

Mestrado Integrado em Engenharia Química

Aproveitamento do calor excedentário numa linha de tratamento térmico

Dissertação de Mestrado

de

Ricardo Augusto Tomé Gonçalves

Desenvolvida no âmbito da unidade curricular de Dissertação

realizado em

PECOL AUTOMOTIVE



Orientador na FEUP: Prof. Fernando Martins

Coordenador na PECOL AUTOMOTIVE: Eng. Hugo Moura



Departamento de Engenharia Química

junho de 2019

Agradecimentos

Antes de mais um agradecimento geral a todas as pessoas que fizeram parte do meu percurso académico.

Agradecer à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, mais precisamente ao departamento de Engenharia Química, por estes dois anos de aprendizagem.

À GALP pela criação desta iniciativa Galp21 e possibilitar a consolidação dos conhecimentos aprendidos em cinco anos num ambiente empresarial.

Um agradecimento especial a toda a equipa da PECOL AUTOMOTIVE, principalmente ao departamento de Tecnologia e Manutenção, ao departamento de Recursos Humanos, mais precisamente ao Dr. António Simões pela receção tanto na empresa como na cidade de Águeda e ao laboratório de tratamentos térmicos principalmente à Joana Oliveira e à Marina Branco.

Ao Eng. Hugo Moura pela oportunidade de desenvolver o estágio na PECOL AUTOMOTIVE, o que me permitiu desenvolver e consolidar conhecimentos sobre uma área de interesse pessoal.

Aos meus pais que sempre lutaram para que eu fosse feliz e me deram muito na cabeça para fazer as coisas com dedicação e gosto.

À minha madrinha que me apoiou em tudo, mesmo não concordando com algumas decisões.

À Rafaela Silva e ao Ângelo Miguel pelo apoio nesta fase transitória e, acima de tudo, por terem estado sempre presentes.

A Agostinho Sousa e Conceição Costa por nunca me terem virado as costas.

À Raquel Costa pela paciência que teve e pelo apoio incondicional.

E por último, mas não menos importante, ao meu orientador da FEUP, Fernando Martins, ao qual agradeço com um apreço especial, não só pela disponibilidade para orientar este trabalho como pelos conselhos dados ao longo do mesmo.

Obrigado a todos!

O Prof. Fernando Gomes Martins, orientador desta dissertação, é membro integrado do LEPABE – Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente Biotecnologia e Energia, financiado por: Unidade de Investigação UID/EQU/00511/2019 - Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia – LEPABE - financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC) e pelo Projeto “LEPABE-2-ECO-INNOVATION”, com a referência NORTE-01-0145-FEDER-000005, cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE 2020), através do Portugal 2020 e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

Resumo

O presente trabalho descreve as atividades desenvolvidas, no decurso da dissertação realizado no departamento de Tecnologia e Manutenção, da empresa PECOL AUTOMOTIVE no âmbito do programa Galp21. A avaliação dos consumos energéticos e estudo do aproveitamento do calor constituem as atividades centrais do estágio realizado.

A necessidade da empresa acompanhar a concorrência leva a ser necessário um estudo dos seus parâmetros energéticos para avaliar quais as áreas de ataque e apresentar soluções para essas áreas. Uma das soluções foi o aproveitamento do calor de um dos fornos de tratamento térmico através do uso de permutadores.

Foi realizada uma avaliação intensiva dos consumos de gás natural e de energia elétrica da PECOL AUTOMOTIVE e da RETSACOAT, tendo sido, posteriormente, realizada essa avaliação para as linhas de tratamento térmico, linha 1 e linha 2. Foram ainda calculados os parâmetros energéticos adaptados da legislação, sendo eles o indicador de emissões (IC'), o indicador de energia (IE'), o indicador de consumo (CEE') e por fim o custo por tonelada (CT). O mais relevante é o CEE' uma vez que representa a eficiência energética do processo. A linha 1 encontra-se conforme o expectável, enquanto que a linha 2 apresenta um aumento do consumo energético ao longo dos anos, o que se traduz numa menor eficiência visto o consumo e o produto processado aumentarem.

No aproveitamento do calor foram calculados os caudais de admissão dos queimadores indiretos, a temperatura dos gases de exaustão tendo sido obtida uma temperatura de aproximadamente 259,7 °C, realizou-se o dimensionamento dos permutadores para três cenários (Cenário I – Aquecimento do ar de secagem, Cenário II – Aquecimento de uma malha fechada de água e Cenário III – Aquecimento do ar de secagem e de uma malha fechada de água), tendo-se obtido uma potência de térmica de 35,8 kW, 97,0 kW e 94,9 kW, respetivamente. Os cenários são viáveis a nível técnico visto serem atingidas as temperaturas e condições pretendidas, o Cenário I apresenta um período de retorno de meio ano, uma poupança do consumo e custo de energia elétrica de 3,1 % e uma redução anual de emissões de 133,2 t_{CO2e}.

Palavras Chave (Tema):

energia, aproveitamento, permutadores

Abstract

This paper describes the activities developed during the dissertation carried out in the Technology and Maintenance department of the company PECOL AUTOMOTIVE under the Galp21 program. The evaluation of energy consumption and study of heat utilization constitute the core activities of the performed stage.

The need for the company to keep up with the competition makes it necessary to study its energy parameters to assess which areas of attack and provide solutions for those areas. One solution was the utilization of heat from one of the heat treatment furnaces through the use of heat exchangers.

An intensive assessment was made of PECOL AUTOMOTIVE and RETSACOAT's natural gas and electricity consumption, and this assessment was then performed for the heat treatment lines, line 1 and line 2. The energy parameters adapted from legislation, such as the emissions indicator (IC'), the energy indicator (IE'), the consumption indicator (CEE') and finally the cost per tonne (CT). Most relevant is CEE' as it represents the energy efficiency of the process. The line 1 is found as expected, while line 2 shows an increase in energy consumption over the years, which translates into lower efficiency as consumption and processed product increase.

In the heat utilization, the inlet flow rates of the indirect burners were calculated, the exhaust gas temperature having been obtained at a temperature of approximately 259.7 °C, the heat exchangers were dimensioned for three scenarios (Scenario I - Heating of the drying air, Scenario II - Heating of a closed water mesh and Scenario III - Heating of the drying air and a closed water mesh). The scenarios are technically feasible as the desired temperatures and conditions are reached, Scenario I has a half year payback period a consumption and cost savings of 3.1% and an emission annual reduction of 133.2 t_{CO2e}.

Keywords: energy, utilization, heat exchangers

Declaração

Declara, sob compromisso de honra, que este trabalho é original e que todas as contribuições não originais foram devidamente referenciadas com identificação da fonte.

Assinar e datar

Índice

1. Introdução.....	11
1.1 Enquadramento	11
1.2 Apresentação do projeto.....	11
1.3 Apresentação da empresa	11
1.4 Contributos do trabalho	12
1.5 Organização da tese.....	12
2. Contexto e Estado de Arte	13
3. Materiais e Métodos	17
3.1 Descrição do funcionamento do forno.....	17
3.2 Aplicações Informáticas	20
4. Resultados e Discussão.....	21
4.1 Consumos Energéticos	21
4.1.1 Consumos Globais	21
4.1.2 Linhas de tratamento térmico	24
4.2 Análise do calor excedentário	30
4.2.1 Cálculo dos caudais de admissão dos queimadores	30
4.2.2 Cálculo da temperatura dos gases de exaustão nos tubos	34
4.2.3 Cálculo da potência do forno	37
4.2.4 Dimensionamento de permutadores.....	38
5. Conclusões	43
6. Avaliação do trabalho realizado.....	45
6.1 Objetivos Realizados.....	45
6.2 Outros Trabalhos Realizados	45
7. Referências	47
Apêndice A - Consumos Energéticos	49
Apêndice A.1 - Cálculo das emissões das duas formas de energia	49

Apêndice A.2 - Cálculo dos parâmetros de eficiência energética	49
Apêndice B - Análise do calor excedentário	51
Apêndice B.1 - Cálculo dos caudais de admissão dos queimadores	51
Apêndice B.2 - Cálculo da temperatura dos gases de exaustão nos tubos.....	52
Apêndice B.3 - Dimensionamento do permutador	63

Índice de Figuras

Figura 1 - Unidade comercial e unidades produtivas da empresa PECOL.	11
Figura 2 - Variação dos valores de emissão de CO ₂	14
Figura 3 - Consumo do gás natural pelo mundo.	15
Figura 4 - Linhas de tratamento térmico da PECOL AUTOMOTIVE, a) - Linha 1 e b) - Linha 2.	17
Figura 5 - Etapas do processo de tratamento térmico.	17
Figura 6 - Entrada do tratamento térmico linha 1.....	18
Figura 7 - Equipamento constituído por lavadoras mais secador.	18
Figura 8 - Relação entre o fator de emissão de gases de efeito de estufa e o consumo para a energia elétrica.	22
Figura 9 - Relação entre o fator de emissão de gases de efeito de estufa e o consumo para o gás natural.	23
Figura 10 – Esquema da tubagem dos reagentes para a linha 1.	30
Figura 11 - Tubos de exaustão.	34
Figura 12 - Esquema dos tubos.	34
Figura 13 – Diagrama de simulação do processo de combustão.	37
Figura 14 - Condições de operação do sistema de combustão.	37
Figura 15 - Resultados do modelo.	38
Figura 16 – Diagrama da simulação para o Cenário I.	39
Figura 17 – Diagrama da simulação para o Cenário II.	40
Figura 18 - Diagrama da simulação para o Cenário III.	41

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Percentagem e potencial de carbono de algumas matérias-primas utilizadas.	19
Tabela 2 - Resumo geral das diferentes formas de energia consumidas pela instalação.	21
Tabela 3 - Valor das emissões de gases de efeito de estufa para as diferentes formas de energia nas áreas de negócio.	22
Tabela 4 - Valores da matéria-prima processada.	22
Tabela 5 - Valores dos diferentes parâmetros avaliados para as formas de energia utilizadas nas áreas de negócio.	23
Tabela 6 - Resumo geral do consumo, do custo e das emissões de gases de efeito de estufa do gás natural pelos fornos da linha 1.	24
Tabela 7 - Quantidade de matéria-prima processada na linha 1.	25
Tabela 8 - Resumo do consumo, do custo e do fator emissão de gases de efeito de estufa para o gás natural pelos fornos da linha 2.	26
Tabela 9 - Quantidade de produto processado na linha 2.	26
Tabela 10 - Valores para os diferentes parâmetros para o gás natural da linha 1 e da linha 2.	28
Tabela 11 - Condições do metano e do ar, aplicadas ao projeto.	31
Tabela 12 - Caudais mássicos totais dos dois reagentes.	31
Tabela 13 - Valores das condições e dos caudais dos caudalímetros.	32
Tabela 14 - Valores dos caudais de admissão do forno de austenização.	32
Tabela 15 - Resumo das correntes da Figura 10.	33
Tabela 16 - Dimensão dos tubos.	34
Tabela 17 - Valores do coeficiente de transferência de calor, da condutividade térmica, das resistências e das áreas.	35
Tabela 18 - Potência térmica perdida por zona.	36
Tabela 19 - Temperaturas para as diferentes zonas.	36
Tabela 20 - Condições da corrente de gases de exaustão.	38

Tabela 21 - Condições de entrada do ar de secagem.	39
Tabela 22 - Principais características do permutador do Cenário I.	40
Tabela 23 - Principais características do permutador do Cenário II.	41
Tabela 24 - Principais características do permutador do Cenário III.....	42

Notação e Glossário

IC'	Indicador de emissões	$\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}}(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$
IE'	Indicador de energia	$\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{€}^{-1}$
CEE'	Indicador de consumo	$\text{MW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}$
CT	Custo por tonelada	$\text{€}\cdot\text{t}^{-1}$
T	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
P	Pressão	kPa
MM	Massa molar	$\text{kg}\cdot\text{kmol}^{-1}$
ρ	Massa volúmica	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
$\dot{m}$	Caudal mássico	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
$\dot{V}_C$	Caudal volumétrico do caudalímetro	$\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$
$\dot{m}_C$	Caudal mássico do caudalímetro	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
$\dot{m}_Q$	Caudal mássico do queimador	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
r_1	Raio correspondente à passagem dos gases de exaustão	mm
r_2	Raio correspondente ao tubo	mm
r_3	Raio correspondente à lã de rocha	mm
r_4	Raio correspondente ao alumínio	mm
Δx_2	Espessura correspondente ao tubo	mm
Δx_3	Espessura correspondente à lã de rocha	mm
Δx_4	Espessura correspondente ao alumínio	mm
h_1	Altura do tubo maior	cm
h_2	Altura do tubo menor	cm
$h_{\text{conv.}}$	Coeficiente de transferência de calor para a convecção	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
A_1	Área do tubo maior	m^2
A_2	Área do tubo menos	m^2
$R_{\text{conv.1}}$	Resistência à convecção do tubo maior	$\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$

$R_{\text{conv.2}}$	Resistência à convecção do tubo menor	$K \cdot W^{-1}$
k_{tubo}	Condutividade térmica do tubo	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
R_{tubo1}	Resistência do tubo maior	$K \cdot W^{-1}$
R_{tubo2}	Resistência do tubo menor	$K \cdot W^{-1}$
$k_{\text{isol.}}$	Condutividade térmica do isolante	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$R_{\text{isol.1}}$	Resistência do isolante do tubo maior	$K \cdot W^{-1}$
$R_{\text{isol.2}}$	Resistência do isolante do tubo menor	$K \cdot W^{-1}$
$k_{\text{alum.}}$	Condutividade térmica do alumínio	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$R_{\text{alum.1}}$	Resistência do alumínio do tubo maior	$K \cdot W^{-1}$
$R_{\text{alum.2}}$	Resistência do alumínio do tubo menor	$K \cdot W^{-1}$
Q	Potência térmica perdida	W
T_0	Temperatura dos gases de exaustão	K
T_1	Temperatura no início do tubo	K
T_2	Temperatura no início da lã de rocha	K
T_3	Temperatura no início do alumínio	K
T_4	Temperatura no final do alumínio	K
$\dot{m}_{\text{combust.}}$	Caudal mássico dos gases de combustão	$kg \cdot h^{-1}$
T_{entrada}	Temperatura de entrada do ar de secagem	$^{\circ}C$
$\dot{V}_{\text{ar}}$	Caudal volumétrico de entrada do ar de secagem	$m^3 \cdot h^{-1}$
$E_{\text{missões E.E.}}$	Emissões de energia elétrica	t_{CO_2e}
$C_{\text{E.E.}}$	Consumo de energia elétrica	$MW \cdot h$
$E_{\text{missões G.N.}}$	Emissões de gás natural	t_{CO_2e}
$C_{\text{G.N.}}$	Consumo de gás natural	$MW \cdot h$
ΣC	Somatório do consumo de energia elétrica e gás natural	$MW \cdot h$

Σcusto	Somatório do custo da energia elétrica e do gás natural	€
Prod.	Produto processado	t
F	Caudal molar	$\text{kmol} \cdot \text{h}^{-1}$
R	Constante dos gases ideias	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot (\text{K} \cdot \text{mol})^{-1}$
$\text{Inv.}_{\text{permutador}}$	Investimento no permutador	€
$P_{\text{térmica}}$	Valor de calor trocado no permutador	kW
$N_{\text{funcion.}}$	Número de horas de funcionamento	H
Preço	Preço da eletricidade	$\text{€} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$

1. Introdução

1.1 Enquadramento

O documento aqui presente resume as atividades desenvolvidas no âmbito da unidade curricular de Dissertação, do 5º ano do Mestrado Integrado em Engenharia Química, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. O trabalho foi realizado na unidade produtiva PECOL AUTOMOTIVE, no departamento de Tecnologia e Manutenção.

1.2 Apresentação do projeto

O projeto intitula-se “Linha de tratamento térmico – aproveitamento do calor excedentário” e foi um tema proposto pela PECOL AUTOMOTIVE e está inserido na iniciativa Galp 21. O objetivo primordial é a diminuição de consumos de energia, e consequentemente gastos de gás natural e energia elétrica por aproveitamento do calor excedentário dos fornos.

1.3 Apresentação da empresa

A PECOL foi criada em 1983, em Águeda, com o nome de PECOL – Fábrica de Parafusos, Lda., e encontra-se integrada num grupo português de origem industrial a PCL – Investimentos (“PECOL,” 2019). Em 2001, a PECOL separou-se na sua unidade comercial (PECOL – Sistemas de Fixação, S.A.), e nas suas unidades produtivas (PECOL II – Componentes Industriais, Lda. e a RETSACOAT Portugal – Tratamentos Superficiais, LDA.), Figura 1 (“PECOL,” 2019).



Figura 1 - Unidade comercial e unidades produtivas da empresa PECOL.

A PECOL AUTOMOTIVE, S.A., anteriormente denominada por PECOL II – Componentes Industriais, S.A. foi fundada em 2001 com o intuito de aliar o conhecimento e a experiência obtida ao longo dos anos com as exigências de qualidade e competitividade dos mercados (“PECOL,” 2019).

1.4 Contributos do trabalho

O contributo para a empresa com este trabalho foi o estudo intensivo dos consumos de gás natural e energia elétrica que permitiu avaliar o desempenho energético não só da empresa como dos fornos da linha 1 e linha 2. Foi possível também determinar a temperatura dos gases de exaustão e assim dimensionar permutadores que permitissem o aproveitamento desses gases para aquecimento de outras correntes.

1.5 Organização da tese

A tese divide-se em 8 capítulos.

- O Capítulo 1 introduz o projeto e a empresa;
- O Capítulo 2 foca-se no contexto em que o projeto se envolve e apresenta os fundamentos teóricos para a realização do presente projeto;
- O Capítulo 3 descreve as aplicações informáticas, os métodos utilizados para melhor interpretação dos resultados obtidos;
- O Capítulo 4 mostra a análise detalhada dos consumos de gás natural e eletricidade exercidos pela empresa, assim como os valores para os indicadores estabelecidos na legislação e expõem o estudo detalhado dos fornos;
- O Capítulo 5 conclui a tese apresentada;
- O Capítulo 6 apresenta a avaliação do trabalho realizado e propostas para trabalhos futuros;
- O Capítulo 7 realça as referências utilizadas para a realização do projeto.

2. Contexto e Estado de Arte

O processo produtivo da PECOL AUTOMOTIVE encontra-se dividido em 8 etapas, sendo elas (“PECOL,” 2019):

- 01 – Decapagem e Fosfatação da Matéria Prima – Passagem da matéria-prima por tanques com compostos químicos que permitem a remoção de oxidações e impurezas;
- 02 – Trefilagem em Linha – Corte da matéria-prima para realizar o produto necessário;
- 03 – Estampagem – Molde do corte realizado na etapa anterior;
- 04 – Roscagem – Colocação da rosca no produto;
- 05 – Operações Adicionais;
- 06 – Tratamento Térmico – Passagem do produto por diversas etapas para conferir as características físicas necessária para a sua utilização;
- 07 – Tratamento de Superfície – Passagem do produto pelas etapas necessária para conferir as características químicas necessárias para a sua utilização;
- 08 – Seleção 100% e Embalagem – Seleção do produto e embalagem do mesmo.

Fazendo com que a unidade produtiva apresente uma capacidade produtiva de 2 000 t/mês (“PECOL,” 2019).

A dissertação foi realizada na etapa 06 – Tratamento térmico do processo produtivo da PECOL AUTOMOTIVE. Esta etapa é responsável por conferir ao produto as características físicas e químicas necessárias para a não degradação do mesmo com o uso.

O projeto dividiu-se em dois tópicos, análise do inventário do consumo de energia elétrica e gás natural da PECOL AUTOMOTIVE e da RETSACOAT e do aproveitamento do calor dos gases de exaustão dos queimadores do forno da linha 1.

A energia relaciona-se com a capacidade de colocar um corpo em movimento ou de o transformar (“U.S. Energy Information Administration,” 2019).

A energia necessária usada no consumo próprio e na indústria tem vindo a aumentar, tendo aumentado cerca de 2,3 % no ano de 2018, sendo o gás natural o combustível mais utilizado para satisfazer as necessidades energéticas (International Energy Agency, 2019). Contudo, este aumento de consumo provoca um aumento significativo das emissões de gases de efeito de estufa, cerca de 1,7 % para o ano de 2018, uma tendência que pode ser verificada ao longo dos anos (Figura 2 adaptado de International Energy Agency, 2019).

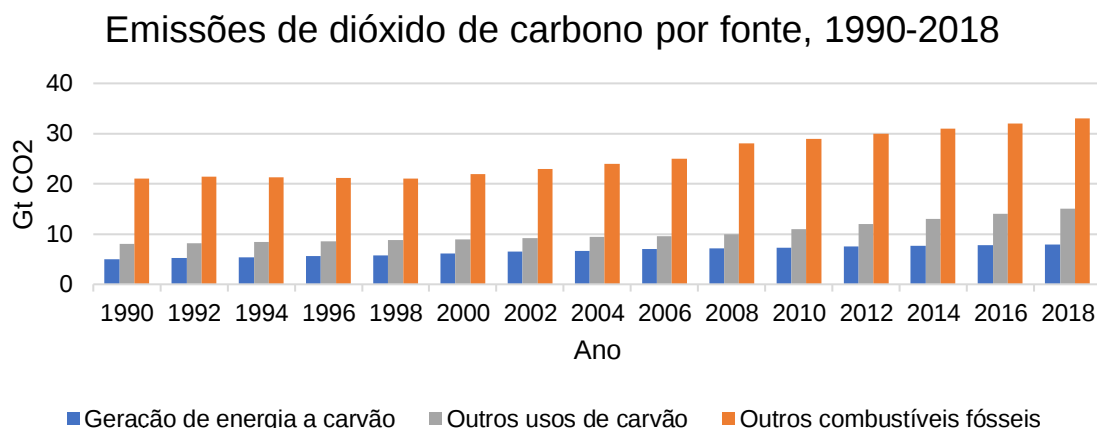


Figura 2 - Variação dos valores de emissão de CO₂ (adaptado de International Energy Agency, 2019).

A energia elétrica define-se como sendo a habilidade de produzir trabalho pelo rearranjo da posição das partículas (European Commission, 2009). Esta pode ser de fonte primária ou secundária, sendo a que que é usada no consumo é secundária visto ser produzida por fontes primárias tais como o carvão, o gás natural, entre outros ("Electricity," 2019).

A procura global de eletricidade aumentou cerca de 4 % em 2018. O maior aumento de produção verificou-se na área das renováveis (International Energy Agency, 2019).

O gás natural forma-se nas camadas profundas da superfície terrestre, sendo proveniente da acumulação de matéria orgânica animal e vegetal degradada e é constituído maioritariamente por metano. É um combustível fóssil, de origem natural e não sofre alterações desde a sua extração até ser consumido ("Natural Gas," 2019) ("Gás natural," 2019).

Este combustível representa cerca de 22 % da energia usada mundialmente, face a outros combustíveis fósseis. A Figura 3 apresenta a variação do consumo de gás natural em diversas zonas do mundo (International Energy Agency, 2019).

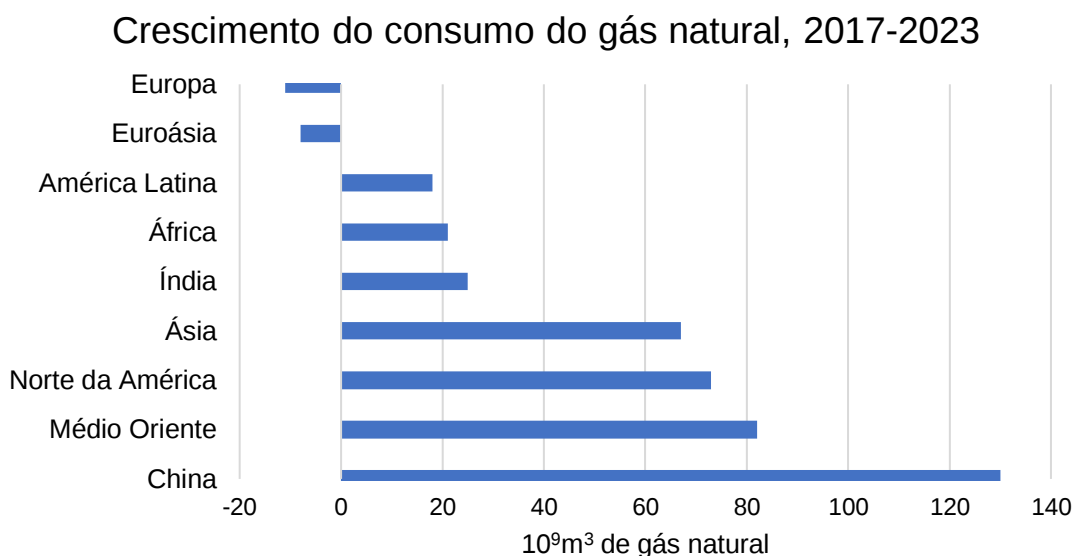


Figura 3 - Consumo do gás natural pelo mundo (adaptado de International Energy Agency, 2019).

Na análise do desempenho energético das áreas de negócio é comumente calcular diferentes parâmetros tendo em conta a legislação existente.

O Despacho n.º 17313/2008 apresenta o fator de conversão do cálculo das emissões de gases com efeito de estufa para a energia elétrica (Pinho, 2016). Enquanto o documento “Anexo técnico às instruções do modelo de PAES” permite o cálculo das emissões para o gás natural (“Pacto de Autarcas,” 2019).

O cálculo dos indicadores de consumo energético, adaptados ao projeto, foram calculados tendo por base o Decreto-Lei n.º 71/2008 (“Decreto-Lei 71/2008,” 2008).

Existem duas linhas responsáveis pela etapa mencionada, a linha 1 e a linha 2, sendo constituídas por lavadoras, secadores e dois fornos. O Capítulo 4 apresenta uma descrição mais detalhada do processo.

O aquecimento do forno realiza-se através do calor proveniente da reação de combustão do gás natural com o oxigénio (O₂), provenientes do gás natural e ar, respetivamente, sendo que o forno de têmpera¹ utiliza queimadores indiretos e o forno de revenido² queimadores diretos. O problema que permitiu o desenvolvimento deste relatório relaciona-se com o calor que não é utilizado para o aquecimento do forno de austenização, ou seja, o calor excedentário.

¹ Responsável por conferir o aumento da resistência e dureza através do aquecimento e arrefecimento rápido dos aços.

² Responsável por aumentar a tenacidade dos aços, pela correção da dureza excessiva.

Este calor é libertado para uma calha de exaustão, sendo usado para o aquecimento de uma das lavadoras, todavia existem perdas nessa calha e nem todo o calor é aproveitado, sendo adequado realizar o seu aproveitamento.

Na resolução deste problema recorreu-se ao simulador processual *Aspen Plus V9*, que permitiu estimar o calor produzido pelos queimadores. O programa *Aspen Exchanger Design and Rating V9* permitiu dimensionar os permutadores possíveis de serem utilizados. Pelas equações de transferência de calor foi possível calcular a temperatura dos tubos de exaustão e assim estimar o calor excedentário.

3. Materiais e Métodos

3.1 Descrição do funcionamento do forno

A PECOL AUTOMOTIVE S.A. apresenta duas linhas de tratamento térmico, a linha 1 - Figura 4 a), e a linha 2 – Figura 4 b). O processo de tratamento térmico é semelhante nas duas linhas, sendo a capacidade de tratamento térmico da linha 2 menor do que a da linha 1 – 1000 kg/h e 2000 kg/h, respetivamente.

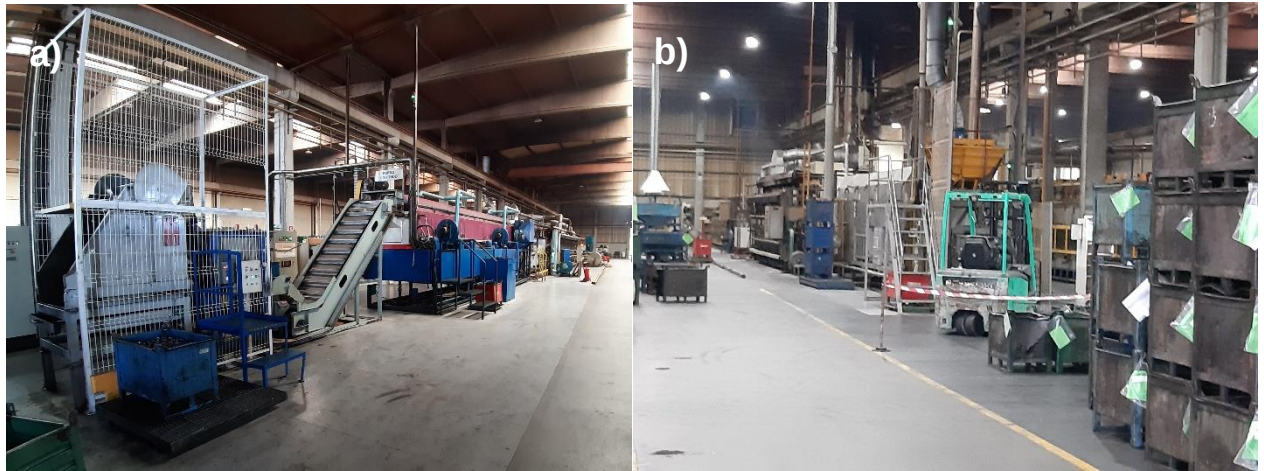


Figura 4 - Linhas de tratamento térmico da PECOL AUTOMOTIVE, a) - Linha 1 e b) - Linha 2.

O processo de tratamento térmico realiza-se em contínuo e consiste numa linha automática, Figura 5.

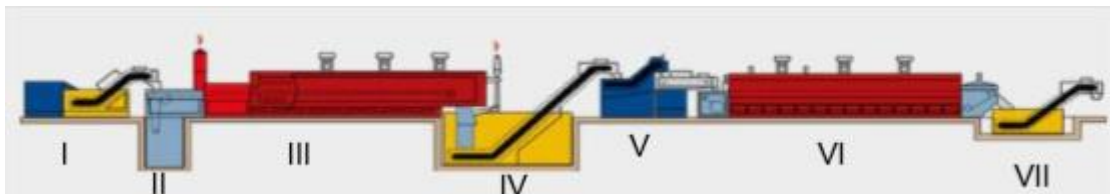


Figura 5 - Etapas do processo de tratamento térmico.

O processo de tratamento térmico encontra-se dividido em sete etapas, sendo elas:

- I. Alimentação;
- II. Lavagem;
- III. Forno de austenização;
- IV. Tanque de óleo de têmpera;
- V. Lavadora – desgordurante;
- VI. Forno de revenido;
- VII. Tanque de óleo de acabamento.

Na primeira etapa, os elementos de fixação por tratar são carregados e, através de movimentos vibratórios por parte do equipamento, depositam-se num tapete de malha – Figura 6. A quantidade de peças, depositada por cada degrau, é controlada por um dispositivo de pesagem, calibrado anualmente e verificado trimestralmente, sendo o máximo permitido de 30 kg para a linha 1 e 10 kg para a linha 2. Contudo, para a melhor uniformização do processo utiliza-se uma gama de massa entre 7 a 10 kg na linha 1 e entre 3 a 4 kg na linha 2, variando conforme o produto a tratar.



Figura 6 - Entrada do tratamento térmico linha 1.

De seguida, o produto deposita-se num tapete contínuo e segue por quatro lavadoras e um secador – Figura 7. Os produtos são lavados e secos por secções através de aspersão.



Figura 7 - Equipamento constituído por lavadoras mais secador.

A temperatura dos tanques da lavadora é 60,0 °C, sendo o controlo realizado por sonda. Os tanques têm capacidades de aproximadamente 3000 L e 2000 L, para a linha 1 e 2, respetivamente.

Os tanques são compostos por diferentes soluções, sendo elas:

- Tanque 1 – Solução aquosa de desengordurante, para retirar a gordura existente no produto;
- Tanque 2 – Solução aquosa de desfosfatante, para remover o fosfato, contribuindo para a preservação do forno e das peças;
- Tanques 3 e 4 – Água para remover os produtos químicos utilizados.

Após este primeiro tratamento, as peças seguem no tapete contínuo para o forno responsável pelo processo de austenização. Este ocorre durante 60 min, em atmosfera controlada, e conforme a composição química da matéria-prima a tratar.

No forno de austenização existem dois dispositivos para controlo da atmosfera e seis dispositivos para controlo da temperatura. O controlo da atmosfera é um parâmetro crítico na fase de austenização, visto que controla a difusão do carbono, o que permite a não descarburização das peças. Para tal, existe um potencial de carbono³

³ É definido como o conteúdo de carbono de uma fina camada de ferro puro em equilíbrio com a atmosfera ("Bodycote," 2019).

associado a cada gama de peças existente, controlado pela mistura de metanol, gás natural, ar e azoto e pela pré-queima do oxigénio na entrada do forno. A atmosfera é tanto mais rica em carbono quanto maior for a percentagem de carbono presente nas peças a tratar.

A temperatura de funcionamento deste forno pode situar-se na gama de [880 – 920] °C, sendo atingida pelo uso de queimadores indiretos e a uniformização é atingida por ventiladores de teto.

A PECOL AUTOMOTIVE S.A. é responsável pelo tratamento térmico de várias matérias-primas. A Tabela 1 relaciona alguns dos tipos de matéria-prima utilizados com a percentagem de carbono e o potencial de carbono associado.

Tabela 1 - Percentagem e potencial de carbono de algumas matérias-primas utilizadas.

Matéria Prima	Percentagem de carbono	Potencial de carbono
<i>25CrMo4</i>		0,10 %C
<i>19MnB4/20MnB4</i>	[0,18 – 0,23] %C	0,30 %C
<i>35B2</i>	± 35 %C	[0,40 – 0,50] %C
<i>Cementação</i>		0,80 %C

No final da etapa III – Forno de austenização (Figura 6) existe queima dos gases utilizados para o controlo da atmosfera numa *flare*.

Os elementos de fixação passam para um tapete de malha que permite a passagem por um tanque de óleo (têmpera) à temperatura de 70,0 °C, provocando um arrefecimento rápido, minimizando o risco de empeno, sendo esta temperatura estabilizada pelo uso de hélices misturadoras e através do uso de energia elétrica (aquecimento) ou pelo uso de um permutador com água da torre de arrefecimento (arrefecimento). Após o arrefecimento em óleo, os elementos de fixação passam por mais um processo de desgorduramento, etapa V – Figura 6, e secagem, sendo transportadas para o forno responsável pelo processo de revenido.

A entrada do produto no forno de revenido realiza-se através de um tapete contínuo. A temperatura de funcionamento pode situar-se na gama de [220 – 660] °C, dependendo das características mecânicas pretendidas para o produto, sendo as mais usuais as gamas de [430 – 440] °C e [460 – 470] °C. O processo tem duração de 100 min. A temperatura imposta é atingida pela queima direta de gás natural, uma vez que

o forno se encontra em depressão (resulta do aquecimento do ar quando em contacto com a superfície do solo, muito aquecida), a temperatura e a concentração são uniformizadas por ventiladores de teto.

No final, o produto já tratado pode ter duas saídas, sendo elas:

- A seco, depósito direto em contentores;
- Oleado, passagem por um óleo, à temperatura de 30,0 °C, e posteriormente depositadas em contentores.

3.2 Aplicações Informáticas

A aplicação informática *Aspen Plus V9* é um simulador processual que permite determinar diversos parâmetros, tais como pureza do produto de saída de torres de destilação, a temperatura e pressão associadas a um determinado processo.

Este simulador permite a simulação de processos completos, uma vez que permite o desenvolvimento de operações específicas (problemas de equilíbrio químico, entre outros) e apresenta uma base de dados bastante completa que permite o conhecimento das características tanto de substâncias puras como de misturas.

A aplicação informática *Aspen Exchanger Design na Rating V9* é um simulador que visa determinar os melhores parâmetros para construção de um permutador de qualquer tipo. Esta aplicação pode ser usada de forma independente ou então ser utilizada de modo interligado com o programa *Aspen Plus*.

4. Resultados e Discussão

4.1 Consumos Energéticos

A PECOL, como anteriormente referido, atua em diversas áreas de negócio sendo a energia elétrica e o gás natural as formas de energia utilizadas. O consumo de energia na PECOL AUTOMOTIVE S.A. e RETSACOAT é monitorizado pelo departamento de Tecnologia e Manutenção, sendo os valores apresentados neste relatório referentes às duas unidades de produção.

4.1.1 Consumos Globais

Os consumos energéticos, assim como os seus custos, foram obtidos através da análise de faturas (Tabela 2).

Tabela 2 - Resumo geral das diferentes formas de energia consumidas pela instalação.

	2016		2017		2018	
Forma de Energia	Consumo (MW·h)	Custo (10 ³ €)	Consumo (MW·h)	Custo (10 ³ €)	Consumo (MW·h)	Custo (10 ³ €)
Energia Elétrica	8789	971	8866	930	9140	963
Gás Natural	13 923	472	16 114	551	18 165	668
Total	22 712	1443	24 980	1481	27 305	1631

Pela análise da Tabela 2 realça-se o aumento do consumo e do custo das duas formas de energia, contudo, em 2017 houve uma ligeira diminuição do custo de energia elétrica devido à alteração de tarifa. O aumento dos consumos de 2016 para 2017 deveu-se à aquisição de novos equipamentos, enquanto que de 2017 para 2018, o motivo principal é o funcionamento do novo forno – *Radcon*.

Na Tabela 3 encontram-se os valores das emissões de gases de efeito de estufa, calculados através das Eq.A1 e Eq.A2.

Tabela 3 - Valor das emissões de gases de efeito de estufa para as diferentes formas de energia nas áreas de negócio.

Forma de Energia	Emissões (tCO ₂ e)		
	2016	2017	2018
Energia Elétrica	4131	4167	4296
Gás Natural	2812	3255	3669
Total	6943	7422	7965

A energia elétrica contribui com uma maior percentagem para as emissões, cerca de 56 %.

Na Tabela 4 é possível verificar a variação existente na matéria-prima processada, das áreas de negócio.

Tabela 4 - Valores da matéria-prima processada.

	2016	2017	2018
Quantidade (t)	9310	10 798	10 345

Nas Figura 8 e Figura 9 apresentam-se, os valores indicados nas Tabela 2 e Tabela 3, correspondendo às duas formas de energia, respetivamente.

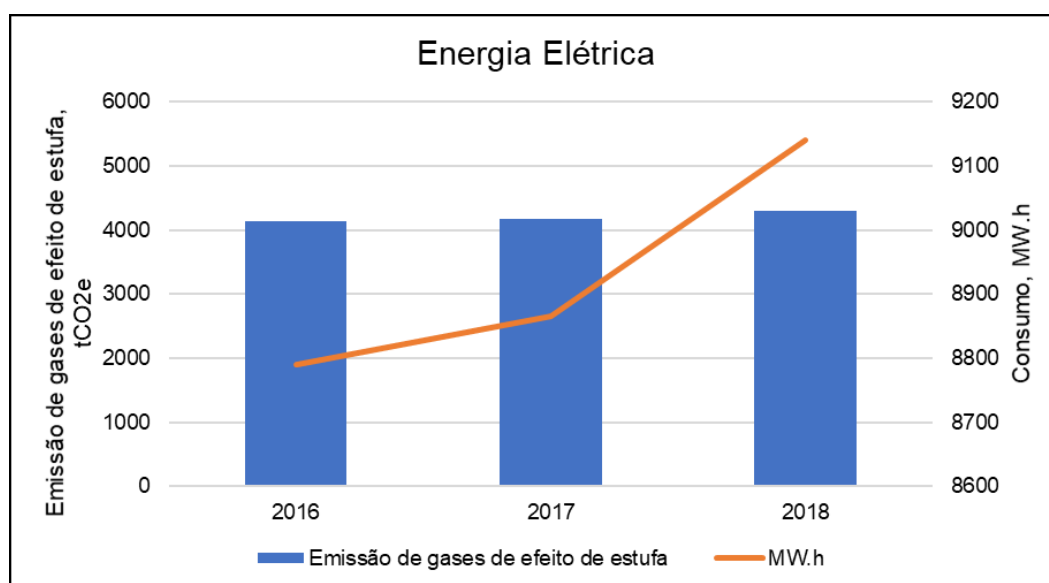


Figura 8 - Relação entre o fator de emissão de gases de efeito de estufa e o consumo para a energia elétrica.

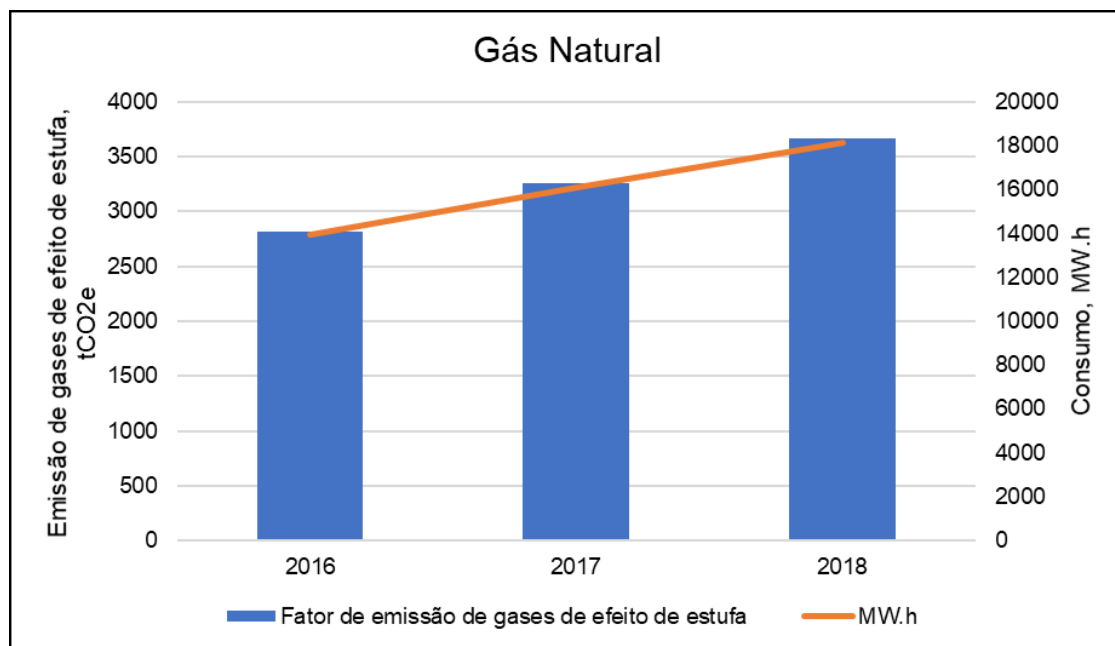


Figura 9 - Relação entre o fator de emissão de gases de efeito de estufa e o consumo para o gás natural.

Constata-se que um aumento constante do consumo provoca um aumento igualmente constante das emissões de gases de efeito de estufa.

Com vista a avaliar o desempenho energético das instalações foram calculados quatro indicadores através das Eq.A3, Eq.A4, Eq.A5 e Eq.A6 respetivamente. Os valores encontram-se na Tabela 5, sendo IC' o indicador de emissões, IE' o indicador de energia, CEE' o indicador de consumo e CT o custo por tonelada.

Tabela 5 - Valores dos diferentes parâmetros avaliados para as formas de energia utilizadas nas áreas de negócio.

	Energia elétrica				Gás natural			
	IC'	IE'	CEE'	CT	IC'	IE'	CEE'	CT
2016	0,182	6,090	0,944	104,3	0,124	9,648	1,496	50,7
2017	0,167	5,987	0,821	86,1	0,130	10,882	1,492	51,0
2018	0,157	5,603	0,884	93,1	0,134	11,135	1,756	64,6

Nota: As unidades de IC', IE', CEE' e CT são, respetivamente $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}}.(\text{kW h})^{-1}$, $\text{kW h } \text{€}^{-1}$, $\text{MW h } \text{t}^{-1}$ e € t^{-1} .

Pela análise da Tabela 5 é possível verificar o aumento do parâmetro IC' e IE' para a energia elétrica, enquanto que para o gás natural houve uma diminuição destes parâmetros.

O indicador CEE' representa o “rendimento” energético da empresa e relaciona-se com o parâmetro CT, ou seja, maior CEE' maior o valor de CT. Para a energia elétrica, o ano com melhor desempenho foi o de 2017, enquanto que para o gás natural, os melhores anos foram 2016 e 2017, que se justifica pela variação de matéria-prima processada – Tabela 4. O valor mais elevado de 2018 representa uma perda de eficiência no uso do gás natural pelas unidades produtivas.

4.1.2 Linhas de tratamento térmico

Devido ao tema do projeto ser relacionado com os fornos das linhas de tratamento térmico realizou-se um estudo detalhado dos consumos nos mesmos. Os valores do consumo de gás natural foram calculados para os processos de austenização e de revenido, enquanto que para a energia elétrica foi considerado como um processo global.

Na linha 1, os valores de consumo de gás natural para os anos de 2016 e 2017 foram estimados tendo por base os valores de leituras para o ano de 2018. O consumo de energia elétrica foi estimado tendo por base o valor para o ano de 2019.

Na Tabela 6 apresentam-se os valores de consumo, o custo e as emissões de gases de efeito de estufa pelos fornos da linha 1, para o gás natural

Tabela 6 - Resumo geral do consumo, do custo e das emissões de gases de efeito de estufa do gás natural pelos fornos da linha 1.

	2016		2017		2018	
	Austenização	Revenido	Austenização	Revenido	Austenização	Revenido
Consumo _{G.N.} (MW·h)	4259	1215	4298	1226	4711	1361
Custo _{G.N.} (10 ³ €)	144 322	41 157	146 856	41 879	173 467	50 146
Emissões _{G.N.} (tCO _{2e})	860	245	868	248	952	275

Na Tabela 7 apresenta-se a quantidade de produto processado na linha 1 nos anos de 2016 a 2018.

Tabela 7 - Quantidade de matéria-prima processada na linha 1.

	2016	2017	2018
Quantidade (t)	4701	4743	5263

Verifica-se um aumento do consumo de gás natural, justificado pelo aumento de matéria-prima processada ao longo do tempo, e pela temperatura dos fornos à qual é submetida a matéria-prima e consequentemente os custos associados.

Os valores das emissões de gases de efeito de estufa para o ano de 2016 e 2017 são semelhantes visto serem calculados tendo por base o valor de 2018, contudo existe um aumento de 2017 para 2018 face ao aumento do consumo da forma de energia em estudo.

Na linha 2, os valores de consumo de gás natural para os anos de 2016, 2017 e 2018 foram estimados com base em valores recolhidos pela empresa em diversas ocasiões do período de referência em estudo.

A Tabela 8 apresenta os valores⁴ do consumo, o custo e as emissões de gases de efeito de estufa do gás natural pelos fornos da linha 2.

⁴ No ano de 2016 e 2017 só foi considerado o processo de austenização, visto não existir quantômetro no processo de revenido.

Tabela 8 - Resumo do consumo, do custo e do fator emissão de gases de efeito de estufa para o gás natural pelos fornos da linha 2.

	2016	2017	2018	
	Austenização	Austenização	Austenização	Revenido
Consumo _{G.N.} (MW·h)	1023	1690	2552	469
Custo _{G.N.} (10 ³ €)	34	58	94	16
Emissões _{G.N.} (tCO _{2e})	207	341	515	85

A Tabela 9 apresenta os valores do produto processado na linha 2.

Tabela 9 - Quantidade de produto processado na linha 2.

	2016	2017	2018
Quantidade (t)	1820	2350	2275

A análise da Tabela 8 mostra que o consumo e as emissões de gases de efeito de estufa do gás natural tem vindo a aumentar, em consequência do aumento de produto tratado e da temperatura do processamento. O custo do gás natural tem vindo a aumentar para o processo de austenização, esperando-se o mesmo comportamento para o processo de revenido.

4.1.2.1 Análise global das duas linhas

A linha 1, como atrás referido, apresenta maior taxa de tratamento face à linha 2, por isso o gás natural consumido, será maior e consequentemente o custo. É possível verificar-se, através da análise das Tabela 6 e Tabela 9, que entre os dois processos, o de austenização consome mais gás natural que o de revenido, em ambos os fornos.

A percentagem de gás natural consumido pelos dois fornos representa cerca de 50,0 % do consumido pelas áreas de negócio, em que 33,4 % representa a linha 0650 (25,9 % - austenização e 7,5 % - revenido) e os restantes 16,6 % a linha 0615 (14,0 % - austenização e 2,6 % - revenido).

Com os valores da Tabela 6, Tabela 7, Tabela 8, Tabela 9 foi possível calcular os parâmetros IC', IE' e CEE' referentes ao gás natural, que se encontram na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores para os diferentes parâmetros para o gás natural da linha 1 e da linha 2.

	2016						2017						2018					
	Austenização			Revenido			Austenização			Revenido			Austenização			Revenido		
	IC'	IE'	CEE'	IC'	IE'	CEE'	IC'	IE'	CEE'	IC'	IE'	CEE'	IC'	IE'	CEE'	IC'	IE'	CEE'
Linha 1	127,46	16,31	0,906	36,35	4,65	0,258	114,35	15,02	0,906	32,61	4,28	0,258	100,17	12,52	0,895	28,93	3,62	0,259
Linha 2	30,60	3,92	0,562	-	-	-	44,98	5,91	0,719	-	-	-	54,26	6,78	1,122	8,96	1,25	0,206

Nota: As unidades de IC', IE' e CEE' são, respetivamente $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{e}} (\text{kW h})^{-1}$, $\text{kW h } \text{€}^{-1}$ e MW h t^{-1} .

Pela análise da Tabela 10 verifica-se que o parâmetro IC' e o parâmetro IE', na linha 1, tem diminuído face ao aumento consumo global e do custo do gás natural, contudo, na linha 2, esta tendência não se verifica, uma vez que a emissão de gases de efeito de estufa e o consumo aumentaram consideravelmente.

O valor de CEE' para os anos de 2016 e 2017, na linha 1, são iguais, visto terem sido calculados com a mesma base de cálculo, para o ano de 2018 existe uma diminuição no processo de austenização e um ligeiro aumento no processo de revenido. Na linha 2 existe um aumento do ano de 2017 para 2018 face à diminuição de produto processado.

As variações dos valores nas duas linhas além dos motivos apresentados anteriormente também são justificados pela quantidade de produto processado nas duas linhas, sendo o produto processado da linha 1 maior do que o da linha 2. E também pela estabilização do processo, ou seja a linha 1 trabalha em contínuo, enquanto a linha 2 só entra em funcionamento para recozimento do produto ou quando a quantidade de produto para processamento é elevado.

4.2 Análise do calor excedentário

O forno de austenização da linha 1 possui trinta e sete queimadores indiretos que, através do calor de reação da combustão do gás natural com o oxigénio, proveniente do ar, vão fornecer calor ao forno para que ele atinja a temperatura de 880 °C.

Nas secções seguintes considerou-se o gás natural como metano (CH_4), uma vez que é o componente maioritário.

4.2.1 Cálculo dos caudais de admissão dos queimadores

Como atrás referido, o forno de austenização da linha 1 possui trinta e sete queimadores que funcionam a metano. Contudo, os caudais de admissão dos dois reagentes não eram conhecidos e como tal foi necessário, através de balanços, descobrir o seu valor. Na Figura 10 apresenta-se o esquema da tubagem dos dois reagentes, sendo a amarelo o do metano e a azul o do ar. O elemento assinalado por IP representa um indicador de pressão, enquanto que o IV representa um indicador de volume.

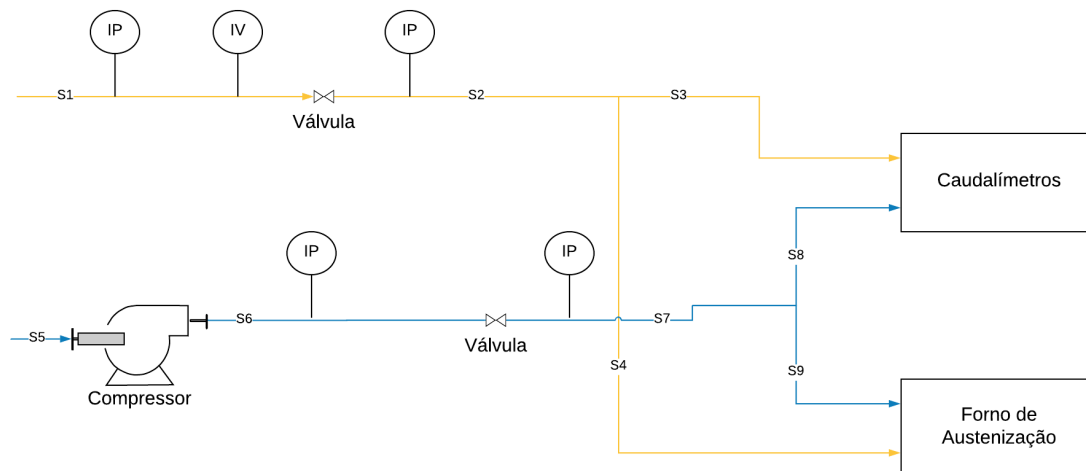


Figura 10 – Esquema da tubagem dos reagentes para a linha 1.

O metano é fornecido pela rede e passa por um indicador de pressão e por um indicador de volume (quantômetro) que permite controlar o volume de metano gasto para o forno de austenização e para os caudalímetros. Este por sua vez passa por uma válvula para diminuição da pressão. Para o ar existe um compressor que aproveita o ar envolvente. Na Tabela 11 são apresentadas as condições usadas no projeto.

Tabela 11 - Condições do metano e do ar, aplicadas ao projeto.

	Metano	Ar
T (°C)	31,4	20,0
P (kPa)	130,0	101,3
ρ (kg·m ⁻³)	0,824	1,199
V (m ³ ·h ⁻¹)	110,4	1558,7
MM (kg·kmol ⁻¹)	16,0	28,9

O caudal de metano, em m³ h⁻¹ foi calculado tendo por base o medidor de volume instalado na tubagem, no qual foram retirados os valores dia a dia e depois convertidos para hora e depois convertidos para caudal molar, o valor do caudal de oxigénio foi calculado tendo por base a estequiometria de reação de combustão e um excesso de ar de 20 %, Apêndice B.1. Na Tabela 12 apresentam-se os valores dos caudais mássicos totais dos dois reagentes, sendo estes obtidos através da aplicação informática *Aspen Plus V9*.

Tabela 12 - Caudais mássicos totais dos dois reagentes.

	Metano	Ar
$\dot{m}$ (kg·h ⁻¹)	91,0	1870,0

A Tabela 13 apresenta os valores de $\dot{V}_C$ no caudalímetro, conforme a percentagem de carbono a que o forno se encontra.

Tabela 13 - Valores das condições e dos caudais dos caudalímetros.

	T (°C)	P (kPa)	% C	$\dot{V}_C$ (m ³ .h ⁻¹)
Metano	20	101	0,10	1,1
			0,30	1,2
			0,40	1,1
			0,80	1,5
Ar	20	1000	0,10	0,38
			0,30	0,35
			0,40	0,40
			0,80	0,45

Na Tabela 14 é possível observar o valor do caudal mássico que irá para o forno de austenização.

Tabela 14 - Valores dos caudais de admissão do forno de austenização.

%C	Metano (kg.h ⁻¹)	Ar (kg.h ⁻¹)
% 0,10	88,0	1860,5
% 0,30	87,8	1861,2
% 0,40	87,9	1860,0
% 0,80	87,0	1858,9

Na Tabela 15 apresenta-se um resumo das condições das correntes da Figura 10.

Tabela 15 - Resumo das correntes da Figura 10.

	%C	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
T (°C)		31,4				20,0	31,6			
P (kPa)		130,0	80,0			101,3	111,8	80,0		
$\dot{m}$ (kg·h ⁻¹)		91,0		-	-	1870,0			-	-
$\dot{m}_c$ (kg·h ⁻¹)	0,10	-	-	2,9	-	-	-	-	9,0	-
$\dot{m}_Q$ (kg·h ⁻¹)		-	-	-	88,0	-	-	-	-	1860,5
$\dot{m}_c$ (kg·h ⁻¹)	0,30	-	-	3,2	-	-	-	-	8,3	-
$\dot{m}_Q$ (kg·h ⁻¹)		-	-	-	87,8	-	-	-	-	1861,2
$\dot{m}_c$ (kg·h ⁻¹)	0,40	-	-	3,0	-	-	-	-	9,5	-
$\dot{m}_Q$ (kg·h ⁻¹)		-	-	-	87,9	-	-	-	-	1860,0
$\dot{m}_c$ (kg·h ⁻¹)	0,80	-	-	4,0	-	-	-	-	10,7	-
$\dot{m}_Q$ (kg·h ⁻¹)		-	-	-	87,0	-	-	-	-	1858,9

Contudo o valor de $\dot{m}_Q$ não é igual para cada queimador indireto, uma vez que estes estão divididos por zonas, desde o início do forno de austenização até ao final do mesmo. Sendo que a zona 1 é composta por 10 queimadores, a zona 2 por 9 queimadores, a zona 3 por 7 queimadores, a zona 4 por 4 queimadores, a zona 5 por 3 queimadores e a zona 6 por 4 queimadores.

A tubagem do metano divide-se em duas ramificações, em que a ramificação superior irá alimentar 20 queimadores e a inferior 17 queimadores. A tubagem do ar também se divide em quatro ramificações, duas superiores e duas inferiores, as duas superiores vão fornecer ar a 20 queimadores (10 queimadores por ramificação) e as duas inferiores 17 queimadores, 9 e 8 queimadores por ramificação, respetivamente.

4.2.2 Cálculo da temperatura dos gases de exaustão nos tubos

À saída dos queimadores existem tubos de exaustão de aço, Figura 11, o qual se encontra revestido por lã de rocha e alumínio. O esquema destes tubos é apresentado na Figura 12.



Figura 11 - Tubos de exaustão.

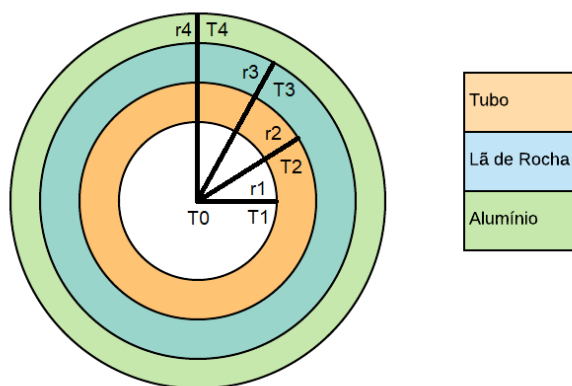


Figura 12 - Esquema dos tubos.

As dimensões dos tubos (raio, espessura e altura), encontram-se na Tabela 16.

Tabela 16 - Dimensão dos tubos.

DIMENSÕES	r_1 (mm)	48,22				
	r_2 (mm)	54,18	Δx_2 (mm)	5,96		
	r_3 (mm)	60,48	Δx_3 (mm)	6,30	h_1 (cm)	170
	r_4 (mm)	64,06	Δx_4 (mm)	3,58	h_2 (cm)	105

As temperaturas T_2 e T_4 foram obtidas através do uso de uma câmara termográfica sendo estas apresentadas nas Tabela B.1, Tabela B.3, Tabela B.5, Tabela B.7, Tabela B.9 e Tabela B.11 do Apêndice B.2.

Na Tabela 17 apresentam-se os valores do coeficiente de transferência de calor, da condutividade térmica, das resistências, através das Eq.B2, Eq.B4, Eq.B5, Eq.B6, e das áreas, Eq.B3 (Cengel, 2008) ("Thermal Conductivity," 2019) ("Morgan Thermal Ceramics," 2019).

Tabela 17 - Valores do coeficiente de transferência de calor, da condutividade térmica, das resistências e das áreas.

RESISTÊNCIAS	Convecção	$h_{conv.} (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	13,5
		$A_1 (m^2)$	0,515
		$A_2 (m^2)$	0,318
		$R_1 (K \cdot W^{-1})$	0,144
		$R_2 (K \cdot W^{-1})$	0,233
	Tubo	$k_{tubo} (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	15
		$R_1 (K \cdot W^{-1})$	$7,27 \times 10^{-4}$
		$R_2 (K \cdot W^{-1})$	$1,18 \times 10^{-3}$
	Isolante	$k_{isol.} (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	0,12
		$R_1 (K \cdot W^{-1})$	$8,58 \times 10^{-2}$
		$R_2 (K \cdot W^{-1})$	0,139
	Alumínio	$k_{alum.} (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	205
		$R_1 (K \cdot W^{-1})$	$2,63 \times 10^{-5}$
		$R_2 (K \cdot W^{-1})$	$4,25 \times 10^{-5}$

Para determinar o calor perdido foi utilizada a Eq.B7, Apêndice B.2, que relaciona a temperatura em dois pontos, T_2 e T_4 , com o somatório das resistências entre esses dois pontos. A Tabela 18 apresenta a potência térmica média perdida por zona, obtida pelas Tabela B.2, Tabela B.4, Tabela B.6, Tabela B.8, Tabela B.10, Tabela B.12 (Apêndice B.2).

Tabela 18 - Potência térmica perdida por zona.

Zona	Q (W)
1	749,7
2	834,5
3	584,9
4	609,4
5	693,9
6	569,4

Como é possível concluir pela análise da Tabela 18, o valor da potência térmica é diferente de zona para zona, o que se deve ao número de queimadores que se encontram acoplados em cada zona.

Com o valor da potência térmica perdida foi possível calcular a temperatura nos diferentes pontos representados na Figura 12, sendo o mais importante o ponto T_0 que corresponde à temperatura de exaustão dos gases que podem ser aproveitados para permutar com outras correntes (Tabela 19).

Tabela 19 - Temperaturas para as diferentes zonas.

Zona	T_0 (°C)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)
1	286,9	156,3	155,6	77,7	77,7
2	276,6	127,4	126,6	67,9	67,9
3	235,3	129,6	129,0	66,0	66,0
4	248,4	132,1	131,5	62,0	62,0
5	284,1	150,4	149,7	69,9	69,9
6	227,2	130,4	129,8	71,9	71,9

4.2.3 Cálculo da potência do forno

A transferência de calor realiza-se de uma fonte quente para uma fonte fria, ou seja, os queimadores indiretos encontrar-se-ão a uma temperatura superior à de funcionamento do forno, logo maior que 880 °C. Contudo esta temperatura não é conhecida, por isso assumiu-se a temperatura de 900 °C como a temperatura mínima de saída dos gases de combustão após troca de calor com o forno.

Assumindo esta temperatura de funcionamento era previsível que os gases de exaustão fossem libertados a uma temperatura próxima dessa, todavia pela análise da Tabela 19 é possível afirmar que tal não ocorre. Este facto é justificado pelo funcionamento dos queimadores, possuindo estes um mecanismo de aproveitamento do calor que permite o aquecimento das correntes de entrada de gás natural e ar.

Este processo foi simulado na aplicação informática *Aspen Plus V9*, na Figura 13 apresenta-se o diagrama de simulação⁵.

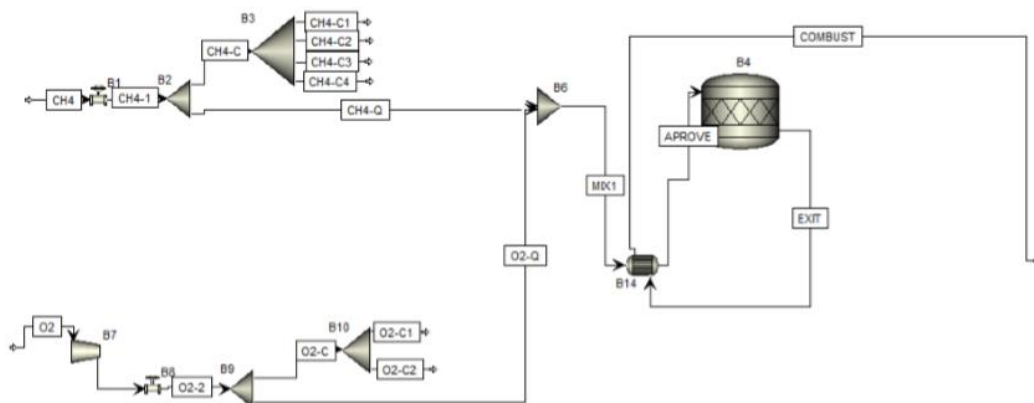


Figura 13 – Diagrama de simulação do processo de combustão.

O modelo do sistema de combustão corresponde a um (modelo *RStoic*). Na Figura 14 apresentam-se as condições de saída dos gases de combustão.

Operating conditions	
Flash Type	Temperature Pressure
Temperature	900 C
Pressure	1 atm
Duty	0 kW
Vapor fraction	

Figura 14 - Condições de operação do sistema de combustão.

⁵ Para simplificação de cálculos foi utilizado o valor médio das correntes S4 e S9 da Tabela 18.

Assim, foi possível obter a potência do forno através dos resultados fornecidos pela aplicação informática. O resultado obtido foi 1,1 MW, como se pode observar na Figura 15, que corresponde à potência térmica indicada no modelo *RStoic*.

Outlet temperature	900	C
Outlet pressure	1	atm
Heat duty	-1,08027	MW
Net heat duty	-1,08027	MW
Vapor fraction	1	
1st liquid / Total liquid		

Figura 15 - Resultados do modelo.

4.2.4 Dimensionamento de permutadores

Na Figura 13, no permutador, é possível observar uma corrente sem ligação a um equipamento (COMBUST), essa corrente corresponde aos gases de exaustão que irão ser aproveitados para permutar com outras correntes. Na Tabela 20 são apresentadas as condições dessa corrente.

Tabela 20 - Condições da corrente de gases de exaustão.

T (°C)	259,7
P (kPa)	101,3
$\dot{m}_{\text{combust.}}$ (kg·h ⁻¹)	1948

De seguida enumeram-se três cenários possíveis para a utilização do calor destes gases:

→ Cenário I – Aproveitamento para aquecimento do ar de secagem

Como referido no Capítulo 3, o produto é seco num secador após a passagem pelos tanques da lavadora. As condições do ar utilizado neste processo são apresentadas na Tabela 21.

Tabela 21 - Condições de entrada do ar de secagem.

$T_{\text{entrada}} (^{\circ}\text{C})$	20,0
$P \text{ (kPa)}$	101,3
$\dot{V}_{\text{ar}} \text{ (m}^3\cdot\text{h}^{-1}\text{)}$	620

A temperatura de funcionamento do secador é de 180,0 °C, sendo que para o dimensionamento do permutador, considerou-se a temperatura do ar de secagem 10,0 °C acima, isto é 190,0 °C, como margem de segurança. Na Figura 16 é possível observar o diagrama da simulação para o presente cenário.

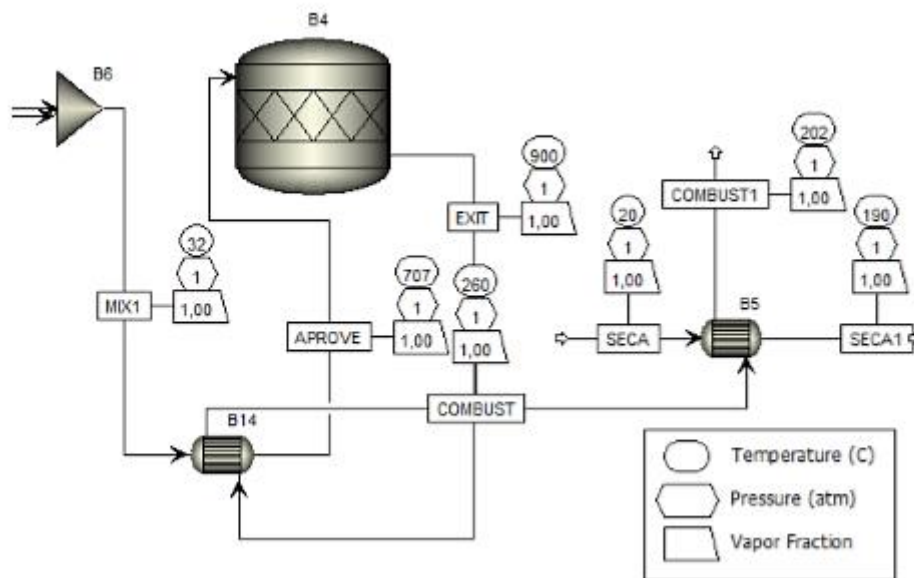


Figura 16 – Diagrama da simulação para o Cenário I.

Como é possível concluir esta é uma opção viável do ponto de vista técnico, uma vez que é atingida a temperatura pretendida na corrente de saída do ar de secagem.

Na Tabela 22 apresentam-se as características principais e no Apêndice B.3 apresenta-se a folha de especificação do permutador, sendo o custo obtido pela aplicação informática *Aspen Exchanger Design na Rating V9*.

Tabela 22 - Principais características do permutador do Cenário I.

Área (m ²)	10,1
P _{térmica} (kW)	35,8
Custo (€)	14 489

O período de retorno deste investimento seria de 0,55 anos (Apêndice B.3).

A poupança, de consumo e custo, de energia elétrica com a instalação deste permutador será de 3,1 %. Correspondendo a uma redução de 133,2 t_{CO2e}.

→ Cenário II – Aproveitamento para aquecimento de uma malha fechada de água

Outro dos cenários que pode ser considerado é a utilização dos gases de combustão para aquecimento de um circuito de água em malha fechada para possível utilização em diversas zonas.

As temperaturas de entrada e saída de água foram de 75,0 °C e 95,0 °C, respetivamente.

Considerando que os gases de combustão são enviados para a chaminé a 110,0 °C o circuito terá um caudal mássico de 3 930 kg·h⁻¹.

O diagrama da simulação usado é apresentado na Figura 17.

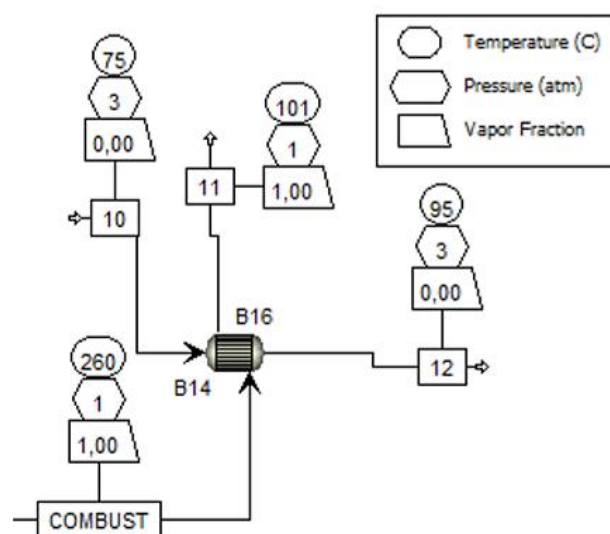


Figura 17 – Diagrama da simulação para o Cenário II.

Como é possível observar pela Figura 17 esta é uma opção viável visto ser atingida a temperatura pretendida.

Na Tabela 23 são apresentadas as características principais e no Apêndice B.3 apresenta-se a folha de especificação do permutador, sendo o custo obtido pela aplicação informática *Aspen Exchanger Design na Rating V9*.

Tabela 23 - Principais características do permutador do Cenário II.

Área (m²)	29,9
P _{térmica} (kW)	97,0
Custo (€)	20 636

→ **Cenário III – Aproveitamento para aquecimento do ar de secagem e água dos tanques da lavadora**

Outro dos cenários possíveis é o aquecimento do ar de secagem e posterior aquecimento dos fluídos dos tanques da lavadora.

A determinação do caudal de água necessário foi realizado da mesma forma que se efetuou para o Cenário II e nas mesmas condições, obtendo-se um total de 2 395 kg.h⁻¹.

Na Figura 18 é possível observar o diagrama da simulação utilizada.

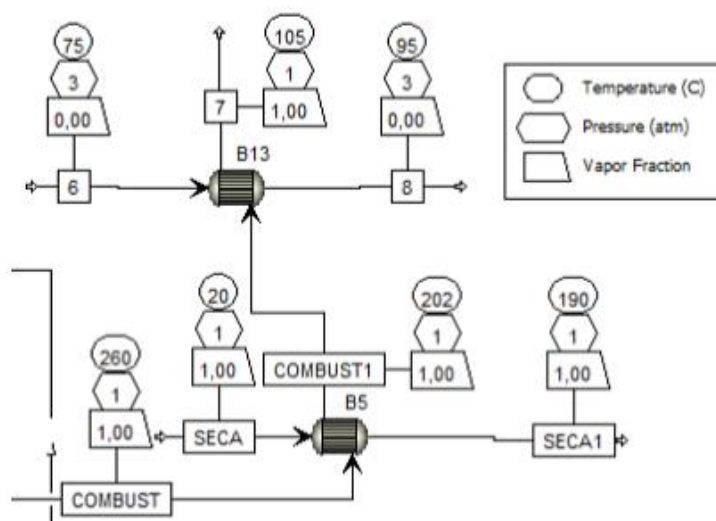


Figura 18 - Diagrama da simulação para o Cenário III.

Como é possível observar pela Figura 18 esta é uma opção viável visto ser atingida a temperatura pretendida de ambas as correntes.

Na Tabela 24 são apresentadas as características principais do *HeatX* B13, na Tabela 22 encontram-se as características do *HeatX* B5, e no Apêndice B.3 é apresentado a folha de especificação do permutador correspondente ao *HeatX* B13 em estudo, sendo o custo obtido pela aplicação informática *Aspen Exchanger Design na Rating V9*.

Tabela 24 - Principais características do permutador do Cenário III.

Área (m ²)	9,3
P _{térmica} (kW)	59,1
Custo (€)	14 333

5. Conclusões

A necessidade da empresa aumentar a eficiência energética induz um estudo dos seus parâmetros energéticos para avaliar quais as áreas de análise e apresentar soluções para essas áreas. Uma das soluções foi o aproveitamento do calor de um dos fornos de tratamento térmico através do uso de permutadores.

Foi realizada uma avaliação intensiva dos consumos de gás natural e de energia elétrica da PECOL AUTOMOTIVE e da RETSACOAT, tendo sido, posteriormente, realizada essa avaliação para as linhas de tratamento térmico. Foram ainda calculados os parâmetros energéticos adaptados da legislação.

Pela análise realizada é possível afirmar que o gás natural é o que apresenta maior consumo, sendo o forno de austenização da linha 1 o principal consumidor desta forma de energia. Nos parâmetros energéticos o melhor ano para o CT é o de 2017 para a energia elétrica e o ano de 2016 para o gás natural.

Para o aproveitamento do calor excedentário foi obtida uma temperatura de 259,7 °C para os gases de combustão, tendo sido realizados três cenários (Cenário I – Aquecimento do ar de secagem, Cenário II – Aquecimento de uma malha fechada de água e Cenário III – Aquecimento do ar de secagem e de uma malha fechada de água), tendo-se obtido uma potência de térmica de 35,8 kW, 97,0 kW e 94,9 kW, respetivamente. Os cenários são viáveis a nível técnico visto serem atingidas as temperaturas e condições pretendidas. O Cenário I apresenta um período de retorno de meio ano, uma poupança do consumo e custo de energia elétrica de 3,1 % e uma redução anual de emissões de 133,2 t_{CO2e}.

6. Avaliação do trabalho realizado

6.1 Objetivos Realizados

Os objetivos para este relatório eram o estudo intensivo dos consumos de gás natural e energia elétrica e o aproveitamento do calor excedentário dos forno. Relativamente ao estudo intensivo todos os pontos foram realizados, contudo ao aproveitamento do calor excedentário só foi realizado para o forno de austenização da linha 1, visto ser a linha que trabalha durante mais tempo e na qual o aproveitamento seria melhor.

6.2 Outros Trabalhos Realizados

Além dos objetivos propostos também foram realizados, fora do trabalho principal, alguns ensaios de laboratório nomeadamente:

- Resistência à tração;
- Torque;
- Análises químicas;

6.3 Apreciação Final

O trabalho realizado permitiu consolidar conhecimentos na base da energia, sendo uma área de interesse pessoal.

Foram atingidos os objetivos propostos, à exceção do aproveitamento do calor do forno de austenização da linha 2.

Para trabalhos futuros sugere-se o estudo do aproveitamento atrás mencionado, o estudo do forno de revenido e oportunidades de melhoria nos permutadores já existentes.

7. Referências

- Bodycote, 2019.
<https://www.bodycote.com/technical-glossary/carbon-potential/>
(acedido em 05-06-2019).
- Cengel, Y., 2008. Heat Transfer: A Practical Approach, 2nd ed.
- Decreto-Lei 71/2008, 2008.
"https://data.dre.pt/eli/dec-lei/71/2008/04/15/p/dre/pt/html".
- Electricity, 2019.
https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=electricity_home
(acedido em 06-06-2019).
- European Commission, 2009.
http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/ENE_Adopted_02-2009.pdf
(acedido em 08-06-2019).
- Gás natural, 2019.
<https://galpgasnaturaldistribuicao.pt/gas-natural/o-que-e>
(acedido em 06-06-2019).
- International Energy Agency, 2019.
<https://www.iea.org/geco/>
(acedido em 06-06-2019).
- Morgan Thermal Ceramics, 2019.
http://www.morganthermalceramics.com/media/5454/morgan-advanced-materials_thermal-ceramics-product-data-book-e-version_2.pdf
(acedido em 06-06-2019).
- Natural Gas, 2019.
https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=natural_gas_home
(acedido em 06-06-2019).

- Pacto de Autarcas, 2019.
<https://www.pactodeautarcas.eu/pt/>
(acedido em 08-06-2019).
- PECOL, 2019.
<https://www.pecol.pt/>
(acedido em 05-06-2019).
- Pinho, C., 2016. ENERGIA TÉRMICA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.
- Thermal Conductivity, 2019.
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Tables/thrcn.html>
(acedido em 26-06-2019).
- U.S. Energy Information Administration, 2019.
<https://www.eia.gov/energyexplained/index.php>
(acedido em 06-06-2019).

Apêndice A - Consumos Energéticos

Apêndice A.1 - Cálculo das emissões das duas formas de energia

Conforme escrito no Capítulo 3, existe uma equação para o cálculo das emissões para a energia elétrica, Eq.A1, e para o gás natural, Eq.A2.

$$Emissões_{E.E.} = 0,47 \times C_{E.E.} \quad \text{Eq.A1}$$

em que $C_{E.E.}$ é o consumo de energia elétrica, no ano em estudo.

$$Emissões_{G.N.} = 0,202 \times C_{G.N.} \quad \text{Eq.A2}$$

em que $C_{G.N.}$ é o consumo de gás natural, no ano em estudo.

Para o exemplo de cálculo aqui apresentado foi utilizado o ano de referência de 2016.

$$Emissões_{E.E.} = 0,47 \times C_{E.E.} = 0,47 \times 8\,789 = 4\,131 \, t_{CO2e}$$

$$Emissões_{G.N.} = 0,202 \times 13\,923 = 2\,812 \, t_{CO2e}$$

Apêndice A.2 - Cálculo dos parâmetros de eficiência energética

A Eq.A3, a Eq.A4, a Eq.A5 e a Eq.A6 permitem calcular os indicadores, adaptados ao projeto.

$$IC' = \frac{Emissões}{\sum C} \quad \text{Eq.A3}$$

em que IC' representa $Emissões$, representa as emissões de gases de efeito de estufa, para a forma de energia em estudo, e $\sum C$ o somatório do consumo das duas formas de energia, para o ano em estudo.

$$IE' = \frac{C}{\sum Custo} \quad \text{Eq.A4}$$

em que C representa o consumo, para a forma de energia em estudo, e $\Sigma Custo$ o somatório do custo das duas formas de energia, para o ano em estudo.

$$CEE' = \frac{C \times 10^{-3}}{Prod.} \quad \text{Eq.A5}$$

em que $Prod.$ representa o produto processado.

O custo por tonelada é definido como

$$CT = \frac{Custo}{Prod.} \quad \text{Eq.A6}$$

em que CT representa o custo por tonelada

Para o exemplo de cálculo aqui apresentado foi utilizado o ano de referência de 2016, para a energia elétrica.

$$IC' = \frac{Emissões}{\Sigma C} = \frac{4\,131}{22\,712} = 0,182 \, t_{CO_2e} \cdot (MW \cdot h)^{-1}$$

$$IE' = \frac{C}{\Sigma Custo} = \frac{8\,789}{1\,443} = 6,090 \, MW \cdot h \cdot (10^3 \text{€})^{-1}$$

$$CEE' = \frac{C}{Prod.} = \frac{8\,789}{9\,310} = 0,944 \, MW \cdot h \cdot t^{-1}$$

$$CT = \frac{Custo}{Prod.} = \frac{971 \times 10^3}{9\,310} = 104,3 \, \text{€} \cdot t^{-1}$$

Apêndice B - Análise do calor excedentário

Apêndice B.1 - Cálculo dos caudais de admissão dos queimadores

O cálculo de $\dot{m}$ foi realizada através da equação dos gases ideais ajustada, Eq.B1.

$$P \times V = F \times R \times T \quad \text{Eq.B1}$$

em que P é a pressão, V o caudal volumétrico, F o caudal molar, R a constante dos gases ideais e T a temperatura.

Através da Eq.B1 é possível calcular o F_{CH_4} .

$$P \times V = F_{CH_4} \times R \times T = 1,3 \times 10^5 \times 110,4 = F_{CH_4} \times 8,314462 \times 304,55$$

$$F_{CH_4} = 5\,667,9 \text{ mol} \cdot h^{-1} = 5,668 \text{ kmol} \cdot h^{-1}$$

O cálculo do caudal de ar, F_{O_2} , foi calculado tendo por base a estequiometria da reação de combustão, sendo esta $CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2O$.

$$F_{O_2} = F_{CH_4} \times 2 = 5,668 \times 2 = 11,336 \text{ kmol} \cdot h^{-1}$$

Contudo este valor só considera o caudal de O_2 , sendo necessário adicionar o valor do caudal de N_2 , sendo uma reação de combustão completa é necessário utilizar um excesso de ar, normalmente de 20 %.

$$F_{ar} = F_{O_2} + F_{N_2} = (11,336 + 11,336 \times \frac{0,79}{0,21}) \times 1,2 = 64,777 \text{ kmol} \cdot h^{-1}$$

O caudal de admissão dos queimadores, F_Q , é calculado pela subtração do caudal total com o caudal dos caudalímetros.

No exemplo apresentado é utilizado o potencial de carbono 0,10 % C.

$$F_{QCH_4} = F_{CH_4} - F_{CCH_4} = 5,668 - 0,183 = 5,485 \text{ kmol} \cdot h^{-1}$$

Apêndice B.2 - Cálculo da temperatura dos gases de exaustão nos tubos

As resistências dos diferentes materiais foram calculadas pelo uso das equações, Eq.B2, Eq.B3, Eq.B4, Eq.B5 e Eq.B6.

$$R_{conv.} = \frac{1}{h_{conv.} \times A} \quad \text{Eq.B2}$$

em que $R_{conv.}$ representa a resistência de convecção, $h_{conv.}$ o coeficiente de transferência de calor para a convecção e A a área do tubo.

$$A = 2 \times \pi \times r_1 \times L \quad \text{Eq.B3}$$

em que r_1 representa o raio de passagem dos gases e L o comprimento do tubo.

$$R_{tubo} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2 \times \pi \times k_{tubo} \times L} \quad \text{Eq.B4}$$

em que R_{tubo} representa a resistência do tubo, r_2 o raio do tubo e k_{tubo} a condutividade térmica do aço.

$$R_{isol.} = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2 \times \pi \times k_{isol.} \times L} \quad \text{Eq.B5}$$

em que $R_{isol.}$ representa a resistência do isolante, r_3 o raio do isolante e $k_{isol.}$ a condutividade térmica do isolante.

$$R_{alum.} = \frac{\ln(r_4/r_3)}{2 \times \pi \times k_{alum.} \times L} \quad \text{Eq.B6}$$

em que $R_{alum.}$ representa a resistência do alumínio, r_4 o raio do alumínio e $k_{alum.}$ a condutividade térmica do isolante.

A Eq.B7 permite determinar o calor perdido sabendo duas temperaturas e as suas resistências.

$$Q = \frac{T_2 - T_4}{R_{isol.} + R_{alum.}} \quad \text{Eq.B7}$$

em que Q representa o calor perdido.

Com a Eq.B7 é possível calcular as outras temperaturas pretendidas adaptando-a ao caso pretendido.

É apresentado um exemplo de cálculo para a zona 1, queimador 1.

$$Q = \frac{T_2 - T_4}{R_{isol.} + R_{alum.}} = \frac{428,7 - 346,1}{0,139 + 4,25 \times 10^{-3}} = 663,5 \text{ W}$$

$$Q = \frac{T_3 - T_4}{R_{alum.}} \Leftrightarrow T_3 = 346,1 + 663,5 \times 4,25 \times 10^{-3} = 346,1 \text{ K}$$

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{R_{tubo}} \Leftrightarrow T_1 = 438,3 + 663,5 \times 1,18 \times 10^{-3} = 439,1 \text{ K}$$

$$Q = \frac{T_0 - T_1}{R_{conv.}} \Leftrightarrow T_0 = 439,1 + 663,5 \times 0,233 = 593,6 \text{ K}$$

Tabela B. 1 - Valores de T_2 e T_4 para a zona 1.

			T ₂ (K)			T ₄ (K)		
Zona	Comprimento	Queimador	Temperaturas (K)	Média p/queimador	Média p/zona	Temperaturas (K)	Média p/queimador	Média p/zona
1	L2	1	413,7	438,3	428,7	388,5	346,1	350,8
			403,2			314,6		
			498,1			335,2		
	L1	2	380,1	376,3		346,7	331,8	
			366,6			323,1		
			382,3			325,6		
	L2	3	425,5	437,5		408,0	362,0	
			408,8			337,5		
			478,2			340,5		
	L1	4	441,0	427,7		389,6	348,3	
			416,7			321,4		
			425,4			334,0		
	L2	5	412,2	437,5		401,8	377,8	
			433,2			373,4		
			467,2			358,2		
	L1	6	450,0	471,0		375,0	357,4	
			445,0			344,0		
			518,0			353,3		
	L2	7	406,3	413,1		407,0	360,5	
			398,3			331,9		
			434,7			342,6		
	L1	8	377,1	396,9		329,1	323,6	
			391,3			318,6		
			422,3			323,1		
	L2	9	421,3	423,8		387,2	347,8	
			391,8			327,7		
			458,4			328,7		
	L1	10	429,5	465,6		378,0	352,6	
			445,1			335,5		
			522,2			344,5		

Tabela B. 2 - Calor e temperaturas para a zona 1.

Q, W	Temperaturas				
	$T0$ (K)	$T1$ (K)	$T2$ (K)	$T3$ (K)	$T4$ (K)
663,5	593,6	439,1	438,3	346,1	346,1
518,7	451,3	376,7	376,3	331,8	331,8
543,2	564,6	438,1	437,5	362,0	362,0
924,4	561,3	428,3	427,7	348,3	348,3
429,7	538,1	438,0	437,5	377,8	377,8
1322,8	662,2	471,9	471,0	357,4	357,4
378,4	501,6	413,5	413,1	360,5	360,5
853,8	520,3	397,5	396,9	323,6	323,6
546,5	551,7	424,4	423,8	347,8	347,8
1315,4	655,7	466,5	465,6	352,7	352,6

Tabela B. 3 - Valores de T_2 e T_4 para a zona 2.

			T ₂ (K)			T ₄ (K)		
Zona	Comprimento	Queimador	Temperaturas (K)	Média p/queimador	Média p/zona	Temperaturas (K)	Média p/queimador	Média p/zona
2	L2	1	386,9	426,4	430,1	395,7	349,5	341,0
			427,2			325,3		
			465,1			327,5		
	L1	2	465,7	471,9		383,3	346,8	
			446,1			330,7		
			503,9			326,5		
	L2	3	389,9	421,3		373,8	339,2	
			410,6			321,5		
			463,4			322,5		
	L1	4	391,8	449,5		379,5	344,4	
			456,4			330,8		
			500,5			322,9		
	L2	5	398,3	432,7		361,4	335,5	
			407,5			322,9		
			492,4			322,4		
	L1	6	383,5	439,2		385,7	340,6	
			429,2			321,5		
			505,1			314,6		
	L2	7	382,7	414,2		355,3	339,7	
			395,6			334,4		
			464,3			329,5		
	L1	8	369,9	400,4		371,3	337,9	
			397,5			323,8		
			433,8			318,8		
	L2	9	381,8	415,2		358,5	335,5	
			415,5			320,1		
			448,5			327,9		

Tabela B. 4 - Calor e temperaturas para a zona 2.

Q (W)	Temperaturas				
	T ₀ (K)	T ₁ (K)	T ₂ (K)	T ₃ (K)	T ₄ (K)
553,2	555,8	427,0	426,4	349,5	349,5
1456,7	682,4	472,9	471,9	346,8	346,8
590,2	286,2	148,8	148,1	339,2	339,2
1225,0	626,6	450,4	449,5	344,4	344,4
699,0	596,3	433,5	432,7	335,5	335,5
1149,2	605,4	440,1	439,2	340,6	340,6
535,7	539,5	414,8	414,2	339,7	339,7
727,2	505,5	400,9	400,4	337,9	337,9
573,9	549,5	415,9	415,2	335,5	335,5

Tabela B. 5 - Valores de T_2 e T_4 para a zona 3.

			T ₂ (K)			T ₄ (K)		
Zona	Comprimento	Queimador	Temperaturas (K)	Média p/queimador	Média p/zona	Temperaturas (K)	Média p/queimador	Média p/zona
3	L2	1	369,0	377,0	402,1	390,0	344,5	339,0
			364,1			320,7		
			398,1			323,0		
	L1	2	381,3	394,7		353,9	332,5	
			386,0			317,6		
			416,9			326,2		
	L2	3	388,6	398,4		368,8	336,7	
			389,8			318,9		
			417,0			322,6		
	L1	4	360,3	394,4		374,4	343,5	
			401,4			332,7		
			421,6			323,5		
	L2	5	389,2	423,3		386,0	344,5	
			411,3			320,1		
			469,6			327,6		
	L1	6	398,2	421,8		351,5	329,1	
			409,6			313,8		
			457,6			322,1		
	L2	7	387,2	405,5		377,3	342,5	
			387,1			327,4		
			442,2			322,8		

Tabela B. 6 - Calor e temperaturas para a zona 3.

Q (W)	Temperaturas				
	T ₀ (K)	T ₁ (K)	T ₂ (K)	T ₃ (K)	T ₄ (K)
233,7	431,7	377,3	377,0	344,5	344,5
724,1	499,4	395,2	394,7	332,5	332,5
443,9	502,3	398,9	398,4	336,7	336,7
592,9	480,1	394,8	394,4	343,5	343,5
566,9	556,0	424,0	423,3	344,5	344,5
1079,4	577,8	422,5	421,8	329,1	329,1
453,2	511,5	406,0	405,5	342,5	342,5

Tabela B. 7 - Valores de T_2 e T_4 para a zona 4.

			T2 (K)			T4 (K)		
Zona	Comprimento	Queimador	Temperatura (K)	Média p/queimador	Média p/zona	Temperaturas (K)	Média p/queimador	Média p/zona
4	L2	1	380,5	412,4	404,6	364,8	335,1	335,1
			407,8			316,9		
			449,0			323,6		
	L1	2	347,8	371,6		345,2	325,9	
			370,5			311,1		
			396,7			321,4		
	L2	3	375,4	435,9		365,6	333,7	
			444,0			317,4		
			488,3			318,3		
	L1	4	374,5	398,4		383,3	345,8	
			401,4			331,7		
			419,5			322,4		

Tabela B. 8 - Calor e temperaturas para a zona 4.

Q (W)	Temperaturas				
	T_0 (K)	T_1 (K)	T_2 (K)	T_3 (K)	T_4 (K)
556,4	542,6	413,0	412,4	335,1	335,1
533,1	448,7	372,0	371,6	325,9	325,9
734,8	607,8	436,7	435,9	333,7	333,7
613,4	487,1	398,9	398,4	345,8	345,8

Tabela B. 9 - Valores de T_2 e T_4 para a zona 5.

			T ₂ (K)			T ₄ (K)		
Zona	Comprimento	Queimador	Temperaturas (K)	Média p/queimador	Média p/zona	Temperaturas (K)	Média p/queimador	Média p/zona
5	L2	1	382,2	432,5	422,8	409,3	350,5	343,0
			426,9			321,1		
			488,6			321,1		
	L1	2	398,3	425,2		380,6	344,6	
			405,4			326,3		
			471,9			326,9		
	L2	3	384,6	410,9		356,3	334,1	
			392,7			323,8		
			455,4			322,2		

Tabela B. 10 - Calor e temperaturas para a zona 5.

Q (W)	Temperaturas				
	T_0 (K)	T_1 (K)	T_2 (K)	T_3 (K)	T_4 (K)
590,4	570,7	433,2	432,5	350,5	350,5
938,8	560,9	425,8	425,2	344,6	344,6
552,5	540,2	411,5	410,9	334,1	334,1

Tabela B. 11 - Valores de T_2 e T_4 para a zona 6.

			T ₂ (K)			T ₄ (K)		
Zona	Comprimento	Queimador	Temperaturas (K)	Média p/queimador	Média p/zona	Temperaturas (K)	Média p/queimador	Média p/zona
6	L1	1	427,5	443,5	402,9	416,3	358,1	345,0
			423,0			324,9		
			480,1			333,1		
	L2	2	370,4	386,2		399,1	347,1	
			366,9			321,2		
			421,3			321,1		
	L2	3	423,4	395,4		360,6	340,4	
			368,9			329,8		
			394,0			330,9		
	L1	4	363,4	386,5		338,7	334,5	
			368,8			334,8		
			427,3			330,0		

Tabela B. 12 - Calor e temperaturas para a zona 6.

Q, W	Temperaturas				
	T_0 (°C)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_3 (K)	T_4 (K)
995,1	587,3	444,2	443,5	358,1	358,1
281,1	451,9	386,5	386,2	347,1	347,1
395,7	488,0	395,8	395,4	340,4	340,4
605,7	474,0	386,9	386,5	334,5	334,5

Apêndice B.3 - Dimensionamento do permutador

Heat Exchanger Specification Sheet										
1	Company:									
2	Location:									
3	Service of Unit:				Our Reference:					
4	Item No.:				Your Reference:					
5	Date:		Rev No.:		Job No.:					
6	Size : 307 - 2438,4 mm		Type: AES Horizontal		Connected in: 1 parallel 1 series					
7	Surf/unit(eff.) 10,1 m ²		Shells/unit 1		Surf/shell(eff.) 10,1 m ²					
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT									
9	Fluid allocation				Shell Side		Tube Side			
10	Fluid name				COMBUST		SECA			
11	Fluid quantity, Total kg/h				1946		744			
12	Vapor (In/Out) kg/h				1946		744		744	
13	Liquid kg/h				0		0		0	
14	Noncondensable kg/h				0		0		0	
15										
16	Temperature (In/Out) °C				260		201,9		190	
17	Dew / Bubble point °C									
18	Density Vapor/Liquid kg/m ³				0,64 /		1,2 /		0,69 /	
19	Viscosity cp				0,0271 /		0,0181 /		0,0254 /	
20	Molecular wt, Vap				27,86		28,85		28,85	
21	Molecular wt, NC									
22	Specific heat kcal/(kg·°C)				0,2738 /		0,2415 /		0,2459 /	
23	Thermal conductivity kcal/(h·m·°C)				0,035 /		0,032 /		0,032 /	
24	Latent heat kcal/kg									
25	Pressure (abs) kgf/cm ²				1,033		1,033		0,945	
26	Velocity (Mean/Max) m/s				29,07 / 44,59		33,22 / 45,31			
27	Pressure drop, allow./calc. kgf/cm ²				0,112		0,128		0,204	
28	Fouling resistance (min) m ² ·h·°C/kcal				0,00031		0,00031		0,00039 Ao based	
29	Heat exchanged 35,8 kW						MTD (corrected) 98,95 °C			
30	Transfer rate, Service 6,28 Dirty 10,31 Clean 10,69						8TU/(h·ft ² ·°F)			
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL									
32					Shell Side		Tube Side			
33	Design/Vacuum/test pressure kgf/cm ²				3,059 /		3,059 /			
34	Design temperature °C				295		295			
35	Number passes per shell				1		2			
36	Corrosion allowance mm				3,18		3,18			
37	Connections In mm				1 152,4 /		1 76,2 /			
38	Size/Rating Out				1 203,2 /		1 76,2 /			
39	Nominal Intermediate				/		/			
40	Tube No. 76 OD 19,05 Tks Average 2,11 mm Length 2438,4 mm Pitch 23,81 mm									
41	Tube type Plain #/m Material Carbon Steel						Tube pattern 30			
42	Shell Carbon Steel ID 307,09 OD 323,65 mm						Shell cover Carbon Steel			
43	Channel or bonnet Carbon Steel						Channel cover Carbon Steel			
44	Tubesheet-stationary Carbon Steel						Tubesheet-floating Carbon Steel			
45	Floating head cover Carbon Steel						Impingement protection None			
46	Baffle-cross Carbon Steel Type Single segmental Cut(%d) 37,6 H Spacing: c/c 300 mm									
47	Baffle-long Seal Type						Inlet 364,41 mm			
48	Supports-tube U-bend 0 Type									
49	Bypass seal Tube-tubesheet joint Expanded only (2 grooves)(App.A 'i')									
50	Expansion joint Type None									
51	RhoV2-Inlet nozzle 1321 Bundle entrance 375 Bundle exit 375 kg/(m·s ²)									
52	Gaskets - Shell side Flat Metal Jacket Fibe Tube side Flat Metal Jacket Fibe									
53	Floating head Flat Metal Jacket Fibe									
54	Code requirements ASME Code Sec VIII Div 1 TEMA class R - refinery service									
55	Weight/Shell 615,8 Filled with water 823,9 Bundle 219,9 kg									
56	Remarks									
57										
58										

Figura B. 1 – Folha de especificação do permutador do Cenário I.

Heat Exchanger Specification Sheet									
1	Company:								
2	Location:								
3	Service of Unit:				Our Reference:				
4	Item No.:				Your Reference:				
5	Date:		Rev No.:		Job No.:				
6	Size : 438 - 2438,4 mm		Type: AES Horizontal		Connected in: 1 parallel 1 series				
7	Surf/unit(eff.) 29,9 m ²		Shells/unit 1		Surf/shell(eff.) 29,9 m ²				
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT								
9	Fluid allocation				Shell Side		Tube Side		
10	Fluid name				COMBUST		10		
11	Fluid quantity, Total kg/h				1948		3930		
12	Vapor (In/Out) kg/h				1948		0		0
13	Liquid kg/h				0		3930		3930
14	Noncondensable kg/h				0		0		0
15									
16	Temperature (In/Out) °C				260		101		75 95
17	Dew / Bubble point °C								
18	Density Vapor/Liquid kg/m ³				0,64 /		0,88 /		/ 944,32 / 923,56
19	Viscosity cp				0,0271 /		0,0206 /		/ 0,3801 / 0,2956
20	Molecular wt, Vap				27,85		27,85		
21	Molecular wt, NC								
22	Specific heat kcal/(kg-C)				0,274 /		0,2648 /		/ 1,0441 / 1,0786
23	Thermal conductivity kcal/(h-m-C)				0,035 /		0,025 /		/ 0,569 / 0,58
24	Latent heat kcal/kg								
25	Pressure (abs) kgf/cm ²				1,033		0,997		3,1 3,067
26	Velocity (Mean/Max) m/s				14,36 / 25,04		0,03 / 0,03		
27	Pressure drop, allow./calc. kgf/cm ²				0,112		0,036		0,51 0,033
28	Fouling resistance (min) m ² -h-C/kcal				0,00051		0,00051 0,00066		Ao based
29	Heat exchanged 97 kW				MTD (corrected) 75,68 °C				
30	Transfer rate, Service 7,55 Dirty 15,46 Clean 16,96 BTU/(h-ft ² -F)								
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL								
32					Shell Side		Tube Side		Sketch
33	Design/Vacuum/test pressure kgf/cm ²				3,059 /		4,079 /		
34	Design temperature °C				295		295		
35	Number passes per shell				1		1		
36	Corrosion allowance mm				3,18		3,18		
37	Connections In mm				1 152,4 / -		1 25,4 / -		
38	Size/Rating Out				1 152,4 / -		1 25,4 / -		
39	Nominal Intermediate				/ -		/ -		
40	Tube No. 224		OD 19,05 Tks Average 2,11		mm Length 2438,4		mm Pitch 23,81		mm
41	Tube type Plain		#/m Material Carbon Steel		Tube pattern 30				
42	Shell Carbon Steel		ID 438,15 OD 457,2 mm		Shell cover Carbon Steel				
43	Channel or bonnet Carbon Steel				Channel cover Carbon Steel				
44	Tubesheet-stationary Carbon Steel		-		Tubesheet-floating Carbon Steel				
45	Floating head cover Carbon Steel				Impingement protection None				
46	Baffle-cross Carbon Steel		Type Single segmental Cut(%d) 40,59		H Spacing: c/c 400 mm				
47	Baffle-long -		Seal Type		Inlet 514,41 mm				
48	Supports-tube U-bend 0		Type						
49	Bypass seal		Tube-tubesheet joint		Expanded only (2 grooves)(App.A 'i')				
50	Expansion joint -		Type None						
51	RhoV2-Inlet nozzle 1324		Bundle entrance 222		Bundle exit 161 kg/(m-s ²)				
52	Gaskets - Shell side Flat Metal Jacket Fibe		Tube side Flat Metal Jacket Fibe						
53	Floating head Flat Metal Jacket Fibe								
54	Code requirements ASME Code Sec VIII Div 1		TEMA class R - refinery service						
55	Weight/Shell 1155,6 Filled with water 1541,9		Bundle 577,9 kg						
56	Remarks								
57									
58									

Figura B. 2 – Folha de especificação do permutador do Cenário II.

Heat Exchanger Specification Sheet									
1	Company:								
2	Location:								
3	Service of Unit:				Our Reference:				
4	Item No.:				Your Reference:				
5	Date:		Rev No.:		Job No.:				
6	Size : 307 - 2438,4 mm		Type: AES Horizontal		Connected in: 1 parallel 1 series				
7	Surf/unit(eff.) 9,3 m ²		Shells/unit 1		Surf/shell(eff.) 9,3 m ²				
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT								
9	Fluid allocation			Shell Side			Tube Side		
10	Fluid name			COMBUST1			6		
11	Fluid quantity, Total kg/h			1948			2395		
12	Vapor (In/Out) kg/h			1948			0		
13	Liquid kg/h			0			2395		
14	Noncondensable kg/h			0			0		
15									
16	Temperature (In/Out) °C			202			104,52		
17	Dew / Bubble point °C						75		
18	Density Vapor/Liquid kg/m ³			0,71 / 0,8			/ 944,32 / 923,57		
19	Viscosity cp			0,0248 / 0,0207			/ 0,3801 / 0,2956		
20	Molecular wt, Vap			27,85			27,85		
21	Molecular wt, NC								
22	Specific heat kcal/(kg-°C)			0,2704 / 0,265			/ 1,0441 / 1,0786		
23	Thermal conductivity kcal/(h-m-°C)			0,031 / 0,025			/ 0,569 / 0,58		
24	Latent heat kcal/kg								
25	Pressure (abs) kgf/cm ²			1,033			0,925		
26	Velocity (Mean/Max) m/s			22,18 / 36,38			0,25 / 0,27		
27	Pressure drop, allow./calc. kgf/cm ²			0,112			0,108		
28	Fouling resistance (min) m ² -h-°C/kcal			0,00051			0,00051 0,00066 Ao based		
29	Heat exchanged 50812 kcal/h			MTD (corrected) 53,67 °C					
30	Transfer rate, Service 20,77 Dirty 31,41 Clean 38,28 BTU/(h-ft ² -F)								
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL								
32				Shell Side			Tube Side		
33	Design/Vacuum/test pressure kgf/cm ²			3,059 / /			4,079 / /		
34	Design temperature °C			240			240		
35	Number passes per shell			1			4		
36	Corrosion allowance mm			3,18			3,18		
37	Connections In mm			1 152,4 / -			1 19,05 / -		
38	Size/Rating Out			1 152,4 / -			1 19,05 / -		
39	Nominal Intermediate			/ -			/ -		
40	Tube No. 70 OD 19,05 Tks Average 2,11 mm Length 2438,4 mm Pitch 23,81 mm								
41	Tube type Plain #/m Material Carbon Steel			Tube pattern 30					
42	Shell Carbon Steel ID 307,09 OD 323,85 mm			Shell cover Carbon Steel					
43	Channel or bonnet Carbon Steel			Channel cover Carbon Steel					
44	Tubesheet-stationary Carbon Steel -			Tubesheet-floating Carbon Steel					
45	Floating head cover Carbon Steel			Impingement protection None					
46	Baffle-cross Carbon Steel Type Single segmental Cut(%d) 38,63 H Spacing: c/c 300 mm								
47	Baffle-long - Seal Type Inlet 364,41 mm								
48	Supports-tube U-bend 0 Type								
49	Bypass seal Tube-tubesheet joint Expanded only (2 grooves)(App.A 'i)								
50	Expansion joint - Type None								
51	RhoV2-Inlet nozzle 1180 Bundle entrance 458 Bundle exit 291 kg/(m-s ²)								
52	Gaskets - Shell side Flat Metal Jacket Fibe Tube side Flat Metal Jacket Fibe								
53	Floating head Flat Metal Jacket Fibe								
54	Code requirements ASME Code Sec VIII Div 1 TEMA class R - refinery service								
55	Weight/Shell 596,9 Filled with water 796,1 Bundle 208,1 kg								
56	Remarks								
57									
58									

Figura B. 3 – Folha de especificação do permutador do Cenário III.

O valor do período de retorno foi calculado pela Eq.B8.

$$\text{Período de retorno} = \frac{Inv.\text{permutador}}{P_{t\acute{e}rmica} \times N_{funcio.} \times Preço_{eletr.}} \quad \text{Eq.B8}$$

De seguida é apresentado o exemplo de cálculo para o Cenário I.

$$Payback = \frac{14\,489 \times 1,2}{35,8 \times 8\,000 \times 0,11} = 0,55$$