<i>Inferior</i>	134.632	245.691	380.323	87.409	165.697	253.105	W
<i>Lateral Esquerda</i>	361.138	377.986	739.124	227.433	254.918	482.351	W
<i>Lateral Direita</i>	391.286	405.375	796.661	250.624	276.594	527.218	W
Total	3569.855	2879.574	6449.429	2725.301	3148.303	5873.604	W
	3.570	2.880	6.449	2.725	3.148	5.874	kW

4. Custos anuais de funcionamento.

	1 000 135	1 000 136	1 000 137	Total	
Consumo específico	3174.00	2429.10	2801.55	8404.65	<i>kW/t produto</i>
%Consumo em vazio	40%	40%	40%	40%	
Potência em produção	39.68	30.36	35.02	105.06	<i>kW/h</i>
	142.83	109.31	126.07	378.21	<i>MJ/h</i>
Potência em vazio	15.87	12.15	14.01	42.02	<i>kg GN/h</i>
	57.13	43.72	50.43	151.28	<i>MJ/h</i>
% Em produção	55%	55%	55%	55%	<i>%/dia</i>
% Em vazio	45%	45%	45%	45%	<i>%/dia</i>
Dias de produção	246	246	246	246	<i>dia/ano</i>
Produção Anual	3247.20	3247.20	3247.20	3247.20	<i>h/ano</i>
Stand-by Anual	4768.80	4768.80	4768.80	4768.80	<i>h/ano</i>
Consumo anual em produção	128832.66	98597.17	113714.91	341144.74	<i>kWh/ano</i>
	13200.90	10102.81	11651.85	34955.56	<i>€/ano</i>
	5.31%	4.06%	4.68%	14.05%	<i>%/total</i>
Consumo anual em vazio	75680.86	57919.46	66800.16	200400.47	<i>kWh/ano</i>
	7754.68	5934.75	6844.71	20534.13	<i>€/ano</i>
	3.12%	2.39%	2.75%	8.25%	<i>%/total</i>
Consumo Global	20955.58	16037.55	18496.56	55489.69	<i>€/ano</i>
	8.42%	6.45%	7.44%	22.31%	<i>%/total</i>

5. Custos anuais de energia perdida pelas paredes.

	1 003 066	1 000 002	1 000 137	Total	
Consumo em produção	142.83	109.31	126.07	378.21	<i>MJ/h</i>
Consumo em vazio	57.13	43.72	50.43	151.28	<i>MJ/h</i>
Consumo total	199.96	153.03	176.50	529.49	<i>MJ/h</i>
Perdas associadas à convecção	12.85	12.85	12.85	38.55	<i>MJ/h</i>
	6.43%	8.40%	7.28%	7.28%	<i>%/total</i>
	1346.81	1346.81	1346.81	4040.42	<i>€/ano</i>
Perdas associadas à radiação	10.37	10.37	10.37	31.10	<i>MJ/h</i>
	5.18%	6.77%	5.87%	5.87%	<i>%/total</i>
	1086.38	1086.38	1086.38	3259.15	<i>€/ano</i>
Perdas globais pelas paredes	23.22	23.22	23.22	69.65	<i>MJ/h</i>
	11.61%	15.17%	13.15%	13.15%	<i>%/total</i>
	2433.19	2433.19	2433.19	7299.57	<i>€/ano</i>

APÊNDICE E – DIMENSIONAMENTO DOS PERMUTADORES

1. Dimensionamento do permutador da máquina de lavar da linha 1 da zona da BARIAGEM utilizando os gases dos fornos de austenização.

Propriedades iniciais			Caraterísticas da instalação	
PC	Rendimento	95%	MATERIAL DE CONSTRUÇÃO	
Gases - Linha 1	Densidade	1.25 kg/m ³	Material	Cobre
	Caudal volúmico	1061.00 m ³ /h	U (referência para gases-água)	13.1 W/m ² .K
	Caudal mássico	0.368403 kg/s	Diâmetro exterior	0.042 m
	Temperatura inicial	105.00 °C	Espessura do tubo	0.001 m
Gases - Linha 2	Densidade	1.25 kg/m ³	Diâmetro interior	0.04 m
	Caudal volúmico	1273.00 m ³ /h	Diâmetro médio	0.041 m
	Caudal mássico	0.442014 kg/s	Área de secção	0.000129 m ²
	Temperatura inicial	136.00 °C	Comprimento por volta na serpentina	2 m
Água (vai para depósito)	Caudal volúmico crítico	0.16875 m ³ /h	Peso aproximado por metro de tubo	8960 kg/m ³
	Volume crítico	100.00 L	Preço por cada metro	23.11 €/m
	Período de aquecimento crítico	0.592593 h	Custo da criação da serpentina	10.00 €/m
	Temperatura inicial	12.3 °C	Custo da mão-de-obra para instalar	240.00 €/dia
	Densidade à temp. fria	999.39 kg/m ³	Duração da instalação	3 dias
	Cp à temp. fria	4197.68 J/kg.K	Custos adicionais de instalação	50% %/total
	Temperatura desejada	40 °C	Custos anuais de manutenção	7% %/total anual
	Temperatura final	60 °C	DETERGENTE POUPADO	
	Densidade à temp. fria	982.59 kg/m ³	Poupança anual	3498.12 €/ano
	Cp à temp. fria	4197.68 J/kg.K	DEPÓSITO DE INÉRCIA (Volume: 100L)	
	Caudal volúmico necessário	168.75 L/h	Depósito de Inércia Aquafer - 100L	375.00 €
	Caudal de água fria	70.06 L/h		
	Caudal de água quente	98.69 L/h		
	Temperatura final	36.15 °C		
	Densidade à T. média	992.51 kg/m ³		
	Calor específico à T. média	4181.27 J/kg.K		
Caudal mássico	0.027209 kg/s			
Diferença de temperaturas	47.7 °C			

	Valor real inserido pelo aluno
	Valor arbitrado pelo aluno
	Valor obtido através de interpolação
	Valor calculado através do Solver (Excel)
	Valor calculado por equação própria

Hipótese 1: Forno de austenização 1 aquece a máquina de lavar da linha 1

PC	Potência para aquecimento	5426.67 W
	Potência perdida pelo PC	285.61 W
	Potência cedida pelos gases	5712.28 W

Sem considerar a condensação!

Gases	1º estimativa para Cp	1184.25 J/kg.K
	1º estimativa para ΔT	13.09 °C
	1º estimativa para T. final	91.91 °C
	1º estimativa para T. média	98.45 °C
	2º estimativa para Cp	1184.25 J/kg.K
	2º estimativa para ΔT	13.09 °C
	2º estimativa para T. final	91.91 °C

Considerando a condensação!

Caudal de condensados	0.023054 kg/s
Caudal final de gases	0.345349 kg/s
Temperatura final dos gases	92.91 °C

Estimativa para ΔT	12.09 °C
Estimativa para T. média	98.95 °C
Estimativa para Cp (gases)	1184.35 J/kg.K
Variação do calor latente	33226.32 J/kg

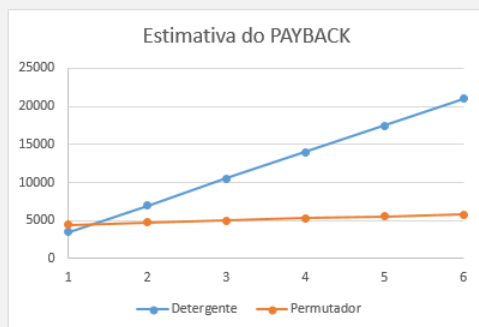
Diferença logarítmica da temperatura	ΔT1 (Tin, gases - Tout, água)	45.00 °C
	ΔT2 (Tout, gases - Tin, água)	80.61 °C
	ΔTml	61.08 °C

Área de transferência	Potência = A*U*ΔTml	5712.28 W
	Área necessária	7.14 m²

Caraterísticas da chaminé	Diâmetro exterior	0.25 m
	Diâmetro interior	0.24 m
	Perímetro interior	0.75 m

Caraterísticas da serpentina	Comprimento necessário	55.42 m
	Volume de cobre usado	0.007139 m³
	Peso total	63.96 kg
	Número de voltas	28 voltas
	Altura	1.20 m

Custos	Valor #1 - material	1280.80 €
	Valor #2 - criação	554.22 €
	Valor #3 - instalação	720.00 €
	Valor #4 - adicional	1277.51 €
	CUSTO TOTAL	3832.52 €
	Valor #5 - manutenção anual	268.28 €



Hipótese 2: Forno de austenização 2 aquece a máquina de lavar da linha 1

PC	Potência para aquecimento	5426.67 W
	Potência perdida pelo PC	285.61 W
	Potência cedida pelos gases	5712.28 W

Sem condensação, pois Tqf>100°C!

Gases	1º estimativa para Cp	1191.27 J/kg.K
	1º estimativa para ΔT	10.85 °C
	1º estimativa para T. final	125.15 °C
	1º estimativa para T. média	130.58 °C
	2º estimativa para Cp	1191.27 J/kg.K
	2º estimativa para ΔT	10.85 °C
	2º estimativa para T. final	125.15 °C

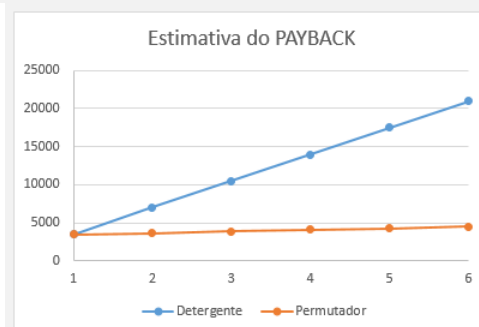
Diferença logarítmica da temperatura	ΔT1 (Tin, gases - Tout, água)	76.00 °C
	ΔT2 (Tout, gases - Tin, água)	112.85 °C
	ΔTml	93.21 °C

Área de transferência	Potência = A*U*ΔTml	5712.28 W
	Área necessária	4.68 m²

Caraterísticas da chaminé	Diâmetro exterior	0.3 m
	Diâmetro interior	0.288 m
	Perímetro interior	0.90 m

Caraterísticas da serpentina	Comprimento necessário	36.32 m
	Volume de cobre usado	0.004678 m³
	Peso total	41.91 kg
	Número de voltas	18 voltas
	Altura	0.77 m

Custos	Valor #1 - material	839.30 €
	Valor #2 - criação	363.18 €
	Valor #3 - instalação	720.00 €
	Valor #4 - adicional	961.24 €
	CUSTO TOTAL	2883.72 €
	Valor #5 - manutenção anual	201.86 €



2. Dimensionamento do permutador da máquina de lavar da linha 1 da zona da BARIAGEM utilizando os gases dos fornos de revenido.

Propriedades iniciais			Caraterísticas da instalação	
PC	Rendimento	95%	MATERIAL DE CONSTRUÇÃO	
Gases - Linha 1	Densidade	1.25 kg/m^3	Material	Cobre
	Caudal mássico	958.65 kg/h	U (referência para gases-água)	13.1 $W/m^2.K$
	Caudal mássico	0.266292 kg/s	Diâmetro exterior	0.042 m
	Temperatura inicial	95.00 $^{\circ}C$	Espessura do tubo	0.001 m
Gases - Linha 2	Densidade	1.25 kg/m^3	Diâmetro interior	0.04 m
	Caudal mássico	798.66 kg/h	Diâmetro médio	0.041 m
	Caudal mássico	0.22185 kg/s	Área de secção	0.000129 m^2
	Temperatura inicial	70.00 $^{\circ}C$	Comprimento por volta na serpentina	2 m
Água (vai para depósito)	Caudal volúmico crítico	0.16875 m^3/h	Peso aproximado por metro de tubo	8960 kg/m^3
	Volume crítico	100.00 L	Preço por cada metro	23.11 $€/m$
	Período de aquecimento crítico	0.592593 h	Custo da criação da serpentina	10.00 $€/m$
	Temperatura inicial	12.3 $^{\circ}C$	Custo da mão-de-obra para instalar	240.00 $€/dia$
	Densidade à temp. fria	999.39 kg/m^3	Duração da instalação	3 $dias$
	Cp à temp. fria	4197.68 $J/kg.K$	Custos adicionais de instalação	50% $%/total$
	Temperatura desejada	40 $^{\circ}C$	Custos anuais de manutenção	7% $%/total\ anual$
	Temperatura final	60 $^{\circ}C$	DETERGENTE POUPADO	
	Densidade à temp. fria	982.59 kg/m^3	Poupança anual	3498.12 $€/ano$
	Cp à temp. fria	4197.68 $J/kg.K$	DEPÓSITO DE INÉRCIA (Volume: 100L)	
	Caudal volúmico necessário	168.75 L/h	Depósito de Inércia Aquafer - 100L	375.00 $€$
	Caudal de água fria	70.06 L/h		
	Caudal de água quente	98.69 L/h		
	Temperatura final	36.15 $^{\circ}C$		
	Densidade à T. média	992.51 kg/m^3		
	Calor específico à T. média	4181.27 $J/kg.K$		
	Caudal mássico	0.027209 kg/s		
	Diferença de temperaturas	47.7 $^{\circ}C$		

	Valor real inserido pelo aluno
	Valor arbitrado pelo aluno
	Valor obtido através de interpolação
	Valor calculado através do Solver (Excel)
	Valor calculado por equação própria

Hipótese 1: Forno de revenido 1 aquece a máquina de lavar da linha 1

PC	Potência para aquecimento	5426.67 W
	Potência perdida pelo PC	285.61 W
	Potência cedida pelos gases	5712.28 W

Sem considerar a condensação!

Gases	1º estimativa para Cp	1181.61 J/kg.K
	1º estimativa para ΔT	18.15 °C
	1º estimativa para T. final	76.85 °C
	1º estimativa para T. média	85.92 °C
	2º estimativa para Cp	1181.61 J/kg.K
	2º estimativa para ΔT	18.15 °C
	2º estimativa para T. final	76.85 °C

Considerando a condensação!

Caudal de condensados	0.012358 kg/s
Caudal final de gases	0.253934 kg/s
Temperatura final dos gases	77.85 °C

Estimativa para ΔT	17.15 °C
Estimativa para T. média	86.42 °C
Estimativa para Cp (gases)	1181.71 J/kg.K
Variação do calor latente	45693.99 J/kg

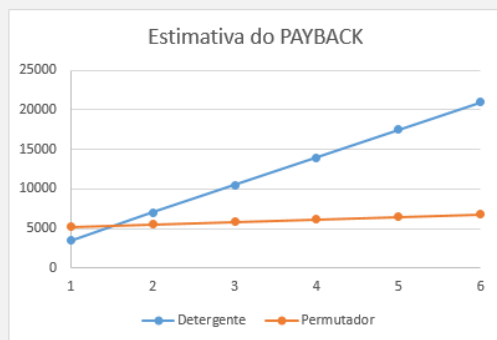
Diferença logarítmica da temperatura	ΔT1 (Tin, gases - Tout, água)	35.00 °C
	ΔT2 (Tout, gases - Tin, água)	65.55 °C
	ΔTml	48.69 °C

Área de transferência	Potência = A*U*ΔTml	5712.28 W
	Área necessária	8.96 m²

Caraterísticas da chaminé	Diâmetro exterior	0.2 m
	Diâmetro interior	0.192 m
	Perímetro interior	0.60 m

Caraterísticas da serpentina	Comprimento necessário	69.53 m
	Volume de cobre usado	0.008956 m³
	Peso total	80.25 kg
	Número de voltas	35 voltas
	Altura	1.51 m

Custos	Valor #1 - material	1606.94 €
	Valor #2 - criação	695.34 €
	Valor #3 - instalação	720.00 €
	Valor #4 - adicional	1511.14 €
	CUSTO TOTAL	4533.42 €
	Valor #5 - manutenção anual	317.34 €



Payback estimado em 2 anos!

Hipótese 2: Forno de revenido 2 aquece a máquina de lavar da linha 1

PC	Potência para aquecimento	5426.67 W
	Potência perdida pelo PC	285.61 W
	Potência cedida pelos gases	5712.28 W

Sem considerar a condensação!

Gases	1º estimativa para Cp	1176.13 J/kg.K
	1º estimativa para ΔT	21.89 °C
	1º estimativa para T. final	48.11 °C
	1º estimativa para T. média	59.05 °C
	2º estimativa para Cp	1176.13 J/kg.K
	2º estimativa para ΔT	21.89 °C
	2º estimativa para T. final	48.11 °C

Não existe energia suficiente nos gases para aquecer a água à temperatura de 60 °C

3. Dimensionamento dos permutadores da segunda máquina de lavar utilizando os gases dos fornos de austenização.

Propriedades iniciais			Caraterísticas da instalação	
PC	Rendimento	95%	MATERIAL DE CONSTRUÇÃO	
Gases - Linha 1	Densidade	1.25 kg/m ³	Material	Cobre
	Caudal volúmico	1061.00 m ³ /h	U (referência para gases-água)	13.1 W/m ² .K
	Caudal mássico	0.3684 kg/s	Diâmetro exterior	0.042 m
	Temperatura inicial	105.00 °C	Espessura do tubo	0.001 m
Gases - Linha 2	Densidade	1.25 kg/m ³	Diâmetro interior	0.04 m
	Caudal volúmico	1273.00 m ³ /h	Diâmetro médio	0.041 m
	Caudal mássico	0.44201 kg/s	Área de secção	0.000129 m ²
	Temperatura inicial	136.00 °C	Comprimento por volta na serpentina	2 m
Água de reposição o (vai para depósito)	Caudal volúmico	300.00 L	Peso aproximado por metro de tubo	8960 kg/m ³
	Período de aquecimento	7.5 h	Preço por cada metro	23.11 €/m
	Temperatura inicial	12.3 °C	Custo da criação da serpentina	10.00 €/m
	Densidade à temp. fria	999.39 kg/m ³	Custo da mão-de-obra para instalar	240.00 €/dia
	Cp à temp. fria	4197.68 J/kg.K	Duração da instalação	3 dias
	Temperatura desejada	50 °C	Custos adicionais de instalação	50% %/total
	Temperatura final	60 °C	Custos anuais de manutenção	7% %/total anual
	Densidade à temp. fria	982.59 kg/m ³	ELETRICIDADE CONSUMIDA	
	Cp à temp. fria	4197.68 J/kg.K	Poupança anual	828.19 €/ano
	Caudal volúmico necessário	40.00 L/h	DEPÓSITO DE INÉRCIA (Volume: 400L)	
	Caudal de água fria	8.27 L/h	Depósito de inércia Aquafer - 300L	959.00 €
	Caudal de água quente	31.73 L/h		
	Temperatura final	36.15 °C		
	Densidade à T. média	992.51 kg/m ³		
Calor específico à T. média	4181.27 J/kg.K			
Caudal mássico	0.00875 kg/s			
Diferença de temperaturas	47.7 °C			
Água para Manuten ção	Caudal volúmico	300.00 L/h		
	Temperatura inicial	47 °C		
	Temperatura final	50 °C		
	Temperatura média	48.50 °C		
	Diferença de temperaturas	3.00 °C		
	Densidade à T. média	987.75 kg/m ³		
	Calor específico à T. média	4178.83 J/kg.K		
Caudal mássico	0.08231 kg/s			

	Valor real inserido pelo aluno
	Valor arbitrado pelo aluno
	Valor obtido através de interpolação
	Valor calculado através do Solver (Excel)
	Valor calculado por equação própria

Hipótese 1: Forno de austenização 1 aquece a máquina de lavar da linha 1		Hipótese 2: Forno de austenização 2 aquece a máquina de lavar da linha 2	
Depósito		Depósito	
PC	Potência para aquecimento	1744.51	W
	Potência perdida pelo PC	91.82	W
	Potência cedida pelos gases	1836.32	W
Depósito Sem condensação, pois T. final > 100°C!		Depósito Sem condensação, pois T. final > 100°C!	
Gases	1º estimativa para Cp	1185.20	J/kg.K
	1º estimativa para ΔT	4.21	°C
	1º estimativa para T. final	100.79	°C
	1º estimativa para T. média	102.90	°C
	2º estimativa para Cp	1185.20	J/kg.K
	2º estimativa para ΔT	4.21	°C
	2º estimativa para T. final	100.79	°C
Manut.		Manut.	
PC	Potência para aquecimento	1031.91	W
	Potência perdida pelo PC	54.31	W
	Potência cedida pelos gases	1086.22	W
Manut. Sem condensação		Manut. Sem condensação, pois T. final > 100°C!	
Gases	1º estimativa para Cp	1184.48	J/kg.K
	1º estimativa para ΔT	2.49	°C
	1º estimativa para T. final	98.31	°C
	1º estimativa para T. média	99.55	°C
	2º estimativa para Cp	1184.48	J/kg.K
	2º estimativa para ΔT	2.49	°C
	2º estimativa para T. final	98.31	°C
Considerando a condensação!			
Caudal de condensados		0.03115	kg/s
Caudal final de gases		0.33725	kg/s
Temperatura final dos gases		99.31	°C
Estimativa para ΔT		1.49	°C
Estimativa para T. média		100.05	°C
Estimativa para Cp (gases)		1184.59	J/kg.K
Variação do calor latente		15768.9	J/kg

Hipótese 1: Forno de austenização 1 aquece a máquina de lavar da linha 1

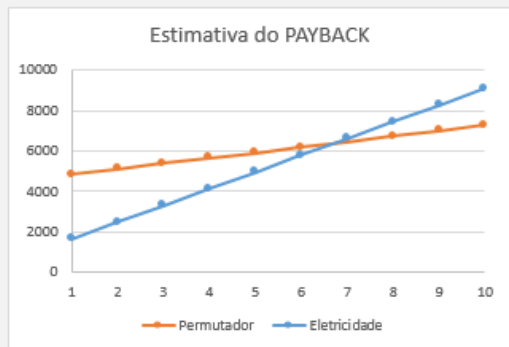
Hipótese 2: Forno de austenização 2 aquece a máquina de lavar da linha 2

Depósito		
Diferença logarítmica da temperatura	$\Delta T1$ (Tin, gases - Tout, água)	45.00 °C
	$\Delta T2$ (Tout, gases - Tin, água)	88.49 °C
	ΔTml	64.31 °C
Área de transferência	Potência = $A \cdot U \cdot \Delta Tml$	1836.32 W
	Área necessária	2.18 m ²
Caraterísticas da chaminé	Diâmetro exterior	0.25 m
	Diâmetro interior	0.24 m
	Perímetro interior	0.75 m
Caraterísticas da serpentina	Comprimento necessário	16.92 m
	Volume de cobre usado	0.00218 m ³
	Peso total	19.53 kg
	Número de voltas	8 voltas
	Altura	0.34 m
Custos	Valor #1 - material	391.05 €
	Valor #2 - criação	169.21 €
	Valor #3 - instalação	720.00 €
	Valor #4 - adicional	640.13 €
	CUSTO TOTAL	1920.40 €
	Valor #5 - manutenção anual	134.43 €

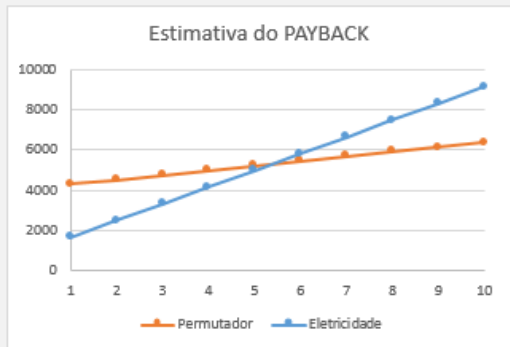
Depósito		
Diferença logarítmica da temperatura	$\Delta T1$ (Tin, gases - Tout, água)	76.00 °C
	$\Delta T2$ (Tout, gases - Tin, água)	120.22 °C
	ΔTml	96.42 °C
Área de transferência	Potência = $A \cdot U \cdot \Delta Tml$	1836.32 W
	Área necessária	1.45 m ²
Caraterísticas da chaminé	Diâmetro exterior	0.25 m
	Diâmetro interior	0.24 m
	Perímetro interior	0.75 m
Caraterísticas da serpentina	Comprimento necessário	11.29 m
	Volume de cobre usado	0.00145 m ³
	Peso total	13.03 kg
	Número de voltas	6 voltas
	Altura	0.26 m
Custos	Valor #1 - material	260.83 €
	Valor #2 - criação	112.87 €
	Valor #3 - instalação	720.00 €
	Valor #4 - adicional	546.85 €
	CUSTO TOTAL	1640.54 €
	Valor #5 - manutenção anual	114.84 €

Manut.		
Diferença logarítmica da temperatura	$\Delta T1$ (Tin, gases - Tout, água)	50.79 °C
	$\Delta T2$ (Tout, gases - Tin, água)	52.31 °C
	ΔTml	51.55 °C
Área de transferência	Potência = $A \cdot U \cdot \Delta Tml$	1086.22 W
	Área necessária	1.61 m ²
Caraterísticas da chaminé	Diâmetro exterior	0.25 m
	Diâmetro interior	0.24 m
	Perímetro interior	0.75 m
Caraterísticas da serpentina	Comprimento necessário	12.49 m
	Volume de cobre usado	0.00161 m ³
	Peso total	14.41 kg
	Número de voltas	6 voltas
	Altura	0.26 m
Custos	Valor #1 - material	288.61 €
	Valor #2 - criação	124.89 €
	Valor #3 - instalação	720.00 €
	Valor #4 - adicional	566.75 €
	CUSTO TOTAL	1700.25 €
	Valor #5 - manutenção anual	134.43 €

Manut.		
Diferença logarítmica da temperatura	$\Delta T1$ (Tin, gases - Tout, água)	82.52 °C
	$\Delta T2$ (Tout, gases - Tin, água)	83.45 °C
	ΔTml	82.98 °C
Área de transferência	Potência = $A \cdot U \cdot \Delta Tml$	1086.22 W
	Área necessária	1.00 m ²
Caraterísticas da chaminé	Diâmetro exterior	0.25 m
	Diâmetro interior	0.24 m
	Perímetro interior	0.75 m
Caraterísticas da serpentina	Comprimento necessário	7.76 m
	Volume de cobre usado	0.001 m ³
	Peso total	8.95 kg
	Número de voltas	4 voltas
	Altura	0.17 m
Custos	Valor #1 - material	179.28 €
	Valor #2 - criação	77.58 €
	Valor #3 - instalação	720.00 €
	Valor #4 - adicional	488.43 €
	CUSTO TOTAL	1465.28 €
	Valor #5 - manutenção anual	114.84 €



Payback estimado em 7 anos!



Payback estimado em 6 anos!

4. Dimensionamento dos permutadores da segunda máquina de lavar utilizando os gases dos fornos de revenido.

Propriedades iniciais			Caraterísticas da instalação		
PC	Rendimento	95%	MATERIAL DE CONSTRUÇÃO		
Gases - Linha 1	Densidade	1.25 kg/m ³	Material	Cobre	
	Caudal volúmico	958.65 kg/h	U (referência para gases-água)	13.1	W/m ² .K
	Caudal mássico	0.26629 kg/s	Diâmetro exterior	0.042	m
	Temperatura inicial	95.00 °C	Espessura do tubo	0.001	m
Gases - Linha 2	Densidade	1.25 kg/m ³	Diâmetro interior	0.04	m
	Caudal volúmico	798.66 kg/h	Diâmetro médio	0.041	m
	Caudal mássico	0.22185 kg/s	Área de secção	0.000129	m ²
	Temperatura inicial	70.00 °C	Comprimento por volta na serpentina	2	m
Água de reposição (vai para depósito)	Caudal volúmico	300.00 L/h	Peso aproximado por metro de tubo	8960	kg/m ³
	Período de aquecimento	7.5 h	Preço por cada metro	23.11	€/m
	Temperatura inicial	12.3 °C	Custo da criação da serpentina	10.00	€/m
	Densidade à temp. fria	999.39 kg/m ³	Custo da mão-de-obra para instalar	240.00	€/dia
	Cp à temp. fria	4197.68 J/kg.K	Duração da instalação	3	dias
	Temperatura desejada	50 °C	Custos adicionais de instalação	50%	%/total
	Temperatura final	60 °C	Custos anuais de manutenção	7%	%/total anual
	Densidade à temp. fria	982.59 kg/m ³	ELETRICIDADE CONSUMIDA		
	Cp à temp. fria	4197.68 J/kg.K	Poupança anual	828.19	€/ano
	Caudal volúmico necessário	40.00 L/h	DEPÓSITO DE INÉRCIA (Volume: 400L)		
	Caudal de água fria	8.27 L/h	Depósito de inércia Aquafer - 300L	959.00	€
	Caudal de água quente	31.73 L/h			
	Temperatura final	36.15 °C			
	Densidade à T. média	992.51 kg/m ³			
	Calor específico à T. média	4181.27 J/kg.K			
	Caudal mássico	0.00875 kg/s			
Diferença de temperaturas	47.7 °C				
Água para Manuten ção	Caudal volúmico	300.00 L/h			
	Temperatura inicial	47 °C			
	Temperatura final	50 °C			
	Temperatura média	48.50 °C			
	Diferença de temperaturas	3.00 °C			
	Densidade à T. média	987.75 kg/m ³			
	Calor específico à T. média	4178.83 J/kg.K			
Caudal mássico	0.08231 kg/s				

	Valor real inserido pelo aluno
	Valor arbitrado pelo aluno
	Valor obtido através de interpolação
	Valor calculado através do Solver (Excel)
	Valor calculado por equação própria

Hipótese 1: Forno de revenido 1 aquece a máquina de lavar da linha 1			Hipótese 2: Forno de revenido 2 aquece a máquina de lavar da linha 2		
Depósito			Depósito		
PC	Potência para aquecimento	1744.51 W	PC	Potência para aquecimento	1744.51 W
	Potência perdida pelo PC	91.82 W		Potência perdida pelo PC	91.82 W
	Potência cedida pelos gases	1836.32 W		Potência cedida pelos gases	1836.32 W
Depósito Sem condensação, pois T. final > 100°C!			Depósito Sem condensação, pois T. final > 100°C!		
Gases	1º estimativa para Cp	1182.90 J/kg.K	Gases	1º estimativa para Cp	1192.10 J/kg.K
	1º estimativa para ΔT	5.83 °C		1º estimativa para ΔT	6.94 °C
	1º estimativa para T. final	89.17 °C		1º estimativa para T. final	63.06 °C
	1º estimativa para T. média	92.09 °C		1º estimativa para T. média	66.53 °C
	2º estimativa para Cp	1182.90 J/kg.K		2º estimativa para Cp	1177.63 J/kg.K
	2º estimativa para ΔT	5.83 °C		2º estimativa para ΔT	7.03 °C
	2º estimativa para T. final	89.17 °C		2º estimativa para T. final	62.97 °C
Manut. 0			Manut. 0		
PC	Potência para aquecimento	1031.91 W	PC	Potência para aquecimento	1031.91 W
	Potência perdida pelo PC	54.31 W		Potência perdida pelo PC	54.31 W
	Potência cedida pelos gases	1086.22 W		Potência cedida pelos gases	1086.22 W
Manut. Sem condensação			Manut. Sem condensação, pois T. final > 100°C!		
Gases	1º estimativa para Cp	1181.92 J/kg.K	Gases	1º estimativa para Cp	1191.48 J/kg.K
	1º estimativa para ΔT	3.45 °C		1º estimativa para ΔT	4.11 °C
	1º estimativa para T. final	85.72 °C		1º estimativa para T. final	58.86 °C
	1º estimativa para T. média	87.44 °C		1º estimativa para T. média	60.92 °C
	2º estimativa para Cp	1181.92 J/kg.K		2º estimativa para Cp	1176.50 J/kg.K
	2º estimativa para ΔT	3.45 °C		2º estimativa para ΔT	4.16 °C
	2º estimativa para T. final	85.72 °C		2º estimativa para T. final	58.81 °C
Considerando a condensação!			Considerando a condensação!		
	Caudal de condensados	0.01621 kg/s		Caudal de condensados	0.01251 kg/s
	Caudal final de gases	0.25008 kg/s		Caudal final de gases	0.20564 kg/s
	Temperatura final dos gases	86.72 °C		Temperatura final dos gases	59.81 °C
	Estimativa para ΔT	2.45 °C		Estimativa para ΔT	3.16 °C
	Estimativa para T. média	87.94 °C		Estimativa para T. média	61.39 °C
	Estimativa para Cp (gases)	1182.03 J/kg.K		Estimativa para Cp (gases)	1176.60 J/kg.K
	Variação do calor latente	22303.6 J/kg		Variação do calor latente	25677.5 J/kg

Hipótese 1: Forno de revenido 1 aquece a máquina de lavar da linha 1

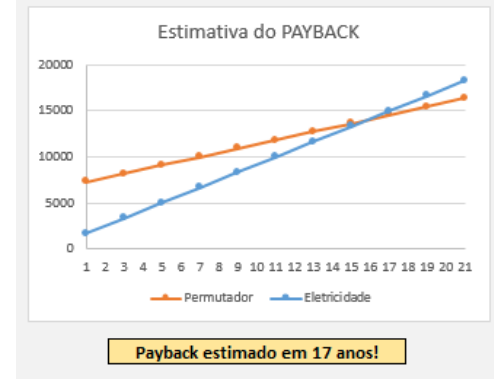
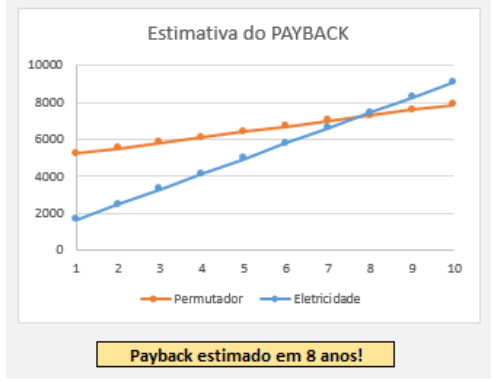
Hipótese 2: Forno de revenido 2 aquece a máquina de lavar da linha 2

Depósito			
Diferença logarítmica da temperatura	$\Delta T1$ (Tin, gases - Tout, água)	35.00	°C
	$\Delta T2$ (Tout, gases - Tin, água)	76.87	°C
	$\Delta Tm1$	53.22	°C
Área de transferência	Potência = $A \cdot U \cdot \Delta Tm1$	1836.32	W
	Área necessária	2.63	m ²
Caraterísticas da chaminé	Diâmetro exterior	0.2	m
	Diâmetro interior	0.192	m
	Perímetro interior	0.60	m
Caraterísticas da serpentina	Comprimento necessário	20.45	m
	Volume de cobre usado	0.00263	m ³
	Peso total	23.60	kg
	Número de voltas	10	voltas
	Altura	0.43	m
Custos	Valor #1 - material	472.59	€
	Valor #2 - criação	204.50	€
	Valor #3 - instalação	720.00	€
	Valor #4 - adicional	698.54	€
	CUSTO TOTAL	2095.63	€
	Valor #5 - manutenção anual	146.69	€

Depósito			
Diferença logarítmica da temperatura	$\Delta T1$ (Tin, gases - Tout, água)	10.00	°C
	$\Delta T2$ (Tout, gases - Tin, água)	50.67	°C
	$\Delta Tm1$	25.06	°C
Área de transferência	Potência = $A \cdot U \cdot \Delta Tm1$	1836.32	W
	Área necessária	5.59	m ²
Caraterísticas da chaminé	Diâmetro exterior	0.2	m
	Diâmetro interior	0.192	m
	Perímetro interior	0.60	m
Caraterísticas da serpentina	Comprimento necessário	43.42	m
	Volume de cobre usado	0.00559	m ³
	Peso total	50.11	kg
	Número de voltas	22	voltas
	Altura	0.95	m
Custos	Valor #1 - material	1003.49	€
	Valor #2 - criação	434.23	€
	Valor #3 - instalação	720.00	€
	Valor #4 - adicional	1078.86	€
	CUSTO TOTAL	3236.58	€
	Valor #5 - manutenção anual	226.56	€

Manut.			
Diferença logarítmica da temperatura	$\Delta T1$ (Tin, gases - Tout, água)	39.17	°C
	$\Delta T2$ (Tout, gases - Tin, água)	39.72	°C
	$\Delta Tm1$	39.44	°C
Área de transferência	Potência = $A \cdot U \cdot \Delta Tm1$	1086.22	W
	Área necessária	2.10	m ²
Caraterísticas da chaminé	Diâmetro exterior	0.2	m
	Diâmetro interior	0.192	m
	Perímetro interior	0.60	m
Caraterísticas da serpentina	Comprimento necessário	16.32	m
	Volume de cobre usado	0.0021	m ³
	Peso total	18.84	kg
	Número de voltas	8	voltas
	Altura	0.34	m
Custos	Valor #1 - material	377.17	€
	Valor #2 - criação	163.20	€
	Valor #3 - instalação	720.00	€
	Valor #4 - adicional	630.19	€
	CUSTO TOTAL	1890.56	€
	Valor #5 - manutenção anual	146.69	€

Manut.			
Diferença logarítmica da temperatura	$\Delta T1$ (Tin, gases - Tout, água)	12.97	°C
	$\Delta T2$ (Tout, gases - Tin, água)	12.81	°C
	$\Delta Tm1$	12.89	°C
Área de transferência	Potência = $A \cdot U \cdot \Delta Tm1$	1086.22	W
	Área necessária	6.43	m ²
Caraterísticas da chaminé	Diâmetro exterior	0.2	m
	Diâmetro interior	0.192	m
	Perímetro interior	0.60	m
Caraterísticas da serpentina	Comprimento necessário	49.94	m
	Volume de cobre usado	0.00643	m ³
	Peso total	57.64	kg
	Número de voltas	25	voltas
	Altura	1.08	m
Custos	Valor #1 - material	1154.13	€
	Valor #2 - criação	499.41	€
	Valor #3 - instalação	720.00	€
	Valor #4 - adicional	1186.77	€
	CUSTO TOTAL	3560.30	€
	Valor #5 - manutenção anual	226.56	€



5. Dimensionamento dos permutadores da segunda máquina de secagem utilizando os gases do forno de austenização da linha 2.

Propriedades iniciais			Caraterísticas da instalação		
PC	Rendimento	95%	MATERIAL DE CONSTRUÇÃO		
Gases - Linha 2	Densidade	1.25 kg/m ³	Material	Cobre	
	Caudal volúmico	1273.00 m ³ /h	U (referência para gases-água)	13.1	W/m ² .K
	Caudal mássico	0.442014 kg/s	Diâmetro exterior	0.042	m
	Temperatura inicial	136.00 °C	Espessura do tubo	0.001	m
Ar de secagem	Temperatura inicial	5 °C	Diâmetro interior	0.04	m
	Temperatura final	100 °C	Diâmetro médio	0.041	m
	Temperatura média	52.50 °C	Área de secção	0.000129	m ²
	Densidade à T. média	1.087925 kg/m ³	Comprimento por volta na serpentina	2	m
	Calor específico à T. média	1007.60 J/kg.K	Peso aproximado por metro de tubo	8960	kg/m ³
	Diferença de temperaturas	95 °C	Preço por cada metro	23.11	€/m
	Altura da secção de secagem	0.26 m	Custo da criação da serpentina	10.00	€/m
	Largura da secção de secagem	0.23 m	Custo da mão-de-obra para instalar	240.00	€/dia
	Área da secção de secagem	0.06 m ²	Duração da instalação	3	dias
	Caudal volúmico	1000 m ³ /h	Custos adicionais de instalação	50%	%/total
Caudal mássico	0.302201 kg/s	Custos anuais de manutenção	7%	%/total anual	
			ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA		
			Poupança anual	5454.27	€/ano

	Valor real inserido pelo aluno
	Valor arbitrado pelo aluno
	Valor obtido através de interpolação
	Valor calculado através do Solver (Excel)
	Valor calculado por equação própria

Hipótese 1: Forno de austenização 2 aquece a máquina de secagem da linha 2

Gás-Ar			Nesse caso, qual será a temperatura mínima que os gases terão à saída?	
PC	Potência para aquecimento	28927.38 W		
	Potência perdida pelo PC	3125.12 W		
	Potência cedida pelos gases	32052.49 W		
Gás-Ar				
Gases	1º estimativa para Cp	1185.74 J/kg.K	Estimativa para T. final	110.00 °C
	1º estimativa para ΔT	61.16 °C	Estimativa para T. média	123.00 °C
	1º estimativa para T. final	74.84 °C	Estimativa para Cp	1189.58 J/kg.K
	1º estimativa para T. média	105.42 °C	Estimativa para ΔT	26.00 °C
	2º estimativa para Cp	1185.74 J/kg.K	Potência cedida pelos gases	13671.12 W
	2º estimativa para ΔT	61.16 °C	Potência aquecimento PC 1	12987.57 W
	2º estimativa para T. final	74.84 °C	Potência aquecimento PC 2	12338.19 W
			Não existe energia suficiente nos gases para aquecer o ar à temperatura de 100 °C	

Dimensionamento do Permutador 1 (Gases de exaustão – Água)			Dimensionamento do Permutador 2 (Água - Ar)		
Diferença logarítmica da temperatura	$\Delta T1$ (Tin, gases - Tout, água)	36.00 °C	Diferença logarítmica da temperatura	$\Delta T1$ (Tin, água - Tout, ar)	10.00 °C
	$\Delta T2$ (Tout, gases - Tin, água)	105.00 °C		$\Delta T2$ (Tout, água - Tin, ar)	95.00 °C
	$\Delta Tm1$	64.46 °C		$\Delta Tm1$	37.76 °C
Área de transferência	Potência = $A \cdot U \cdot \Delta Tm1$	12987.57 W	Área de transferência	Potência = $A \cdot U \cdot \Delta Tm1$	12338.19 W
	Área necessária	15.38 m ²		Área necessária	24.95 m ²
Caraterísticas da chaminé	Diâmetro exterior	0.25 m	Caraterísticas da chaminé	Diâmetro exterior	0.25 m
	Diâmetro interior	0.24 m		Diâmetro interior	0.24 m
	Perímetro interior	0.75 m		Perímetro interior	0.75 m
Caraterísticas da serpentina	Comprimento necessário	119.41 m	Caraterísticas da serpentina	Comprimento necessário	193.67 m
	Volume de cobre usado	0.01538 m ³		Volume de cobre usado	0.02495 m ³
	Peso total	137.81 kg		Peso total	223.51 kg
	Número de voltas	60 voltas		Número de voltas	97 voltas
	Altura	2.58 m		Altura	4.17 m
Custos	Valor #1 - material	2759.54 €	Custos	Valor #1 - material	4475.68 €
	Valor #2 - criação	1194.09 €		Valor #2 - criação	1936.69 €
	Valor #3 - instalação	720.00 €		Valor #3 - instalação	720.00 €
	Valor #4 - adicional	2336.81 €		Valor #4 - adicional	3566.18 €
	CUSTO TOTAL	7010.44 €		CUSTO TOTAL	10698.55 €
	Valor #5 - manutenção anual	490.73 €		Valor #5 - manutenção anual	748.90 €

