

Mestrado Integrado em Engenharia Química

Racionalização dos Consumos de Gás Natural na Fábrica do Porto da Nestlé

Dissertação de Mestrado

de

João Francisco Fernandes de Valadares Souto

Desenvolvida no âmbito da unidade curricular de Dissertação

realizado em

Nestlé Portugal S.A.



Orientador na FEUP: Prof. Fernando Gomes Martins

Orientador na Nestlé: Eng. Ricardo Barbosa



Departamento de Engenharia Química

Julho de 2018

Agradecimentos

Em primeiro lugar, devo agradecer à Nestlé Portugal por ter viabilizado o projeto, pelo acolhimento que me proporcionou e por toda a aprendizagem recebida, mesmo em matérias acessórias ao que dizia respeito à dissertação.

Depois, devo deixar um especial agradecimento ao Agostinho Teixeira, chefe dos serviços técnicos da fábrica do Porto da Nestlé. Este foi o contacto mais próximo que tive dentro da empresa e aquele que mais contribuiu para a minha aprendizagem e realização desta dissertação. Nesta nota, endereço também o meu agradecimento a toda a divisão dos serviços técnicos, onde estive inserido.

Agradeço também à Galp, cujo programa Galp 21 é o principal impulsionador deste projeto. A Galp financia e apoia direta ou indiretamente 21 projetos de estudantes ou recém-graduados relacionados com a eficiência energética. Devo, assim, agradecer a iniciativa que me permite realizar a dissertação num ambiente empresarial e de rica aprendizagem.

Quero agradecer também a todos aqueles com quem partilhei os meus 12 anos de escolaridade mais os 5 anos de ensino superior, sendo professores, amigos ou família. Com maior ou menor importância, todos foram capazes de me transmitir conhecimento e com todos aprendi qualquer coisa. Esta dissertação é resultado de toda a aprendizagem acumulada ao longo de quase 2 décadas.

Por fim, uma nota de agradecimento ao meu orientador na faculdade, o Prof. Fernando Gomes Martins. Dando-me liberdade para atuar com total liberdade, nunca faltou apoio quando era necessário, mesmo não lhe faltando trabalho.

O Prof. Fernando Gomes Martins, orientador desta dissertação, é membro integrado do LEPABE - Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente Biotecnologia e Energia, financiado por: Projeto POCI-01-0145-FEDER-006939 (Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia, UID/EQU/00511/2013) - financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 - Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia I.P.; 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

A torrefação de café na fábrica do Porto da Nestlé é um processo industrial com consumo de gás natural e libertação de gases nas chaminés a temperaturas próximas dos 300 °C. Este trabalho, visando a eficiência energética da fábrica, procura reduzir o consumo de combustível e aproveitar o potencial térmico dos gases das chaminés.

Nesse âmbito, a primeira parte do trabalho é um estudo sobre os perfis de consumo de gás natural da fábrica e de cada torrador. O seu objetivo é descobrir explicações para as variações no consumo e poder otimizar o processo para o reduzir. Por outro lado, foram estudadas vias de aproveitamento do calor presente nos gases libertados pela chaminé. Ao contrário de muitas indústrias, a indústria torrefatora não necessita de aquecer correntes: o desafio não é retirar o calor à corrente gasosa, mas sim encontrar aplicações para esse mesmo calor.

Conclui-se que, entre os dois torradores da fábrica, há um torrador com maior eficiência energética, mas cujo arranque consome mais energia. Aliás, o número de paragens e arranques desse torrador é o principal fator explicativo de aumentos ou reduções no consumo de gás na fábrica. Assim, a torrefação de café deve ser dirigida tanto quanto possível para este torrador, cujas paragens, mesmo as não programadas, devem ser reduzidas. Para além disto, fez-se um estudo preliminar do aproveitamento do calor dos gases para o aquecimento das águas sanitárias, o aquecimento central da fábrica, a produção de eletricidade e o aquecimento do ar limpo que é admitido aos torradores, investimento esse que se mostra como atrativo.

Palavras Chave:

Eficiência Energética;

Torrefação de Café;

Gás Natural.

Abstract

The coffee roasting in Nestlé's Oporto plant is an industrial process powered by natural gas and with gas streams released at the chimneys at temperatures close to 300°C. This work, targeting the plant's energetic efficiency, aims to reduce the fuel consumption and to benefit from the heat available in the chimneys' gas streams.

Therefore, the first part of the work is a study on the natural gas consumption profiles both for the plant and for each individual roaster. Its goal is to explain why the consumption varies, what explain the larger consumptions and what should be done to fix it. On the other hand, ways to use the heat potential from the chimney's gas were studied. While the most common challenge is how to remove the heat from the hot stream and making it available, the problem within this plant is finding an application to the heat available, because there is no cold stream requiring heating in the plant.

Between the two different roasters working in the plant, there is one which is more efficient, but whose starting procedure requires more fuel. Indeed, the number of stops and starts of that roaster is the main factor explaining the increases or decreases in fuel consumption. Therefore, the coffee roasting should be directed to this roaster, whose stops should be reduced as much as possible. Besides, a preliminary study was done to utilize the heat from the chimneys' gases to heat the bathroom water system, to supply hot water to the central heating system, to produce electricity and to heat the clean air entering the roasters. This investment is profitable to the company.

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.....	1
1.1	Enquadramento e Apresentação do Projeto	1
1.2	Apresentação da Empresa	2
1.3	Contributos do Trabalho.....	3
1.4	Organização da Tese	3
2	Contexto e Estado da Arte	5
2.1	Tipos de torradores.....	5
2.2	Torradores da fábrica do Porto.....	5
2.3	Comparação entre torradores	7
2.4	Gases de chaminé dos torradores.....	7
2.5	Consumo de gás natural na fábrica	8
3	Inventário dos Consumos	11
3.1	Dados e Condições das medições.....	11
3.2	Consumos entre 2014 e 2017.....	12
3.3	Consumo ao longo do ano	15
3.4	Consumo ao longo da semana	16
3.5	Comparação entre torradores	18
4	Aproveitamento do calor dos gases de chaminé	23
4.1	Caraterização	23
4.2	O Processo da Exergyn Drive	25
4.3	Águas Sanitárias e Aquecimento Central	27
4.4	Ar Limpo dos Torradores	31
4.5	Permutadores Ar-Água	33
4.5.1	Aquecimento de água pelos gases das chaminés	33
4.5.2	Aquecimento de ar limpo.....	35
4.6	Análise Global.....	38
5	Conclusões	41

6	Avaliação do trabalho realizado.....	45
6.1	Objetivos Realizados	45
6.2	Limitações e Trabalho Futuro	45
6.3	Apreciação Final	46
	Referências	47

Lista de Figuras

<i>Figura 1 - Esquema do torrador 1 da fábrica do Porto da Nestlé (manual do torrador).</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2 - Consumo de energia primária equivalente por tonelada de matéria prima por ano.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3 - Número de paragens no torrador 1 com duração superior a 1 h.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 4 - Número de paragens no torrador 3 de duração superior a 1 h.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 5 - Número total de paragens nos torradores 1 e 3 por ano.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 6 - Evolução do consumo de gás por tonelada de café verde ao longo do ano.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 7 - Consumo de gás natural por tonelada de café verde por dia da semana com torrefação. ...</i>	<i>16</i>
<i>Figura 8 - Consumo de gás natural por tonelada de café verde por dia da semana.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 9 - Número de paragens superiores a 1 hora por torrador por dia da semana (excluindo fins de semana).</i>	<i>17</i>
<i>Figura 10 - Ciclo de aquecimento/arrefecimento de uma LEMF (Langan e O'Toole, 2017).</i>	<i>25</i>
<i>Figura 11 - Ciclo térmico do núcleo da Exergyn Drive (Langan e O'Toole, 2017).</i>	<i>26</i>

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1 - Consumo de gás natural e produção de café anuais.</i>	<i>13</i>
<i>Tabela 2 - Produção por torrador e por dia da semana.</i>	<i>18</i>
<i>Tabela 3 - Propriedades do gás natural abastecido à fábrica do Porto da Nestlé (Galp, 2018).</i>	<i>19</i>
<i>Tabela 4 - Consumo por tonelada de café verde em cada queimador.</i>	<i>19</i>
<i>Tabela 5 - Diferença entre os consumos de cada torrador por cada queimador.</i>	<i>21</i>
<i>Tabela 6 - Caracterização física dos gases de chaminé de cada torrador.</i>	<i>23</i>
<i>Tabela 7 - Composição química das correntes gasosas das chaminés.</i>	<i>24</i>
<i>Tabela 8 - Dados de operação e instalação de um módulo de Exergyn Drive.</i>	<i>26</i>
<i>Tabela 9 - Consumo de água mensal na fábrica do Porto da Nestlé (valores em m³).</i>	<i>28</i>
<i>Tabela 10 - Consumo de combustível e dados técnicos dos esquentadores.</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 11 - Consumos mensais de gás natural e água do esquentador e da fábrica.</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 12 - Dados técnicos da caldeira e tempo de funcionamento.</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 13 - Consumo mensal de gás natural na caldeira.</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 14 - Caudal de ar atmosférico a circular nos torradores.</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 15 - Razão de caudais ar/combustível em cada torrador.</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 16 - Tipo de permutador e dados processuais para arrefecimento de gases da chaminé.</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 17 - Geometria e custo do permutador para arrefecimento de gases de chaminé.</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 18 - Tipo de permutador e dados processuais para aquecimento do ar limpo.</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 19 - Geometria e custo do permutador para aquecimento do ar limpo.</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 20 - Poupança anual por aquecimento prévio do ar limpo.</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 21 - Quantidade de água quente utilizada em cada utilização.</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 22 - Custo de investimento e manutenção dos vários equipamentos.</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 23 - Poupança associada a cada uma das aplicações da água quente.</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 24 - Indicadores económicos para o investimento no tratamento dos gases da chaminé.</i>	<i>40</i>

Notação e Glossário

Lista de Siglas

COV	Compostos Orgânicos Voláteis
kgep	Quilogramas equivalentes de petróleo
LEMF	Liga com Efeito de Memória de Forma
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PRI	Período de Retorno do Investimento
PTN	Pressão e Temperaturas Normais
tep	Toneladas equivalentes de petróleo
TIR	Taxa Interna de Rentabilidade
VPL	Valor Presente Líquido

1 Introdução

1.1 Enquadramento e Apresentação do Projeto

O café é um produto consumido à escala mundial - são consumidas anualmente, aproximadamente, 9 milhões de toneladas de café (International Coffee Organization, 2018). Apesar do consumo de café ser um fenómeno à escala global, a planta do café é apenas cultivada numa pequena região do globo. Esta planta precisa de muita água e exige uma temperatura amena e constante ao longo do ano, clima esse que é típico de zonas tropicais, de onde é autóctone. A planta do café é uma árvore de fruto, fruto esse que, no seu interior, tem dois grãos. Esses grãos, as sementes das plantas do café, são extraídos da fruta através de processos apropriados nas próprias plantações de café. Aos grãos de café extraídos do fruto e ainda por torrar dá-se o nome de café verde (National Coffee Association, 2018).

O café verde é completamente diferente do café torrado que é usado como base da bebida consumida diariamente por milhões de pessoas. O café verde, após ser colhido da planta, é macio e esponjoso e tem um odor semelhante ao da relva (National Coffee Association, 2018). Para se obter a bebida amarga e característica é necessário torrar o café verde. Este processo de torrefação de café constitui a atividade central da fábrica do Porto da Nestlé.

A torrefação de café é um processo consumidor intensivo de energia onde se aquecem os grãos de café verde desde a temperatura ambiente até temperaturas superiores a 200 °C. O aquecimento dos grãos de café é feito por contacto direto com correntes de ar quente, em torradores especificamente desenhados para o efeito. Esta corrente de ar é aquecida até à temperatura necessária para a torrefação de café e em queimadores a gás natural ou outro combustível (De Monte et al., 2003).

O consumo de combustível no processo de torrefação de café pode não ser restringido a estes queimadores. O café, ao ser torrado, liberta elevadas quantidades de matéria particulada, CO, CO₂ e uma mistura de mais de 700 outros compostos orgânicos voláteis (COV). O tratamento do efluente gasoso pode passar pela sua queima a jusante do torrador e antes de ser enviado para a atmosfera. É estimado que 75% da energia térmica fornecida nos queimadores seja desperdiçada pela chaminé (De Monte et al., 2003; Pantaleo et al., 2017).

Num mercado cada vez mais competitivo, com uma legislação cada vez mais rígida em relação às emissões gasosas e com o escassear de combustíveis fósseis e respetiva subida dos seus preços, é muito relevante reduzir as necessidades energéticas deste processo e, se possível, encontrar alguma utilização para os gases libertados nas chaminés dos torradores.

Este projeto pretende, assim, fazer um estudo intensivo dos consumos de gás natural nos vários queimadores presentes na fábrica e estudar hipóteses de redução desses consumos ou alternativas para os valorizar.

O problema pode, desse modo, subdividir-se em três problemas mais concretos. Em primeiro lugar, deve ser avaliado o histórico do consumo de gás natural da fábrica e procurar eventuais oscilações no consumo ao longo do tempo, respetivos fatores explicativos e oportunidades de redução a partir da informação obtida. Em segundo lugar, deve ser estudada a operação do torrador e queimadores e a eventual opção por alternativas. Nomeadamente, a possível substituição de um torrador de tambor rotativo por outro de leito fluidizado (ou outra tecnologia disponível) ou até a substituição do torrador mais antigo por outro mais recente e mais eficiente. Para além disso, é importante estudar a operação dos queimadores e a possibilidade de substituição dos mesmos por outros mais eficientes ou até a utilização de outro combustível. Por fim, devem ser estudados os efluentes gasosos de cada queimador e a avaliação do potencial energético dos mesmos. Dessa forma, pode ser possível reaproveitar as mesmas correntes e utilizá-las como fontes de calor.

1.2 Apresentação da Empresa

A Nestlé é líder mundial no setor da alimentação e bebidas. Foi fundada em 1867 pelo farmacêutico de origem alemã Henri Nestlé para vender a “farinha láctea”, que o próprio inventou (Nestlé, 2018).

Passados mais de 150 anos da data de fundação, a Nestlé é, hoje em dia, uma multinacional com vendas superiores a 89,5 mil milhões CHF (francos suíços), está presente em 191 países, possui mais de 2000 marcas e possui 328 000 colaboradores. Num mercado muito dividido a nível global, a Nestlé representa 1,7% do mercado mundial (Nestlé Portugal, 2017).

Em Portugal, a história da Nestlé remonta a 1923. Data em que o professor Egas Moniz fundou a Sociedade dos produtos lácteos, em Avanca, local onde se iniciou a produção de leite em pó. Em 1933, a empresa foi adquirida pela Nestlé (Nestlé Portugal, 2017).

Atualmente, a empresa tem um volume de negócios em Portugal de 486 milhões de euros. Com mais de 1900 colaboradores, tem 3 fábricas (Porto, Lagoa e Avanca), um centro de distribuição e um centro de serviços partilhados em larga expansão (Machado, 2018).

A fábrica do Porto da Nestlé, particularmente, tem a sua área de produção na torrefação de café e embalagem de cafés torrados e sucedâneos e embalagem de açúcar. O café representa 45% das vendas da Nestlé Portugal e, na fábrica do Porto é produzido café torrado de várias marcas do grupo Nestlé, entre as quais: Sical, Buondi, TOFA, Christina e Nescafé.

Em 2017, a produção anual de café torrado na fábrica do Porto da Nestlé foi superior a 9 000 toneladas.

1.3 Contributos do Trabalho

Este trabalho não parte de nenhum trabalho, tese ou projeto prévio, pelo que tudo o que é apresentado neste documento foi realizado por mim.

Foi necessário recorrer a muita informação interna da empresa, tais como faturas, circulares, normas e outros registos. Estes documentos servem de base a muitos dos cálculos que originam muitos dos resultados apresentados. O acesso a todos foi concedido, sendo garantida a confidencialidade da tese.

O trabalho, apesar de realizado de forma individual, contemplou reuniões periódicas com ambos os orientadores e discussões com os restantes elementos da divisão da empresa onde fui inserido. As ideias resultantes de cada conversa ou troca de ideias foram, posteriormente, sempre trabalhadas por mim.

1.4 Organização da Tese

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos, sendo o Capítulo 1 uma introdução ao problema e à empresa.

O Capítulo 2 contextualiza o problema da racionalização do consumo de gás natural na fábrica do Porto da Nestlé, apresentando sucintamente o processo de torrefação e possíveis oportunidades de melhorias a estudar nos capítulos seguintes.

O Capítulo 3 apresenta os resultados do estudo feito aos consumos de gás natural na fábrica e aos seus fatores explicativos. É também estudada a sazonalidade dos consumos, a sua evolução ao longo do tempo e efetuada uma comparação dos consumos entre diferentes tipos de torradores.

O Capítulo 4 baseia-se em meios para aproveitar o calor desperdiçado pelos gases da chaminé e possíveis aplicações para esse calor recuperado.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões principais a retirar dos resultados apresentados nos capítulos três e quatro.

Por fim, no Capítulo 6, é feita uma avaliação do trabalho efetuado, avaliando o grau de cumprimento dos objetivos, as dificuldades encontradas e apresentando trabalhos futuros.

2 Contexto e Estado da Arte

2.1 Tipos de torradores

Os torradores de café podem ser, essencialmente, de 5 tipos diferentes: centrífugos, tangenciais, de tambor, leito fixo e leito fluidizado. Existem torradores de café que operam de forma contínua e outros que operam de forma descontínua, por partidas. Entre os 5 tipos de torradores, os mais comuns são os torradores de leito fluidizado ou de tambor (Collins, 2016).

A fábrica do Porto da Nestlé tem em funcionamento 2 torradores de tambor. A escolha pelos torradores deste tipo em detrimento de outras soluções existentes foi tomada após devido estudo realizado internamente. Para se chegar à decisão final, pesou-se a influência das várias variáveis, tais como: preço, qualidade do café torrado, produtividade, área disponível e consumo energético.

Nomeadamente, sendo a Nestlé uma multinacional, a fábrica do Porto deve tentar ser complementar das outras fábricas do grupo. Como os vários tipos de torradores produzem cafés torrados de qualidades diferentes, a Nestlé utiliza diferentes tecnologias em diferentes fábricas torrefadoras do grupo, optando pelos torradores de tambor na fábrica do Porto. Há torradores de outros tipos em operação noutras fábricas da empresa.

2.2 Torradores da fábrica do Porto

Apesar dos torradores de tambor funcionarem todos de acordo com os mesmos princípios, a evolução tecnológica dos mesmos faz com que haja diferenças significativas entre diferentes torradores. O método mais antigo para a torrefação de café assenta no lento aquecimento dos grãos de café despejados num tambor a rodar sobre o seu eixo horizontal por uma corrente de ar quente.

A montante e a jusante do tambor (Fig. 1 - etiqueta R1), as possíveis variações de torrador para torrador são inúmeras. O aquecimento da corrente de ar pode ser feito de forma direta no interior do tambor ou numa câmara colocada por baixo do tambor. A queima direta no interior do tambor caiu em desuso, uma vez que a chama entrava em contacto com os grãos de café no interior do torrador, algo que tornava menos homogénea a torra no interior do tambor. A fonte de calor pode ser tanto elétrica, como madeira, gás natural ou outros combustíveis derivados do petróleo (Collins, 2016).

Na fábrica do Porto da Nestlé são usados queimadores a gás natural que aquecem o ar numa câmara situada por baixo do tambor (Fig. 1 - etiqueta D2). Já chegou a ser utilizado outro tipo de combustível (propano). O gás natural, todavia, tem uma queima mais limpa, tem um

abastecimento em rede que garante a ausência de falhas nesse abastecimento, não necessita, por esse mesmo motivo, de aprovisionamento e é mais barato. Na lógica da empresa, a conjugação do fator preço com os fatores higiene e segurança fazem com que o gás natural se já a opção preferida.

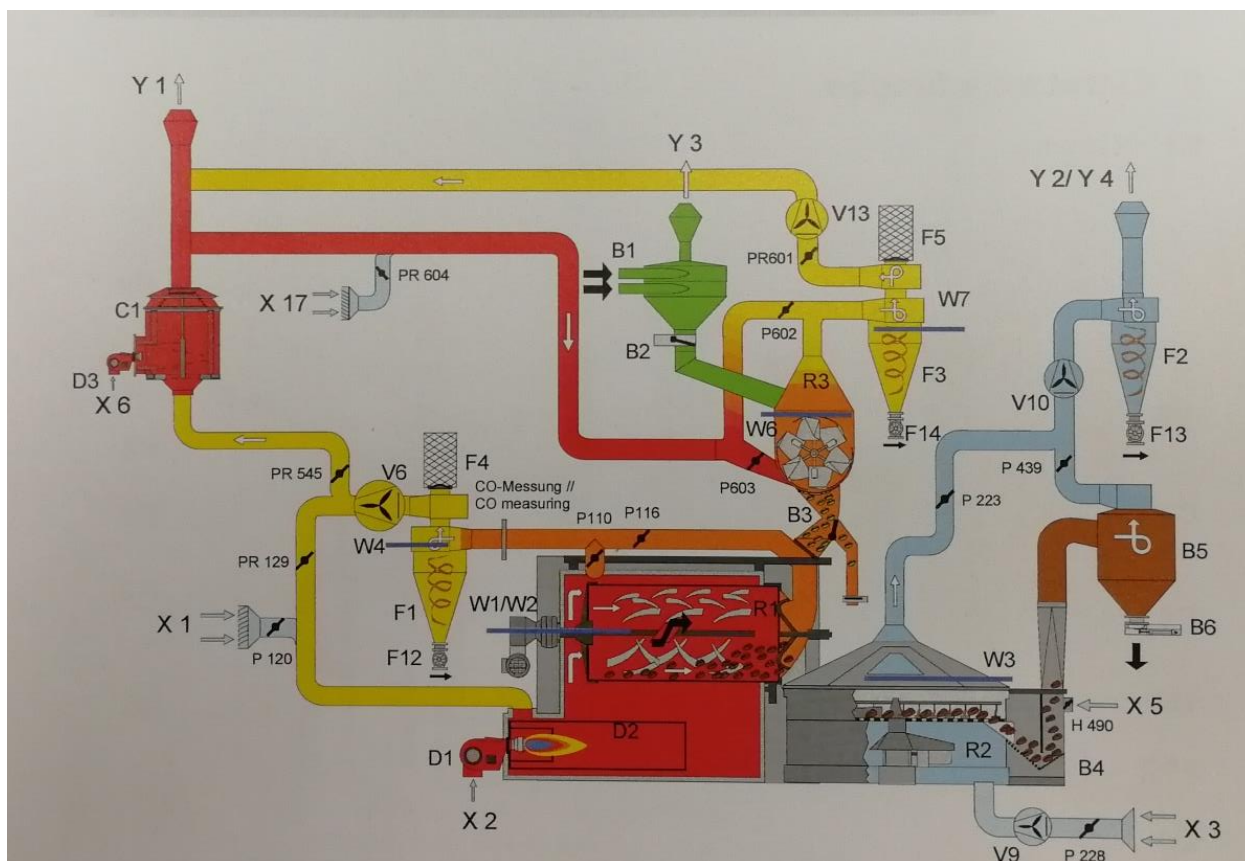


Figura 1 - Esquema do torrador 1 da fábrica do Porto da Nestlé (manual do torrador).

O efluente gasoso do tambor é constituído por matéria particulada e mais de 700 compostos voláteis. O tratamento desta corrente gasosa é necessário e exigido por lei (Decreto-Lei n.º 78/2004). Para a remoção da matéria particulada são instalados ciclones (Fig. 1 - etiqueta F1) e para o tratamento gasoso as alternativas são mais numerosas. Inicialmente, no torrador mais antigo, a oxidação catalítica era a alternativa escolhida. Atualmente, tanto no torrador mais antigo como no mais atual a oxidação térmica é a alternativa preferida e utilizada. Essa oxidação térmica é obtida com a instalação de um pós-queimador (Fig. 1 - etiqueta D3) (De Monte et al., 2003). Apesar deste pós-queimador significar um consumo extra de combustível, o catalisador opera a uma temperatura elevada e exige um maior consumo no queimador principal e a quantidade de cinzas e matéria particulada (mesmo na presença de ciclones) tornava o tempo de vida do catalisador muito reduzido.

Atualmente, começam a existir soluções integradas de tratamento dos efluentes gasosos alternativas sem recurso nem a catalisadores nem a queimadores. Um exemplo é a catálise

térmica realizada em leitos de cerâmica aquecidos a temperaturas superiores a 900 °C eletricamente. A temperatura é mantida, contudo, pelo próprio avançar da reação, que é exotérmica (PROBAT, 2018). Esta alternativa carece de avaliação a nível de dimensionamento.

2.3 Comparação entre torradores

Na fábrica do Porto da Nestlé, ambos os torradores fazem a recirculação do ar quente do torrador. O ar quente, ao sair do torrador, não é encaminhado na sua totalidade para o pós-queimador e para a chaminé; pelo contrário, a maioria do caudal é realimentada à câmara de combustão, situada por baixo do tambor (Fig.1 - etiqueta V6). A quantidade de gás reaproveitada e queimada varia consoante o ponto do processo de torra e as respetivas concentrações de COV, matéria particulada e restantes poluentes no efluente gasoso. Por exemplo, nos momentos finais da torra, quando a libertação de poluentes é máxima, a válvula PR 545 é totalmente aberta e todo o gás encaminhado para o pós-queimador.

No entanto, o torrador mais recente possui uma evolução tecnológica que permite um aumento da eficiência energética. Esse torrador não liberta os gases diretamente pela chaminé após a oxidação térmica. Após a sua queima, os gases aquecem o lote seguinte de café verde a ser introduzido no tambor, já devidamente preparado e colocado numa câmara devidamente concebida para este pré-aquecimento (Fig. 1 - etiqueta R3).

Este pré-aquecimento do café verde tem vantagens e desvantagens. O consumo de combustível por tonelada de café diminui, o tempo no interior do torrador diminui também (porque a temperatura de entrada dos grãos é superior) e a produtividade da máquina aumenta, visto que o número de torras completas por hora aumenta. Por outro lado, para o sistema de pré-aquecimento operar, o fluxo de gás direcionado para o pós-queimador tem de ser constante e a quantidade de combustível necessária para aquecer a máquina e estabilizá-la para começar a produção também é superior.

2.4 Gases de chaminé dos torradores

Apesar das evoluções tecnológicas referidas na Secção 2.2, o torrador continua a libertar quantidades elevadas de gases na atmosfera a temperaturas superiores a 250 °C (no caso do torrador mais antigo, a temperatura do gás à saída da chaminé chega a ser superior a 350 °C). Este continua a ser o maior desperdício de energia na torrefação de café. Apesar do enorme potencial térmico destas correntes, continuam a faltar soluções para o seu aproveitamento.

Ao procurar soluções para este tipo de problemas, a primeira solução que é sempre procurada é a integração energética entre várias correntes processuais. Todavia, a fábrica não possui nenhuma corrente fria que necessite de aquecimento (a exceção é o próprio café verde, que é

aquecido no torrador), pelo que a integração energética com outras correntes do processo não parece praticável.

A segunda solução mais óbvia poderá ser a produção de alguma utilidade, que possa ser utilizada como fonte de energia para alimentar a fábrica. A hipótese mais atrativa é a cogeração que permite a produção de calor e eletricidade. A cogeração implica a produção de vapor pressurizado e a conjugação da temperatura com o calor disponível na corrente faz com que a quantidade de vapor produzida não seja suficientemente elevada para tornar a solução economicamente viável.

A utilidade que pode ser produzida em largas quantidades é, desse modo, a água quente. Uma solução para a produção de água quente (permutador de calor) exige um significativo investimento inicial, pelo que devem ser encontradas aplicações suficientes para essa mesma água quente.

Como as necessidades energéticas da fábrica para além dos torradores se resumem à eletricidade, uma solução que produzisse eletricidade a partir da água quente seria o mais adequado. A *Exergyn Drive* é um motor que opera a água quente e produz eletricidade (A new technology for cost effective low grade waste heat recovery, 2017).

Outro foco de estudo para uma eventual integração energética é a possibilidade de aquecimento do ar admitido nos queimadores. Os queimadores promovem a reação entre o combustível e ar, que está à temperatura atmosférica. A combustão do combustível liberta calor e, em sentido contrário, o aquecimento do ar até à temperatura do torrador consome calor. A possibilidade de reduzir a necessidade de aquecer o ar à entrada do queimador e, assim, evitar a necessidade de fornecer o calor necessário para aquecer o ar, pode levar à redução da quantidade de combustível necessária.

A situação mais adequada será a integração do maior número de soluções possíveis. Em todas elas, o ponto de partida é a água quente produzida a partir do efluente da chaminé, que será utilizada como fonte de energia. A partir da mesma tentar-se-ia obter energia elétrica, o aquecimento das águas sanitárias e aquecer o ar para os queimadores.

2.5 Consumo de gás natural na fábrica

O problema em análise no âmbito desta dissertação relaciona-se com o consumo de gás natural da fábrica do Porto da Nestlé. Os queimadores representam a grande maioria do consumo de gás natural da fábrica, mas não a totalidade. Há mais dois locais da fábrica que utilizam o gás natural como combustível.

Os colaboradores dispõem de balneários para se lavarem no final dos turnos. A água utilizada no balneário feminino é aquecida por um sistema de aquecimento de água solar, visto que a

sua quantidade é reduzida (as mulheres estão em larga minoria na fábrica) e um sistema desses é suficiente para corresponder às exigências. O balneário masculino necessita de muito mais água quente, a qual é aquecida num esquentador a gás natural.

Para a climatização da maioria dos gabinetes da fábrica, está também em funcionamento um sistema de climatização centralizada. A água em circulação para a climatização desses espaços é aquecida numa caldeira a gás natural.

A integração das soluções previstas na Secção 2.4 com estes equipamentos ou até a eliminação da necessidade dos mesmos também será alvo do estudo ao longo da presente dissertação.

3 Inventário dos Consumos

A redução dos consumos de gás natural fábrica pode ser obtida através do aproveitamento térmico dos gases da chaminé, cujo estudo é apresentado no Capítulo 4.

Por outro lado, a redução dos consumos pode também ser obtida após o estudo dos perfis de consumo da fábrica e atuação sobre os fatores explicativos. Por exemplo, este capítulo faz um estudo sobre as diferenças de consumo entre torradores diferentes (Secção 3.5) e isso pode ser aproveitado pela Nestlé para reprogramar a sua produção.

Assim, este capítulo pretende fazer um inventário dos consumos de gás natural da fábrica e determinar os seus fatores explicativos. Com isto, é esperado que a planificação da produção possa sofrer ajustes que resultem na redução do consumo de combustível na fábrica

3.1 Dados e Condições das medições

O consumo de gás natural na fábrica do Porto da Nestlé está dividido entre aquele que é consumido pelos torradores e o utilizado no funcionamento de uma caldeira para o aquecimento das águas sanitárias. O consumo da caldeira não chega a 1% do consumo total da fábrica.

A fábrica possui um contador geral, com um conversor para as condições de pressão e temperaturas normais (PTN). Este contador envia os dados diariamente para a operadora da rede de gás natural às 5 horas da manhã no verão e às 4 horas quando o horário de inverno está em vigor. Estas leituras são registadas e permitem saber o consumo diário de gás natural da fábrica completa. Para efeitos de análise histórica, é importante referir que a hora das leituras era às 0 horas de cada dia até ao dia 1 de novembro de 2015.

Os queimadores possuem cada um o seu respetivo contador. Esses contadores são cumulativos e não fazem registo temporal do consumo de gás. Na eventualidade de se querer saber o consumo num determinado período de tempo de um queimador individualmente, ter-se-ia de ler os valores do contador no início e no fim do intervalo e obter a respetiva diferença. Para além disso, a pressão de alimentação do gás natural à fábrica é diferente da pressão de operação dos queimadores. Os contadores dos queimadores encontram-se a jusante do manorredutor. O volume medido nos contadores dos queimadores deve, então, ser ajustado para comparações com os volumes medidos no contador geral.

A caldeira não possui nenhum contador de combustível. Para se calcular o consumo de combustível na caldeira, é necessário obtê-lo pela diferença entre o consumo total e o dos queimadores.

Para além das medições automáticas realizadas pelo operador de rede e partilhadas para estudo no âmbito do presente trabalho, foram realizadas outras medições, às quais está associado um maior erro. O consumo diário em cada queimador é obtido a partir da leitura dos respetivos queimadores no início do turno da manhã por um operador. Este valor é pouco exato porque não contempla as variações de pressão e temperatura de dia para dia e porque as leituras não são realizadas exatamente à mesma hora todos os dias.

Para ser estudado o consumo de gás por cada torra, foi necessário realizar leituras aos contadores dos queimadores do torrador em estudo, quer no início, quer no fim do ciclo de torra. Estes valores não são exatos porque os queimadores e contadores para um mesmo torrador estão separados fisicamente e a sua medição implicou uma deslocação entre leituras. Estas deslocações podem levar a leituras realizadas em alturas ligeiramente diferentes de um ciclo para outro.

3.2 Consumos entre 2014 e 2017

Partindo dos valores diários de consumo de gás natural da fábrica do Porto e sabendo a produção diária de café, é possível estimar o consumo de gás natural por tonelada de matéria prima, o café verde.

Não foi analisado o consumo por tonelada de café torrado, uma vez que o café perde aproximadamente 20% do seu peso durante o processo de torrefação. Como produtos diferentes têm variações de peso diferentes no torrador, como pode haver desperdícios na embalagem do café torrado e porque o material processado no torrador é o café verde, usou-se o seu peso como base para a análise do consumo.

A unidade de energia utilizada foram os quilogramas equivalentes de petróleo (kgep) para ser possível uma comparação com diferentes formas de energia, caso esse estudo seja realizado no futuro.

Em 2013, foi instalado o torrador mais recente da fábrica (torrador 1). Aquando dessa instalação, a fábrica passou a contar com 3 torradores em funcionamento. Entre os 3 torradores, apenas o torrador 1 possuía o sistema de pré-aquecimento dos grãos de café verde, sendo o mais evoluído tecnologicamente e o mais eficiente energeticamente. Os outros 2

torradores, apesar de idênticos a nível de operação e tecnologia tinham capacidades nominais diferentes.

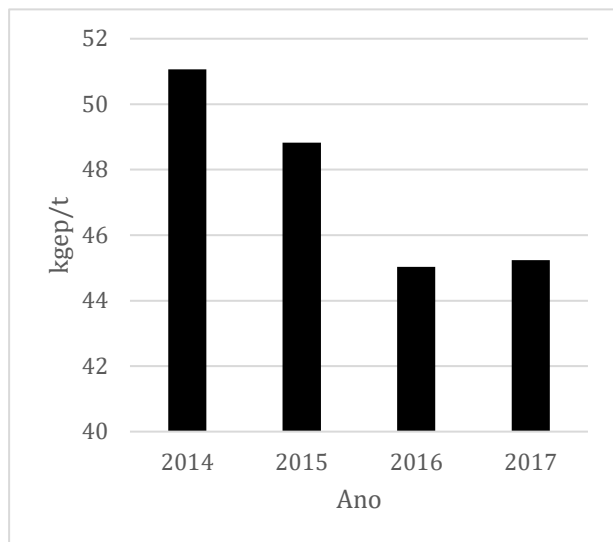


Figura 2 - Consumo de energia primária equivalente por tonelada de matéria prima por ano.

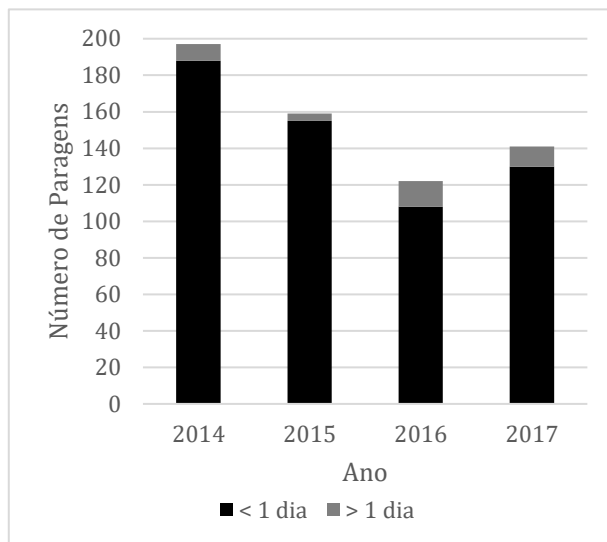


Figura 3 - Número de paragens no torrador 1 com duração superior a 1 h.

Tabela 1 - Consumo de gás natural e produção de café anuais.

Ano	Consumo (tep)	Peso Café verde (t)				Consumo por tonelada (kgep/t)
		Torrador 1	Torrador 2	Torrador 3	Total	
2014	525,1	5751,1	780,5	3751,8	10283	51,1
2015	513,0	6837,3	0	3669,4	10507	48,8
2016	508,2	7083,0	0	4202,3	11285	45,0
2017	499,9	6675,2	0	4375,4	11051	45,2

Como a capacidade dos 3 torradores excedia as necessidades de produção da fábrica e a capacidade dos 2 torradores de maior capacidade era suficiente para cobrir essas mesmas necessidades, o torrador de menor capacidade (torrador 2) foi desinstalado no final do ano 2014 (Tabela 1). Este último facto, associado à menor percentagem de café torrado no torrador mais eficiente (Tabela 1), explica a queda no consumo entre 2014 e 2015 (Fig. 2).

Após a instalação do torrador 1, a produção continuou a ser distribuída quase equitativamente entre todos os torradores: a única preferência era a utilização dos torradores de maior capacidade, sendo utilizado o torrador de menor capacidade para semanas de maior produção. Com o decorrer dos anos, a produção começou a ser crescentemente direccionada para o torrador 1.

Essa tendência pode ser verificada entre 2014 e 2016 na Tabela 1, mas a política da empresa continua a manter-se. A razão para a menor produção no torrador 1 em 2017 deve-se ao maior número de paragens (Fig. 3) e quantidade de tempo sem produzir das mesmas. Por comparação

com os anos de 2014 e 2015, as paragens passaram a ser provocadas por avarias e manutenções, enquanto muitas delas se deviam ao planeamento e distribuição da produção até aí (até 2015).

Na Fig. 3 não foram contabilizadas as paragens inferiores a 1 h. Estas paragens mais curtas não têm uma duração suficiente para um arrefecimento da máquina significativo, que implique um aquecimento do torrador muito demorado e muito consumidor de energia. As paragens de duração superior a 24 horas estão com uma cor distinta, porque, em geral, não podem ser evitadas, já que se devem sobretudo a feriados e manutenções programadas e obrigatórias. Os fins de semana foram retirados desta análise.

Juntando estes factos, é possível justificar a evolução entre 2015 e 2016. O número de paragens no torrador 1 baixou significativamente. De 2016 para 2017, o consumo por tonelada, apesar de muito semelhante, sofreu um ligeiro aumento. Isto pode ser explicado pelo maior número de paragens no torrador 1 (Fig. 3) e também pela produção no torrador 1 ter baixado e representar uma menor percentagem da produção total da fábrica.

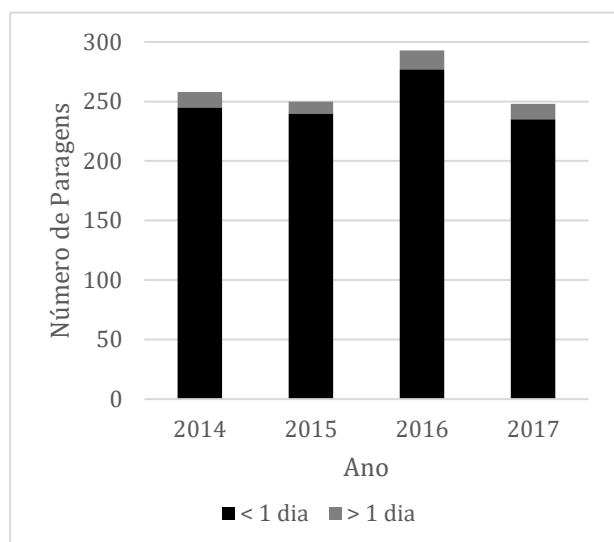


Figura 4 - Número de paragens no torrador 3 de duração superior a 1 h.

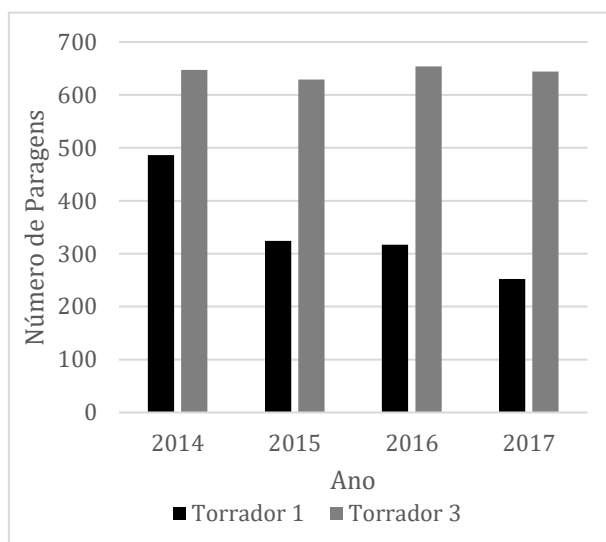


Figura 5 - Número total de paragens nos torradores 1 e 3 por ano.

As diferenças na distribuição da produção e no número de paragens no torrador entre 2016 e 2017 não significam uma maior diferença no consumo porque há outros fatores a ter em consideração e que têm influência no consumo. O número de paragens superiores a 1 hora no torrador 3 em 2016 foi claramente superior ao de anos anteriores (Fig. 2) e isso também faz subir o consumo de combustível em 2016. Para explicar a diferença de consumo entre 2015 e 2017, a Fig. 5 tem informação útil. Enquanto o número total de paragens no torrador 3 se

mantém aproximadamente constante, o número total de paragens no torrador 1 tem diminuído todos os anos.

3.3 Consumo ao longo do ano

Ao longo do ano, o consumo por tonelada de café verde oscila de mês para mês. Nos meses mais frios, de inverno, o consumo é superior e nos meses de verão o consumo é tendencialmente inferior (Fig. 6).

A Fig. 6 mostra a média do consumo ao longo de cada mês desde o início de 2014 até abril de 2018. É possível comparar meses de anos diferentes e ainda ver a tendência global com o valor médio dos 5 anos.

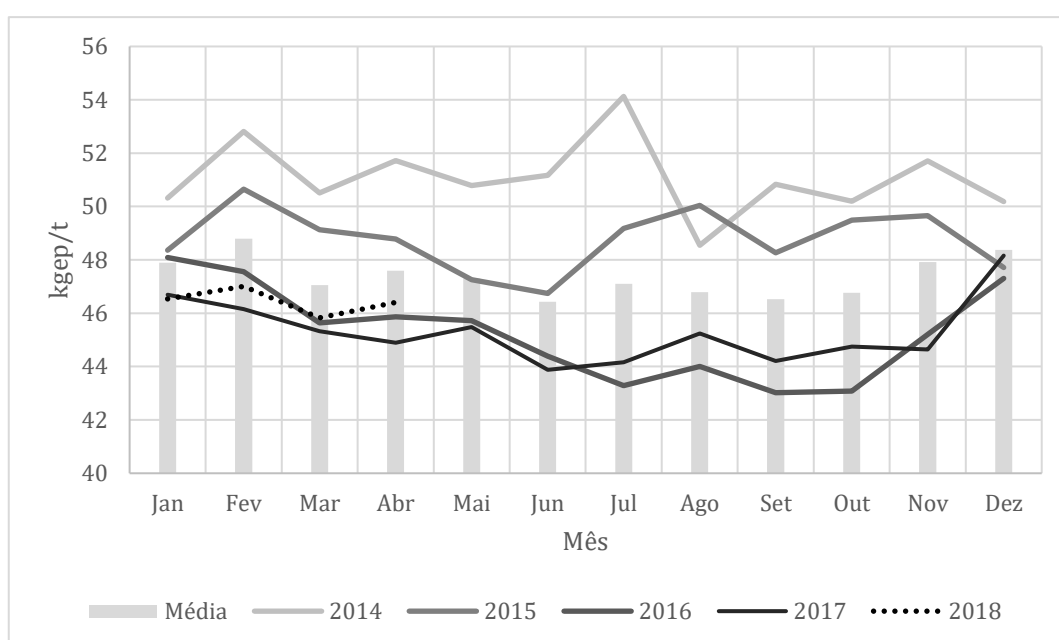


Figura 6 - Evolução do consumo de gás por tonelada de café verde ao longo do ano.

O maior consumo no inverno pode ser justificado por três motivos em simultâneo. A menor temperatura ambiente exige um maior consumo de gás para o aquecimento da corrente de ar admitida nos queimadores; a água utilizada nos balneários e aquecida na caldeira chega à fábrica a uma temperatura inferior e necessita de maior potência para o seu aquecimento e a potência necessária para a climatização dos edifícios (aquecimento) é superior. Os últimos dois fatores têm influência nos valores apresentados na figura, uma vez que o consumo de gás utilizado é o valor global da fábrica.

Tal como referido na Secção 3.2, é possível verificar o decréscimo do consumo ao longo dos anos, mantendo-se a tendência ao longo de um ano semelhante de ano para ano. Não deixam de haver algumas situações pontuais que diferem da tendência geral dos anos. Por exemplo, os meses de julho de 2014 ou agosto de 2015 são casos exemplares disso mesmo.

Como o âmbito desta dissertação é bastante mais alargado, não se procedeu à análise exaustiva de todos estes casos particulares. Questões como a realização de ensaios ou manutenção dos torradores, investimentos em outras áreas da fábrica, cortes ou aumentos na produção ou meses excecionalmente quentes ou frios podem explicar cada uma das variações no consumo mensal de combustível.

3.4 Consumo ao longo da semana

Ao longo da semana, o consumo de combustível por tonelada de café verde também sofre variações com o decorrer da mesma. A fábrica encerra aos fins de semana e feriados, sendo exceções os dias em que a produção durante a semana tenha ficado aquém do pretendido. Nesses casos, a produção pode estender-se pelo fim de semana para suprir as necessidades produtivas da fábrica do Porto da Nestlé.

Havendo essa dicotomia entre dias com produção e dias sem produção, as Fig. 7 e 8 mostram o consumo por tonelada de café verde por dia da semana e por dia da semana com produção (excetuando domingos), respetivamente.

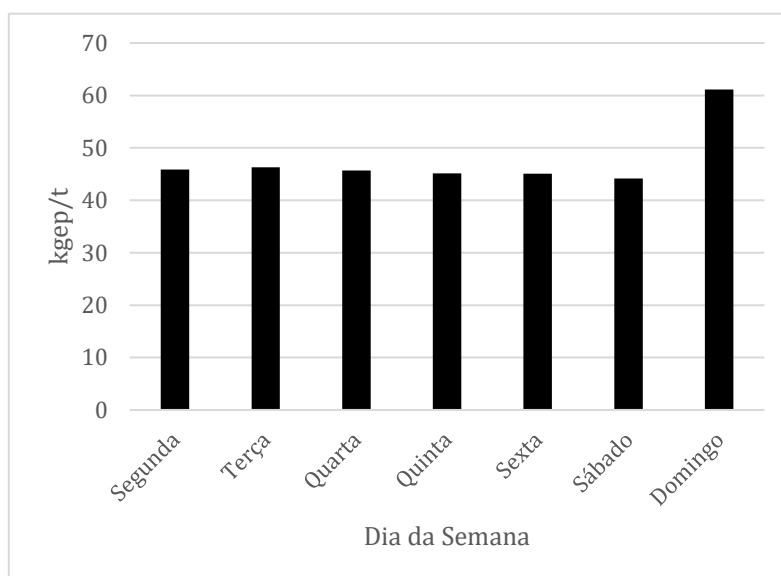


Figura 7 - Consumo de gás natural por tonelada de café verde por dia da semana com torrefação.

No consumo de domingo estão contabilizadas as primeiras horas da madrugada de segunda-feira (Secção 3.1). Ou seja, o arranque dos torradores e da fábrica, à meia-noite de domingo para segunda, e as primeiras torras após o fim de semana são contabilizadas, para efeitos de

consumo, como sendo efetuadas ao domingo. Isso justifica o maior consumo ao domingo, presente na Fig. 7.

A informação presente na Fig. 7 e o consumo verificado aos domingos sustentam a hipótese apresentada na Secção 3.2. Primeiro, o arranque dos torradores consome combustível (dado adquirido) e esse consumo não é insignificante no consumo global da máquina. Segundo, as primeiras torras após o arranque apresentam maiores consumos por tonelada de matéria prima. Estes dois consumos excepcionais justificam a diferença de consumo presente na Fig. 7 do domingo para o resto da semana e a base da justificação apresentada na Secção 3.2.

A informação presente na Fig. 7 não permite uma análise detalhada da evolução do consumo no resto da semana. A escala do gráfico precisa de ser ampliada para uma melhor comparação entre os restantes dias. Esse motivo está por trás da execução da Fig. 8, cuja interpretação é facilitada com a análise conjunta da Fig. 9 e Tabela 2.

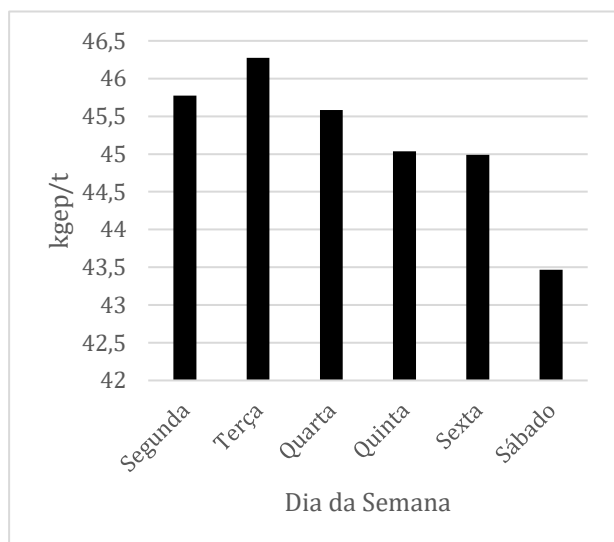


Figura 8 - Consumo de gás natural por tonelada de café verde por dia da semana.

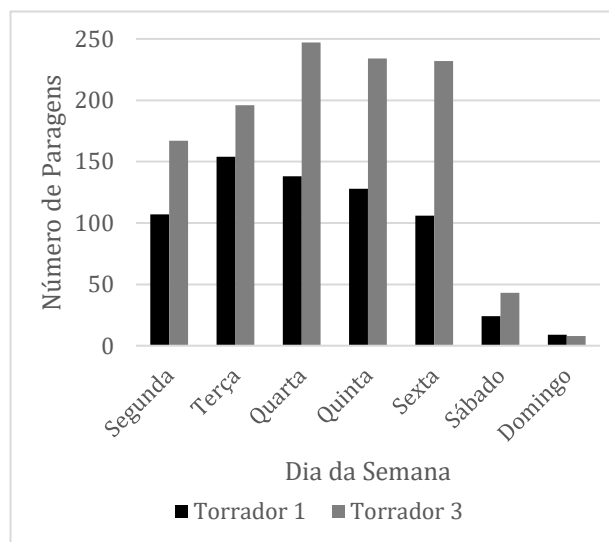


Figura 9 - Número de parágrafos superiores a 1 hora por torrador por dia da semana (excluindo fins de semana).

Mais uma vez se confirma que o consumo de gás natural sofre oscilações semelhantes ao número de parágrafos de duração superior a 1 hora no torrador 1. Isto corrobora novamente a tese de que o número de parágrafos e, por consequência, de arranques está intimamente relacionado com o consumo de gás por tonelada de café verde.

Outro dado que deve ser tido em conta para perceber a evolução do consumo ao longo da semana está contemplado na Tabela 2. A distribuição da produção ao longo da semana entre

torrador 1 e 3 também varia ao longo da semana. A Tabela 2 tem a quantidade de café verde que é torrado em cada torrador em cada dia da semana.

Tabela 2 - Produção por torrador e por dia da semana.

Dia da semana	Café verde (t)			Percentagem de café no torrador 1
	Torrador 1	Torrador 2	Torrador 3	
Segunda	5562,7	152,8	3514,1	60,27%
Terça	5130,4	197,3	3545,6	57,82%
Quarta	5575,3	209,7	3337,4	61,12%
Quinta	5740,6	130,3	3199,5	63,29%
Sexta	5059,3	85,2	2877,1	63,07%
Sábado	1072,7	5,2	471,9	69,22%
Domingo	533,6	0	0	60,80%

No início da semana, por defeito, ambos os torradores operam na sua capacidade nominal. Com o avançar da semana, é frequente a capacidade dos torradores ser superior às necessidades de produção da fábrica. Caso isso se verifique e caso a operação de um torrador apenas seja suficiente, o torrador 3 é desligado e o torrador 1 passa a operar isoladamente. Daí que a fração do total de café torrado da fábrica torrada no torrador 1 aumente ao longo da semana de terça até sábado.

É o conjunto entre o número de paragens quase nulas ao sábado (em geral, se o torrador for forçado a parar um sábado, a produção é adiada para a semana seguinte) e a maior percentagem de café torrado no torrador 1, mais eficiente, que explica a grande diferença no consumo de sexta para sábado.

Em sentido contrário, à segunda-feira, o torrador 3 torra menor quantidade de café, uma vez que limitações na disponibilidade, abastecimento e ensilagem de café verde faz com que a matéria prima disponível no início da semana não seja, por vezes, suficiente para alimentar os dois torradores.

Este dado aliado ao maior número de paragens à terça-feira é o motivo pelo qual o consumo à terça-feira é superior face ao consumo verificado à segunda-feira. Apesar da segunda-feira incluir muitas vezes o arranque da fábrica (até 1 de novembro de 2015, o arranque era contabilizado à segunda e não ao domingo) e de os torradores poderem não estar ainda estáveis no início do dia, isso não é suficiente para contrariar os efeitos provocados pelas situações descritas anteriormente.

3.5 Comparação entre torradores

Tal como referido na Secção 3.1 são efetuadas todas as manhãs leituras aos contadores de gás natural de cada queimador. Essas leituras começaram a ser efetuadas no dia 26 de fevereiro de

2018. Os resultados apresentados abaixo baseiam-se nas leituras efetuadas desde esse dia até ao dia 14 de junho de 2018.

O pós-queimador do torrador 3 não foi instalado com um contador dedicado. A instalação do contador neste queimador foi efetuada no fim de semana de 3 e 4 de março de 2018. Assim, as diferenças entre o consumo global no torrador e a soma dos consumos de cada queimador individualmente devem-se à diferença do intervalo de tempo da análise de cada queimador.

Os contadores fornecem resultados em metros cúbicos nas condições de pressão e temperatura do gás. Visto que a temperatura do combustível e a pressão de abastecimento sofre ligeiras alterações, assim como o poder calorífico inferior (PCI) do gás distribuído, a conversão para toneladas equivalentes de petróleo (tep) foi efetuada a partir de valores médios de temperatura, pressão, massa volúmica e PCI.

A Tabela 3 apresenta os valores médios de temperatura do gás, pressão, PCI, um fator de conversão e massa volúmica. A Tabela 4 apresenta os valores médios de consumo de combustível por cada queimador e por cada torrador.

Tabela 3 - Propriedades do gás natural abastecido à fábrica do Porto da Nestlé (Galp, 2018).

Temperatura	Pressão	PCI	Fator de Conversão	Massa volúmica
15 °C	270 mbarg	10,58 kWh/m ³ N	1,20 m ³ N/m ³	0,80 kg/m ³ N

A temperatura do gás natural é um valor médio daqueles que se verificam na fábrica. Em dias de inverno, a temperatura chega a ser inferior a 10 °C e ultrapassa os 20 °C nos dias de verão. Como a temperatura não é monitorizada diariamente, usou-se como referência os últimos testes e análises realizados pelos técnicos dos queimadores, onde a temperatura média do combustível é de 15 °C. Nesses mesmos testes é também medida a pressão relativa do gás que chega aos contadores. Estes valores permitem calcular o fator de conversão entre o volume medido nas condições de temperatura do gás natural e o volume corrigido para as condições PTN.

O PCI do gás é o valor médio do poder calorífico superior (PCS) do gás natural abastecido pela Galp à fábrica do Porto subtraído do calor latente da água. A massa volúmica também é a massa volúmica média de todo o gás natural abastecido pela Galp em território nacional, sendo pesada tanto a parte transportada por gasoduto como a transportada por via marítima.

Tabela 4 - Consumo por tonelada de café verde em cada queimador.

	Torrador 1			Torrador 3		
	Queimador principal	Pós Queimador	Total	Queimador principal	Pós Queimador	Total
m ³ /t	19,92	19,21	39,13	26,85	18,70	45,50
kgép/t	22,0	21,3	43,3	29,7	20,7	50,3

A Tabela 4 apresenta os valores de consumo de gás natural médios em cada torrador e a sua divisão por cada queimador. O valor medido é o volume do gás que é convertido em kgep a partir dos valores presentes na Tabela 3. Estes valores são os consumos médios desde 26 de fevereiro, com a exceção do pós-queimador do torrador 3, cujo consumo só começou a ser contabilizado a 5 de março. O escasso desvio entre o consumo total do torrador 3 e a soma dos consumos individuais dos queimadores está ligado a esta diferença no intervalo de amostragem.

O queimador principal de cada torrador é o responsável por aquecer o ar que aquece o tambor do torrador. Como essa corrente de ar é praticamente constante ao longo do tempo e a temperatura pretendida para essa mesma corrente não sofre grandes alterações ao longo do tempo, o esperado é que o consumo nos queimadores principais seja idêntico entre os dois torradores por unidade de tempo.

O torrador 1 tem o sistema de pré-aquecimento de café verde e, por consequência, o seu tempo de ciclo de torra é mais curto. Assim sendo, no mesmo intervalo de tempo, o torrador 1 é capaz de torrar mais café. Logo, a diferença entre o consumo no queimador principal do torrador 1 e o do torrador 3 reproduz aquilo que era já esperado.

Nos pós queimadores, apesar da sua funcionalidade primária ser a mesma (o tratamento dos efluentes gasosos do tambor), o pós-queimador do torrador 1 também é responsável pelo pré-aquecimento do café verde antes de este entrar no tambor. A nível de operação os dois queimadores em questão acabam por ter ciclos de operação distintos.

No torrador 3, o pós-queimador apenas opera quando há necessidade de tratamento da corrente gasosa. Na fase inicial do processo de torra, há libertação de vapor de água dos grãos de café, não havendo lugar a qualquer reação química. Nessa fase, o pós-queimador está desligado. Com o avançar da torra e o aumento da temperatura no interior do tambor, as reações químicas no interior do grão de café são iniciadas e começa a libertação de gases, cuja quantidade libertada é sempre em crescendo com o subir da temperatura. O queimador entra em funcionamento nesse ponto do ciclo de torra e a sua potência é ajustada face às necessidades; isto é, quanto mais forem os gases libertados e a tratar, maior a potência de funcionamento do queimador.

O torrador 1, por sua vez, para garantir o pré-aquecimento dos grãos de café verde está sempre em funcionamento. A sua potência é, porém, muito superior à necessária para esse processo de pré-aquecimento. Dessa forma, a potência também é ajustada às necessidades do tratamento da corrente gasosa, mas o queimador não chega a ser desligado. Por outro lado, com o pré-aquecimento do café verde, a temperatura no interior do tambor não baixa tanto como no torrador 3 e o início das reações químicas e libertação de gases acontece muito pouco tempo depois da entrada do café verde no tambor.

O maior consumo no pós-queimador do torrador 1 que é apresentado na Tabela 4 vai de encontro ao explicado nos parágrafos anteriores. A mesma tabela mostra que o consumo total no torrador 1 é inferior ao torrador 3.

A Tabela 5 apresenta a comparação entre os consumos em cada torrador, mostrando o consumo em excesso do torrador 3 face ao torrador 1 e a poupança do torrador 1 em relação ao torrador 3, percentualmente.

Tabela 5 - Diferença entre os consumos de cada torrador por cada queimador.

	Queimador principal	Pós Queimador	Total
Excesso	34,78%	- 2,67%	16,28%
Poupança	25,81%	- 2,75%	14,00%

Na Tabela 5, os valores são obtidos pela razão entre as diferenças de consumo e o consumo no torrador 1 para a linha “excesso” e o consumo no torrador 3 para a coluna “poupança”. Assim, se se optar pelo torrador 3, em detrimento do torrador 1, o consumo no queimador principal será 31,08% superior em comparação. Por outro lado, caso se opte pelo torrador 1 em detrimento do outro, a poupança de combustível no torrador será de 12,31%.

O consumo no pós-queimador do torrador 1 é 2,89% superior ao consumo no pós-queimador do torrador 3. Tal como previsto acima, o consumo é menor no torrador 3, mas a maior capacidade e produtividade do torrador 1 justifica que o consumo por tonelada processada seja quase idêntico.

A nível global, a poupança obtida quando se utiliza o torrador 1 ascende a 12%. A fabricante afirma que a poupança pode chegar até a 20%. Esse valor até pode ser real, caso se comparem as duas máquinas em funcionamento sob determinadas condições. Contudo, como já foi referido acima há consumos relacionados com o arranque da máquina, manutenções, limpezas térmicas, entre outros que não podem ser eliminados num ambiente real, quando a fábrica está a trabalhar. Esta análise, feita sem descriminar os consumos que não estão diretamente ligados à torrefação, tem uma aplicabilidade maior no mundo industrial.

4 Aproveitamento do calor dos gases de chaminé

4.1 Caracterização

Nos capítulos anteriores descreveu-se o projeto e os consumos de combustível na fábrica. Também foi referido que uma quantidade de energia consumida é desperdiçada sob a forma de calor através dos gases das chaminés. Para se qualificar e quantificar esse calor perdido e desperdiçado é necessário caracterizar cada uma das correntes que sai da chaminé de cada torrador.

A fábrica não possui qualquer equipamento de análise de gases nem faz qualquer tipo de monitorização aos gases que saem pelas chaminés. A exceção é no controlo da concentração de CO, que é monitorizado por um medidor dedicado. Esse medidor faz as medições para, estando interligado com o pós-queimador, ajustar a potência do mesmo e evitar que a concentração do poluente atinja valores acima do permitido por lei.

Legalmente, contudo, a fábrica é obrigada a analisar os seus efluentes gasosos periodicamente. Os gases libertados pelas chaminés são abrangidos por essa necessidade. Essas análises são realizadas a cada chaminé individualmente da fábrica e permitem saber a composição caudal e temperatura dos gases em cada torrador individualmente.

As últimas análises realizadas aos efluentes gasosos da fábrica do Porto da Nestlé datam de julho de 2017. A partir do relatório dessas análises é possível fazer a caracterização dos gases de cada torrador. A Tabela 6 apresenta a caracterização física da corrente e a Tabela 7 apresenta a composição de cada corrente.

Tabela 6 - Caracterização física dos gases de chaminé de cada torrador.

	Temperatura (°C)	Pressão (kPa)	Caudal Húmido (m³/h)	Caudal Seco (m³N/h)	Massa Volúmica (kg/m³)
Torrador 1	272	101	13033	5798	0,619
Torrador 3	369	101	6133	2029	0,505

Os valores presentes na Tabela 6 são exatamente iguais aos da análise efetuada em julho de 2017. Devem, no entanto, ser contextualizados para poderem servir de referência no futuro. A temperatura é medida no ponto de análise (no topo da chaminé) e, como tal, não representa a temperatura dos gases à saída do pré-aquecedor (no torrador 1) ou do pós-queimador (no

torrador 3). Assim, para efeitos do reaproveitamento do calor disponível na corrente gasosa, a temperatura da corrente é superior à mencionada.

O caudal seco é apresentado para eliminar os efeitos da elevada quantidade de vapor de água libertado na torrefação e a unidade escolhida é para permitir uma comparação entre caudais livre do efeito da pressão e temperatura sobre a massa volúmica dos gases. A massa volúmica é medida nas condições de análise.

Tabela 7 - Composição química das correntes gasosas das chaminés.

	Torrador 1	Torrador 3
Concentração O₂	17,88%	13,92%
Concentração CO₂	1,74%	3,84%
Concentração N₂	69%	59%
Humidade	10,78%	21,85%
Concentração CO	333,7 mg/m ³ N	2466,1 mg/m ³ N
Concentração NO_x	40,2 mg/m ³ N	99,5 mg/m ³ N
Massa Molar Gás Seco	29,00 kg/kmol	29,18 kg/kmol

A Tabela 7 apresenta os valores de concentração dos vários componentes tal como apresentados no relatório da análise aos efluentes gasosos. A única exceção é o valor da concentração de N₂.

A concentração de N₂ em ambas as chaminés foi obtida por diferença entre o volume total de gás libertado e o de cada componente através de um simples balanço de massa. Considerou-se que os outros poluentes não medidos ou analisados têm uma concentração tão baixa que pode ser desprezada, tal como a concentração de outros inertes presentes no ar atmosférico. Este valor é, necessariamente, menos preciso.

Tanto a Tabela 6 como a Tabela 7 apresentam alguns resultados assinaláveis. Em primeiro lugar, o caudal de gases libertado pela chaminé do torrador 1 é superior ao dobro daquele do torrador 3. Depois, a concentração dos gases poluentes é sempre inferior a metade no torrador 1, sendo inferior a um quinto no caso do CO. Por fim, a concentração de O₂ e N₂ é superior no torrador 1 em relação ao torrador 3.

Estes resultados têm vários significados. Fica comprovado que o torrador 1, mais recente, é mais eficaz no tratamento dos gases, libertando, pela chaminé, uma corrente de gases menos contaminada. Para além disso, estando o caudal relacionado com a quantidade de gases libertado na torrefação e o funcionamento dos queimadores, o maior caudal de gás do torrador 1 é uma consequência da maior capacidade produtiva desta máquina. Por último, as menores

concentrações de N_2 e O_2 no torrador 3 significam que há um menor excesso de ar neste torrador. Isto é, sendo o oxigénio um reagente da combustão e sendo libertado em menores quantidades pela chaminé, isso significa que houve a admissão de um menor excesso de ar neste torrador face à estequiometria da reação. Em simultâneo, a menor concentração de inertes significa que uma maior proporção dos gases libertados pela chaminé é proveniente dos gases libertados na queima e na torrefação e não no caudal de ar alimentado.

4.2 O Processo da Exergyn Drive

A Exergyn é uma empresa de pequena dimensão com sede na Irlanda e com uma tecnologia inovadora para a produção de eletricidade a partir de água quente. Os estudos mais recentes afirmam que 72% do consumo de energia primária a nível global é perdido após a sua conversão. Desta quantidade, 63% são correntes que são desperdiçadas por estarem a temperaturas inferiores a 100 °C (Langan e O'Toole, 2017).

O fenómeno científico que permite o funcionamento do *Exergyn Drive* é efeito de memória de forma, que permite ao material de voltar ao seu estado inicial após ser sujeito a uma deformação (Rocha et al., 2012). Certas ligas com efeito de memória de forma (LEMF), quando aquecidas, contraem e voltam a expandir quando arrefecem novamente. Neste caso, uma liga metálica composta por níquel e titânio, o Nitinol, quando aquecida, sofre uma mudança de estado em fase sólida de martensite para austenite. A transformação inversa ocorre quando o material é arrefecido. O ciclo de aquecimento/arrefecimento de uma LEMF está representado na Fig. 10.

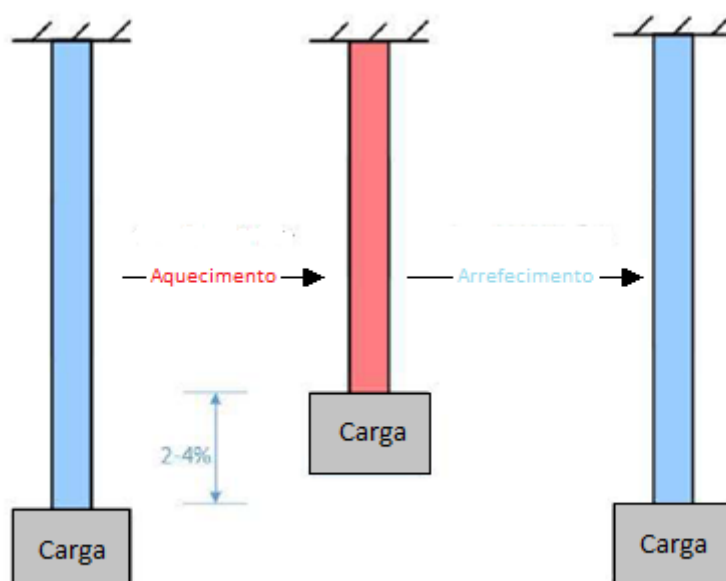


Figura 10 - Ciclo de aquecimento/arrefecimento de uma LEMF (Langan e O'Toole, 2017).

A diferença de tamanho na ordem dos 2% a 4% permite o movimento linear de um pistão. O trabalho linear desse pistão é convertido num movimento de rotação através de um sistema de transmissão e esse movimento de rotação é utilizado para produzir eletricidade a partir de um gerador (Langan e O'Toole, 2017). O ciclo térmico do núcleo de uma unidade de *Exergyn Drive* está esquematizado na Fig. 11.

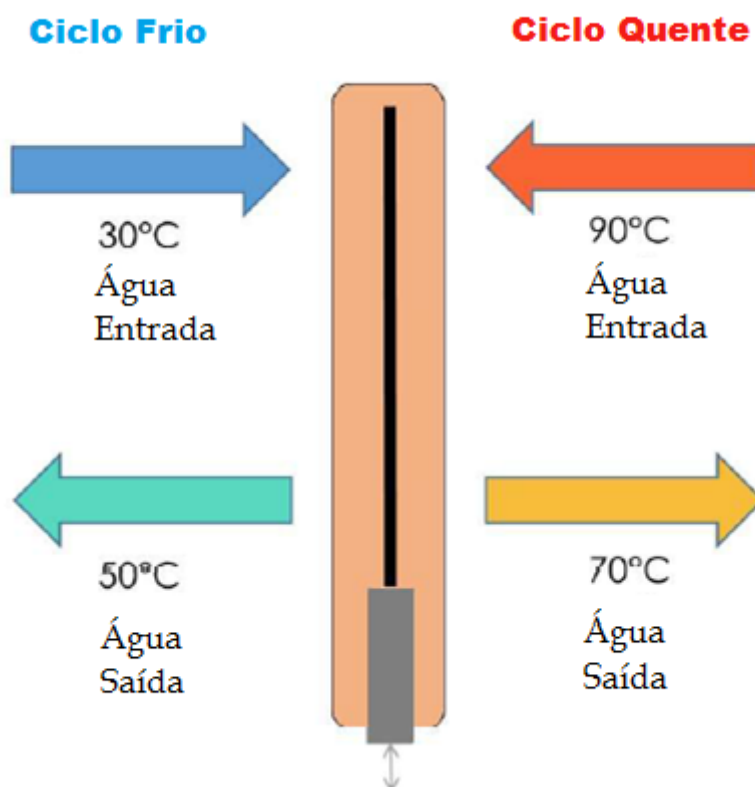


Figura 11 - Ciclo térmico do núcleo da *Exergyn Drive* (Langan e O'Toole, 2017).

Foram estabelecidos contactos com a empresa proprietária desta tecnologia. Questões sobre o funcionamento do equipamento e sobre a respetiva avaliação económica e viabilidade foram abordadas. A Tabela 8 apresenta uma avaliação económica já aplicada às condições presentes na fábrica.

Tabela 8 - Dados de operação e instalação de um módulo de *Exergyn Drive*.

Custo de Instalação	28630 €	Horas de Operação anuais	4377 h
Custo de Manutenção	40082 €	Potência Produzida	10 kW
Tempo de Vida	20 anos	Caudal de Água	6 L/s
Preço	0,0966 €/kWh	Eletricidade Produzida	44 MWh/ano

Os custos de instalação e manutenção são os previstos pela empresa, representando o custo de manutenção, todos os custos associados à manutenção do módulo durante o seu tempo de vida

previsto (Langan e O'Toole, 2017). O custo de manutenção é dominado pelas substituições dos núcleos de LEMF necessárias. A empresa estima 2 substituições para o período de 20 anos. O custo de instalação inclui todos os custos com equipamentos acessórios (válvulas, por exemplo) e ainda um permutador de calor para arrefecer a corrente de água que circula no circuito de arrefecimento no equipamento (Fig. 11 - Ciclo Frio). O custo da instalação não contempla, contudo, o permutador de calor ar-água para a produção de água quente a partir dos gases da chaminé.

O preço da eletricidade é um valor médio que a Nestlé paga por kWh. O contrato realizado com a distribuidora contempla preços diferentes para diferentes horários, com o compromisso de a eletricidade fornecida ser de origem totalmente renovável. Esse valor foi calculado a partir das faturas da eletricidade de abril e maio de 2018 e os respetivos consumos de eletricidade da fábrica. Apenas foram considerados no cálculo da eletricidade os custos dependentes do consumo de eletricidade, não tendo sido contemplados os termos de potência.

A empresa tem como ponto de operação a produção de 10 kW de eletricidade a partir de 6 L/s de água a 90 °C. É possível a operação do gerador com menor caudal de água, sendo a produção menor também. A empresa não partilhou dados sobre a potência produzida em função do caudal de água, garantindo apenas que a nível de investimento este ponto de operação é o mais atrativo. A empresa também não forneceu dados quanto à produção de eletricidade a partir de um maior caudal. A única garantia dada é que a relação não é linear; isto é, o dobro do caudal não significa o dobro da potência. Isso significa que, idealmente, o caudal de 6 L/s deve ser mantido, sendo possível o seu funcionamento com caudais diferentes, caso seja necessário.

A eletricidade produzida anualmente é calculada a partir do número médio de horas de operação anuais de cada torrador e do caudal de água quente produzido a partir dos gases de chaminé. Esse número de horas de operação foi calculado a partir do número de torras médio em 2016 e 2017 e o tempo de ciclo de torra médio para cada torrador. A água quente é produzida em permutadores dimensionados na Secção 4.5.

4.3 Águas Sanitárias e Aquecimento Central

O consumo de água da fábrica é controlado através de leituras diárias aos 5 contadores existentes na fábrica. Os contadores estão distribuídos pelos torradores, hidrantes de incêndio, a rede de carretéis de incêndio e contador geral da fábrica.

A água é utilizada na torrefação para interromper o processo e em situações de emergência. Quando a temperatura atinge o valor pretendido para o final da torra, é injetada água no torrador para fazer baixar essa mesma temperatura e interromper as reações químicas no interior do torrador instantaneamente, parando o processo de torra. Por outro lado, caso haja

um foco de incêndio ou até uma subida brusca da temperatura na máquina descontrolada, são ativados os protocolos de segurança de ataque e prevenção de incêndios, inserindo água na máquina em vários pontos da máquina. A água destinada à torrefação não necessita de aquecimento e o seu consumo mensal ronda os 100 m³.

A rede de incêndio da fábrica não tem qualquer consumo constante. Os consumos de água na rede de incêndio restringem-se à eventualidade de um acidente ou em verificações pontuais da rede de incêndio.

A água destinada aos serviços sociais da fábrica tem 3 finalidades diferentes. Em primeiro lugar, o balneário masculino onde os colaboradores podem tomar banho no final dos seus turnos, caso o desejem. O balneário feminino, por outro lado, tem uma solução de aquecimento de água solar. Em segundo lugar, os lavatórios da fábrica também têm água quente disponível para a lavagem das mãos. Por fim, certas zonas das instalações têm já um sistema de aquecimento central instalado. A água consumida nestes locais é calculada pela diferença entre o consumo geral da fábrica e os restantes consumos descritos anteriormente. Não há distinção entre consumo de água quente e fria.

A Tabela 9 apresenta o volume médio mensal de água consumida na fábrica, dividida entre consumo geral, consumo destinado à torrefação e consumo destinado aos serviços sociais da fábrica. A tabela está dividida em 2, uma vez que são realizadas limpezas ao exterior periodicamente. Como essas limpezas podem representar um aumento do consumo no final do mês superior a 15% e não há necessidade de aquecimento dessa água, foram calculados os consumos, excluindo esses meses também.

Tabela 9 - Consumo de água mensal na fábrica do Porto da Nestlé (valores em m³).

		Consumo Geral	Torrefação	Serviços Sociais
Incluindo Meses com Limpeza Exterior		232,8	104,6	128,2
Excluindo Meses com Limpeza Exterior	Total	227,2	105,7	121,5
	Meses de Inverno	231,9	110,5	121,4
	Meses de Verão	221,9	100,3	121,6

Os meses considerados como inverno na Tabela 9 são os meses de outubro a março e os meses de abril a setembro foram considerados como verão. Entre os meses de verão e de inverno não há uma diferença significativa no consumo de água nos serviços sociais da fábrica. Isso justifica-se por neste consumo não estarem contemplados gastos sazonais. Os banhos, higienização das mãos e limpeza das instalações são constantes ao longo do ano. O único consumo sazonal de

água é o relacionado com o aquecimento central, mas a água circula em circuito fechado e, como tal, o seu caudal não é visível nas leituras do contador.

A nível energético, nem o esquentador utilizado para o aquecimento das águas balneares, nem a caldeira do sistema de climatização têm contadores de gás.

Poder-se-ia tentar estimar o consumo de gás natural desses equipamentos por diferença entre o consumo global da fábrica e o consumo de gás nos torradores. Todavia, a temperatura e pressão do gás à entrada na fábrica e nos queimadores é diferente. Como o volume medido nos contadores não é normalizado e não há registos das temperaturas e pressão em cada ponto da fábrica, não é possível fazer a normalização do volume de gás nos queimadores.

Estimou-se, assim, o consumo de gás destas duas unidades de outra forma. A partir do manual de operação do esquentador obtiveram-se os dados para a capacidade dos esquentadores, consumo de gás e tempo de aquecimento. Estimou-se que o volume de água quente utilizada para os banhos no final do turno é igual à capacidade dos esquentadores. Como a fábrica tem 2 esquentadores, pressupõe-se que a capacidade dos esquentadores instalados foi projetada para ser suficiente para a água que é consumida. A Tabela 10 apresenta os dados técnicos dos esquentadores, assim como uma estimativa do consumo de gás natural dos mesmos.

Tabela 10 - Consumo de combustível e dados técnicos dos esquentadores.

Dados Técnicos dos Esquentadores		Operação dos Esquentadores		
Número de Esquentadores	2	Volume de água	1590 L/dia	
Capacidade	265 L (cada)	Tempo de funcionamento	336 min/dia	
Consumo de Gás Natural*	2,2 m ³ /h	Consumo de Gás Natural*	Diário	24,64 m ³ /dia
Tempo de Aquecimento	56 min		Mensal	542 m ³ /mês

* - Volume de gás natural medido a 15°C e 101 kPa

Os 2 esquentadores têm uma capacidade de 265 L de água cada um. Os 1590 L de água consumidos por dia correspondem à capacidade dos esquentadores a ser esgotada nos 3 turnos diários da fábrica. O tempo de funcionamento é igual ao tempo necessário para aquecer o volume de água consumido diariamente e o consumo de gás natural diário é obtido a partir desse tempo de funcionamento e do consumo de gás natural admitido pelo fabricante. Para se calcular o consumo mensal, assumiram-se 22 dias úteis na fábrica.

Estes valores absolutos, para a sua melhor interpretação, devem ser enquadrados com os consumos da fábrica. A Tabela 11 apresenta o consumo destes equipamentos e ainda a fração que este consumo de água quente e de combustível representam na operação completa da fábrica.

Tabela 11 - Consumos mensais de gás natural e água do esquentador e da fábrica.

	Consumo de Água	Consumo de Gás Natural	
Consumo nos Esquentadores	35 m ³ /mês	514 m ³ N/mês	0,473 tep/mês
Consumo na Fábrica	121,5 m ³ /mês	45590 m ³ N/mês	42,0 tep/mês
Fração	28,8%	1,1%	

O consumo de água expresso na Tabela 11 não inclui o consumo de água ligado à torrefação. Com as assunções realizadas acima, a água aquecida no esquentador representa 28,8% do consumo de água dos serviços sociais da fábrica. Isto valida a estimativa efetuada, uma vez que os restantes 71,2% de água consumida são relativos à água fria do balneário masculino, à água gasta no balneário feminino, nas casas de banho, nos lavatórios e nas limpezas da fábrica.

Com esta estimativa, calcula-se que o consumo de gás natural dos esquentadores represente 1,1% do consumo de gás natural da fábrica.

As instalações têm ainda um sistema de climatização centralizado, que tanto faz o aquecimento como o arrefecimento dos gabinetes. Para o aquecimento das instalações, está instalada uma caldeira a gás natural na fábrica. Nem o combustível consumido por esta caldeira nem o caudal de água aquecida na mesma são contabilizados ou registados.

Para fazer a estimativa do consumo de gás natural da caldeira recorreu-se, tal como nos esquentadores, ao manual do aparelho e respetivos dados técnicos. O manual apresenta o consumo para o caudal térmico máximo da caldeira e para o caudal térmico mínimo. A Tabela 12 apresenta esses valores e ainda uma estimativa para o número de horas de operação, dividido por época do ano.

Tabela 12 - Dados técnicos da caldeira e tempo de funcionamento.

	Consumo de Gás Natural	Tempo de Operação	
		Inverno	Verão
Potência Mínima	4,16 m ³ N/h	2 h/dia	30 min/dia
Potência Máxima	15,50 m ³ N/h	1 h/dia	30 min/dia

Tal como no consumo de água da fábrica, consideraram-se os meses de inverno como os meses entre outubro e março e os meses de verão entre abril e setembro. Nos meses de inverno, há vários dias onde o aquecimento não é necessário, tal como nos meses de verão se liga o aquecimento nalguns dias, apesar de na maioria dos dias apenas ser necessário o arrefecimento.

Os gabinetes da fábrica têm colaboradores da empresa a trabalhar desde as 7 horas da manhã até às 19 h, aproximadamente. Apesar de o intervalo de tempo diário em que o aquecimento é

necessário ser de 12 horas, a caldeira não necessita de estar em funcionamento as 12 horas para haver água quente disponível durante o dia todo. As 3 horas de funcionamento diárias da caldeira servem como estimativa para se poder calcular um valor de consumo de gás natural aproximado.

Nos dias de verão, não se considera a caldeira sempre desligada, uma vez que existem sempre alguns dias onde a temperatura exterior está mais baixa. Para além disso, em S. Mamede de Infesta, às 7 h da manhã são raros os dias em que não é necessário aquecimento, mesmo no verão.

A partir da informação da Tabela 12, calcularam-se os consumos mensais de gás natural associados ao funcionamento da caldeira, assumindo uma média de 22 dias úteis por mês. Os resultados apresentam-se na Tabela 13.

Tabela 13 - Consumo mensal de gás natural na caldeira.

	Consumo mensal da caldeira		Consumo mensal da fábrica		Percentagem do consumo
Inverno	524 m ³ N	0,48 tep	44567 m ³ N	41,1 tep	1,18%
Verão	216 m ³ N	0,20 tep	46613 m ³ N	42,9 tep	0,46%

O consumo de gás natural na caldeira tem um maior significado no consumo de gás natural da fábrica nos meses de inverno do que nos meses de verão, tal como seria de prever. Aliás, tal como apresentado na Fig. 6, o consumo de gás por tonelada de café verde nos meses de verão é inferior aos dos meses de inverno. Este facto também pode ajudar a explicar esta diferença, uma vez que os nos meses de inverno, há uma parcela maior de consumos de combustível, não associados diretamente à torrefação.

4.4 Ar Limpo dos Torradores

Nos torradores em funcionamento na fábrica do Porto da Nestlé há consumo de gás natural e admissão de ar limpo. Há admissão de ar limpo nos queimadores para a queima do combustível, mas também há outras entradas de ar na máquina.

A quantidade de ar limpo que é admitida nos torradores não é controlada, não se mede o caudal de ar admitido nos queimadores, nem sequer se sabe na fábrica a razão ar-combustível no interior dos torradores.

Os únicos dados, para além das análises efetuadas às chaminés (Secção 4.1), são os testes realizados pelos técnicos externos à fábrica que fazem a manutenção dos torradores. Na manutenção dos torradores são analisados os gases de queima do torrador. Essas medições permitem ao técnico programar o excesso de ar em relação à estequiometria. Todavia, esse

excesso de ar varia consoante o caudal de gás a ser queimado, que também varia durante o ciclo de torra.

A partir dos resultados das análises efetuadas aos efluentes gasosos é possível, contudo, fazer um balanço de material aos torradores, não sendo possível discriminar as entradas de ar nem de gás natural entre si. Os gases de chaminé são constituídos, assim, pelos inertes (N_2) que entram no torrador pelas entradas de ar presente, o CO_2 , CO , COV , NO_x e humidade que são produtos das reações de queima e das reações químicas que ocorrem na torrefação e o O_2 libertado pela chaminé é o oxigénio atmosférico que não reage na combustão de gases nos queimadores.

Assim, na Tabela 14 estão os resultados dos caudais molares, volumétricos e mássicos de ar em cada torrador, quando estes estão em operação. A Tabela 15 mostra um valor da quantidade de ar que circula por mês em cada torrador, a partir da razão de caudais ar/combustível também apresentada na tabela.

Tabela 14 - Caudal de ar atmosférico a circular nos torradores.

	Caudal Molar Seco	Caudal Mássico Seco	Caudal Volumétrico Seco
Torrador 1	257 kmol/h	7441 kg/h	5759 m ³ N/h
Torrador 3	88 kmol/h	2546 kg/h	1970 m ³ N/h

Para se calcular o caudal molar e mássico de ar atmosférico utilizaram-se valores médios da composição da atmosfera. A percentagem molar de N_2 no ar seco é de 78,08% e a massa molar é igual a 28,96 kg/kmol (The Engineering Toolbox, 2018). Para o cálculo do caudal volumétrico, utilizou-se uma massa volúmica nas condições PTN de 1,292 kg/m³ (The Engineering Toolbox, 2018).

Os tempos de ciclo de torra e o peso médio de café verde torrado em cada torra foram obtidos a partir dos relatórios da torrefação. Com estes dados, foi possível calcular o consumo de combustível horário em cada torrador (a partir do consumo da Tabela 4, por tonelada de café verde). As razões apresentadas na Tabela 15 são as razões entre os caudais molares de ar (na Tabela 14) e de gás natural.

Tabela 15 - Razão de caudais ar/combustível em cada torrador.

	Tempo de ciclo	Café Verde	Consumo Combustível		Razão
Torrador 1	11'15''	247,8 kg/torra	2,78 kmol/h	62,0 m ³ N/h	92,8
Torrador 3	15'12'	245,7 kg/torra	2,37 kmol/h	53,0 m ³ N/h	37,2

Esta razão permite agora, a partir dos consumos de gás natural em cada torrador, calcular o consumo de ar limpo. Este ar limpo pode ser aquecido por um permutador ar/água a ser dimensionado na Secção 4.5.

4.5 Permutadores Ar-Água

4.5.1 Aquecimento de água pelos gases das chaminés

Para se aproveitar o calor disponível nos gases de chaminé é preciso a instalação de um permutador de calor. Como os gases não têm uma aplicação única e direta, esse permutador de calor não é projetado com a corrente final, mas com uma utilidade que será utilizada nas diversas aplicações disponíveis e descritas nas Secções seguintes.

A utilidade escolhida é a água que será aquecida até 90 °C. A temperatura de entrada da água variará entre os 20 °C e os 70 °C, aproximadamente. A maior parte da água quente produzida terá como fim a produção de eletricidade e estará em circuito fechado entre os 70 e 90 °C (Secção 4.2). No entanto, a água quente também poderá ser utilizada para os balneários e aquecimento central e para o aquecimento do ar à entrada dos queimadores (Secções 4.3 e 4.4, respetivamente).

A aplicação informática utilizada no dimensionamento do permutador é o *ASPEN Exchanger & Design Rating*. Os permutadores foram dimensionados para o caudal e temperatura de gases descrita na Secção 4.1. Fez-se a simulação do problema com um permutador apenas para recuperar o calor das duas chaminés em simultâneo e das duas correntes individualmente. O dimensionamento de dois permutadores provou ser vantajoso, não só a nível de logística e de processo, como a nível de investimento.

Os dados processuais e os tipos de permutador estão sumariados na Tabela 16, enquanto a Tabela 17 apresenta os dados relacionados com a geometria dos mesmos.

Os permutadores foram dimensionados para o aquecimento de água de 65 °C até 90 °C. A temperatura de entrada de água no permutador é de 65 °C, uma vez que o efluente do *Exergyn Drive* está a 70 °C e este representa a maior fração do caudal de água. Para além disso, como os fatores mais críticos para o dimensionamento são o caudal de água e diferença de temperaturas entre fluido quente e frio, estes parâmetros de operação são aqueles onde o caudal de água é máximo e a diferença de temperatura é menor.

O tipo de permutador e de escoamento foram a escolha efetuada pelo *ASPEN Exchanger Design & Rating* no seu processo de otimização. São o tipo de permutador mais utilizado na indústria, que apresentam melhores resultados para a transferência de calor com caudais elevados, mantendo os custos de manutenção no mínimo. O escoamento em contracorrente é o eleito

para maximizar a transferência de calor e manter a diferença de temperatura entre fluido quente e frio mais elevada.

Tabela 16 - Tipo de permutador e dados processuais para arrefecimento de gases da chaminé.

Tipo de permutador	Carcaça e Tubos	Tipo de escoamento	Contracorrente
Fluido quente	Lado da carcaça	Fluido frio	Dentro dos tubos
		Torrador 1	Torrador 3
Caudal de ar (kg/h)		8099	3128
Caudal de água (kg/h)		15703	9207
Temperatura Entrada do ar (°C)		272	369
Temperatura Saída do ar (°C)		80	80
Temperatura Entrada da água (°C)		65	65
Temperatura Saída da água (°C)		90	90
Horas de Operação (h/ano)		5223	4436
Calor Trocado (kW)		479	281

O ar, que é fluido menos viscoso, o fluido quente e aquele com um maior caudal volumétrico, passa pelo lado da carcaça e, no sentido oposto, a água circula dentro dos tubos.

A temperatura do ar é a temperatura medida nas análises efetuadas aos efluentes gasosos. Os gases à saída de ambos os pós-queimadores têm temperaturas mais elevadas do que as referidas, mas o permutador teria de ser instalado a montante do pós-queimador. Desse modo, estima-se que a temperatura dos gases à entrada do permutador será semelhante à registada nas análises.

A temperatura de saída do ar foi determinada igual a 80 °C, uma vez que mantém uma diferença de temperatura mínima entre corrente fria e quente igual a 15 °C e é superior à temperatura de orvalho da corrente de gás. Com a ajuda do programa já referenciado acima, otimizou-se a geometria do permutador.

A configuração triangular dos tubos permite um empacotamento mais compacto. O número de tubos e de carcaças é o necessário para que a transferência de calor pretendida ocorra. O material utilizado é aquele que não apresenta nenhuma incompatibilidade com as correntes de processo e que apresenta o preço mais competitivo. Os valores utilizados para os diâmetros dos tubos para além de maximizarem o desempenho, minimizam o custo, já que correspondem a medidas normalizadas no fabrico de permutadores de calor. A escolha da unidade de medida

entre o mm e polegadas (*in*) depende assim da normalização dos tamanhos. Por exemplo, o diâmetro da carcaça do permutador do torrador 1 tem um valor exato em mm e o permutador do torrador 3 tem um valor exato em polegadas.

Tabela 17 - Geometria e custo do permutador para arrefecimento de gases de chaminé.

		Torrador 1	Torrador 3
Classe TEMA		B E M	B E M
Configuração dos tubos		Triangular	Triangular
Material de construção		Aço carbono	Aço carbono
Número de tubos		415	153
Nº de carcaças		1	1
Número de defletores		2	4
Tubos	Diâmetro Interno (<i>in</i>)	0,58	0,58
	Diâmetro Externo (<i>in</i>)	0,75	0,75
Carcaça	Diâmetro Interno	600 mm	15,05 in
	Diâmetro Externo	620 mm	16 in
Comprimento (mm)		2550	3000
Área (m ²)		61,2	26,8
Custo (€)		23 758	14 481

4.5.2 Aquecimento de ar limpo

O mesmo processo foi efetuado para projetar e dimensionar um permutador que trocasse calor entre a corrente de água disponível a 90 °C e ar atmosférico que é alimentado aos torradores. A quantidade de ar a ser aquecida é a referida na Tabela 15, cuja temperatura após aquecimento será de 80 °C. Esta temperatura foi escolhida para manter uma diferença mínima de temperaturas entre a corrente quente e fria de 10 °C.

As Tabelas 18 e 19 apresentam os mesmos dados que as Tabelas 16 e 17, respetivamente, mas agora relativos ao aquecimento do ar limpo.

A temperatura de entrada do ar no permutador foi considerada igual a 15 °C, uma aproximação da temperatura média do ar no local da fábrica ao longo do ano. As horas de operação relativas a cada torrador são exatamente as mesmas das referidas na Tabela 16, uma vez que são relativas ao tempo que cada torrador está em funcionamento por ano.

Tabela 18 - Tipo de permutador e dados processuais para aquecimento do ar limpo.

Tipo de permutador	Carcaça e Tubos	Tipo de escoamento	
Fluido quente	Lado da carcaça	Fluido frio	Contracorrente
Temperatura Entrada do ar	15 °C	Temperatura Saída do ar	80 °C
Temperatura Entrada da água	90 °C	Temperatura Saída da água	60 °C
	Torrador 1	Torrador 3	
Caudal de ar (kg/h)	7438	2545	
Caudal de água (kg/h)	3694	1254	
Horas de Operação (h/ano)	5223	4436	
Calor Trocado (kW)	134,6	46,1	

Foram dimensionados 3 permutadores distintos. Como cada torrador funciona separadamente e tem necessidades de ar limpo distintas, projetou-se um permutador destinado ao consumo de ar limpo de cada torrador. No entanto, visto que as temperaturas de entrada e saída das correntes são iguais nos permutadores, também se projetou um permutador com a capacidade de fazer a permuta de calor para a totalidade do ar limpo necessário nos dois torradores. Esse torrador aparece na Tabela 19 como “Global”.

A Tabela 20 apresenta a quantidade de calor fornecida ao ar anualmente e a poupança que isso significaria, quer a nível energético, como económico. Adicionalmente, a Tabela 20 apresenta também uma estimativa do consumo anual de energia da fábrica que é destinada a este aquecimento e o custo por essa quantidade de calor.

Os custos são calculados a partir do preço médio do kWh de energia de gás natural cobrado pela distribuidora do combustível à empresa. O termo da capacidade não foi incluído nestes cálculos, já que é um termo variável e que depende do dia do mês com maior consumo de energia.

Tabela 19 - Geometria e custo do permutador para aquecimento do ar limpo.

		Torrador 1	Torrador 3	Global
Classe TEMA		B E M	B E M	B E M
Configuração dos tubos		Triangular	Triangular	Triangular
Material de construção		Aço carbono	Aço carbono	Aço carbono
Número de tubos		204	81	266
Nº de carcaças		1	1	1
Número de defletores		12	10	10
Tubos	Diâmetro Interno (in)	0,75	0,75	0,75
	Diâmetro Externo (in)	0,9375	0,9375	0,9375
Carcaça	Diâmetro Interno (in)	15,25	10,14	17,25
	Diâmetro Externo (in)	16	10,75	18
Comprimento dos tubos (mm)		4 950	6 000	4 950
Área (m ²)		59,5	28,7	77,5
Custo (€)		17 678	11 777	20 528

Tabela 20 - Poupança anual por aquecimento prévio do ar limpo.

	Calor Trocado (MWh/ano)	Percentagem do Consumo Total	Valor (€)
Torrador 1	703	10,9%	21 186 €
Torrador 3	204	3,2%	6 162 €
Total	907	14,1%	27 348 €

A economia desta medida pode ser superior ao apresentado na Tabela 20 a nível absoluto, mas o investimento também necessitaria de ser superior ao apresentado na Tabela 19.

Havendo esta poupança de energia através do aquecimento do ar, menor seria a energia necessária nos torradores e menos seria o combustível queimado nos mesmos. Assim, o caudal de ar necessário seria também reduzido, podendo a poupança de energia diferir do estimado acima. Contudo, o balanço de material não pode ser feito para estimar essas variações, uma vez que as entradas de ar limpo não se restringem aos queimadores, havendo outras entradas de ar nos torradores. Não sabendo a razão ar/combustível dos queimadores, é impossível saber a redução no caudal de ar alimentado aos torradores.

4.6 Análise Global

O calor retirado ao gás libertado pela chaminé será utilizado em quatro situações distintas. Em primeiro lugar, será utilizado para aquecer o ar admitido nos torradores; servirá para a produção de águas quentes sanitárias; para o aquecimento central das instalações e para o funcionamento do *Exergyn Drive*. A Tabela 21 apresenta o caudal de água quente e a quantidade de água quente produzida anualmente, assim como caudais e quantidade de água quente direcionada para cada uma das aplicações.

Tabela 21 - Quantidade de água quente utilizada em cada utilização.

		Caudal	Tempo	Quantidade
Gases da chaminé	Torrador 1	15703 kg/h	5223 h/ano	82017 t/ano
	Torrador 3	9207 kg/h	4336 h/ano	39922 t/ano
Ar limpo	Torrador 1	3694 kg/h	5223 h/ano	19294 t/ano
	Torrador 3	1254 kg/h	4336 h/ano	5437 t/ano
Esquentadores		1590 L/dia	250 dias/ano	397,5 t/ano
Aquecimento Central	Verão	4900 L/dia	125 dias/ano	612,5 t/ano
	Inverno	16300 L/dia	125 dias/ano	2037,5 t/ano
<i>Exergyn Drive</i>		6 L/s	4359 h/ano	94160 t/ano

Estes valores são calculados a partir de valores já descritos em secções anteriores. As exceções são o número de dias úteis considerados para os esquentadores e aquecimento central: os 250 dias considerados são uma aproximação do número total de dias em que a fábrica trabalha; isto é, excetuando feriados fins de semana e outros dias em que a fábrica pare. As 4377 h de operação do *Exergyn Drive* são as horas que o gerador consegue trabalhar com a quantidade de água quente disponível, obtida por diferença entre o total de água quente e a utilizada noutros fins.

A nível de investimento, seria necessário a compra dos 4 permutadores e do *Exergyn Drive* e haveria um custo de manutenção associados a estes equipamentos. Seria também necessário o investimento em equipamentos associados ao transporte das utilidades e segurança, tais como tubagens, bombas e válvulas. Para o armazenamento de água quente, a fábrica já tem cilindros para o armazenamento de água quente. No entanto, nunca será necessário um grande volume de armazenamento disponível, uma vez que o caudal produzido não excede o caudal necessário de utilidades.

A Tabela 22 apresenta o custo de investimento e de manutenção previstos para os equipamentos. O custo de investimento inclui o custo do material e o custo da instalação dos equipamentos. O custo de manutenção anual dos equipamentos, excetuando o *Exergyn Drive*, foi estimado como sendo igual a 5% do investimento inicial. O custo associado aos restantes equipamentos foi estimado como sendo igual a 20% do investimento associado aos permutadores. Não se incluiu o investimento exigido pelo *Exergyn Drive*, uma vez que este já inclui os custos associados aos equipamentos acessórios.

Tabela 22 - Custo de investimento e manutenção dos vários equipamentos.

	Custo de Investimento (€)	Custo de Manutenção (€/ano)
Permutador Gás/Água torrador 1	23 758	1 188
Permutador Gás/Água torrador 3	14 481	724
Permutador Água/Ar torrador 1	17 678	884
Permutador Água/Ar torrador 3	11 777	589
<i>Exergyn Drive</i>	28 630	2 004
Restantes Equipamentos	13 539	1 353
Total	109 862	6 743

A nível de retorno, a poupança associada a cada equipamento anualmente quer a nível energético, quer a nível económico está representada na Tabela 23.

Tabela 23 - Poupança associada a cada uma das aplicações da água quente.

	Energia (MWh/ano)	Poupança (€/Ano)
Permutador Água/Ar torrador 1	703	21 186
Permutador Água/Ar torrador 3	204	6 162
<i>Exergyn Drive</i>	44	4 211
Aquecimento Central	47	1 415
Esquentadores	65	1 966
Total	1 063	34 941

Estima-se que seja possível poupar cerca de 35 000 € anuais na fatura energética da fábrica. A distribuição do caudal de água quente pelas várias utilizações possíveis pode não seguir esta

estratégia. Na realização de uma análise a toda a instalação, pode concluir-se que os custos e rentabilidade de cada uma destas utilizações pode levar a que não se opte por todas as utilizações descritas acima (Secção 6.2).

Com estes valores, é possível calcular vários indicadores económicos, entre eles a taxa interna de rentabilidade (TIR), o valor presente líquido do investimento (VPL), para uma taxa de juro de 10%, e os períodos de recuperação do investimento (PRI) nominal e presente líquido com a mesma taxa de juro do VPL. Os valores destes indicadores económicos para este investimento estão na Tabela 24.

Tabela 24 - Indicadores económicos para o investimento no tratamento dos gases da chaminé.

TIR	VPL	PRI nominal	PRI presente líquido
25,39%	130 203 €	3,9 anos	5,2 anos

5 Conclusões

O trabalho desenvolvido neste projeto centrou-se em 2 questões diferentes relacionadas com o mesmo assunto. Para a racionalização dos consumos de gás natural na fábrica, fez-se o estudo do consumo na fábrica e a possibilidade de os reduzir atuando na operação da fábrica, assim como a possibilidade de aproveitar o calor desperdiçado através das emissões gasosas da chaminé.

Ao analisar o histórico dos consumos de gás natural ao longo dos últimos 4 anos, entre 2014 e 2017, é possível verificar que há dois fatores principais que afetam o consumo de gás natural, assim como alguma sazonalidade nesse mesmo consumo.

Em primeiro lugar, os consumos são largamente afetados pela quantidade de paragens e arranques dos torradores, com especial importância no número de paragens do torrador 1. Também no Capítulo 3, se provou que o torrador 1 é o mais eficiente energeticamente da fábrica, pelo que quanto mais produção for direcionada para este torrador em vez do torrador 3, maior a eficiência energética da fábrica. A sazonalidade é explicada também, indiretamente, no Capítulo 4 (Secções 4.3 e 4.4), uma vez que o consumo de gás natural da caldeira do sistema de aquecimento central é um consumo altamente sazonal e visto que o aquecimento do ar limpo dos torradores representa uma fração importante do calor que é necessário introduzir nos torradores e que a temperatura do ar atmosférico é mais elevada no verão e o calor necessário para o aquecer é menor.

Para a racionalização dos consumos, é importante reduzir o número de paragens, principalmente no torrador 1. Essa redução exige sinergias entre vários departamentos da fábrica, tais como a ensilagem de café verde, as compras de matérias primas, o enchimento e os serviços de manutenção. A falta de café verde para torrar é uma das principais causas de paragens não programadas na torrefação e esse problema pode ser eliminado com uma maior coordenação entre a ensilagem e a torrefação e com a redução das falhas e atrasos nos fornecimentos de café verde. As paragens das linhas de enchimento levam ao esgotar da capacidade dos silos de café torrado, algo que também provoca paragens na torrefação. No entanto, a maior causa de paragens não programadas na torrefação é devido a avarias nos torradores. Estas avarias, sendo imprevistas, podem ser reduzidas em número caso haja uma eficiente substituição do tipo de manutenção efetuada; ou seja, deve ser efetuada uma manutenção preventiva em vez da atual manutenção corretiva.

A própria empresa tem implementado sistemas de gestão de qualidade total e de manutenção preventiva cada vez mais complexos e eficientes de forma gradual na fábrica. Como a implementação de estes sistemas envolve muita formação e a sua implementação não é

instantânea, a torrefação será alvo da implementação destes sistemas em altura apropriada e ajustada ao funcionamento da fábrica. Alguns destes sistemas já começaram a ser implementados no enchimento. Espera-se que a redução do número de paragens não programadas na torrefação seja reduzida após a implementação destas medidas, podendo ser superior a 50%. No caso do torrador 1, teve sempre mais de 100 paragens por ano (excluindo fins de semana e feriados) e apenas estão previstas cerca de 30 a 40 paragens anuais, uma ou duas manutenções periódicas e as limpezas térmicas necessárias a cada 2 ou 3 semanas.

Sem nenhuma destas medidas, o consumo por tonelada de café verde reduziu 10% entre 2014 e 2017. Eliminando as paragens não programadas, a capacidade produtiva do torrador 1 também aumentaria e a necessidade de utilizar o torrador 3 para cumprir as necessidades de produção na fábrica. Por exemplo, caso se conseguissem 6000 horas de produção anuais no torrador 1 (250 dias completos), isso significaria um aumento de 19% na produção de café neste torrador em relação a 2017 e uma redução de 2,6% no consumo de gás natural por tonelada de café verde da fábrica, por ter sido utilizado o torrador 1 em detrimento do torrador 3.

No tratamento dos gases da chaminé, o calor retirado pela instalação de permutadores de calor gás-água pode chegar a 3748 MWh/ano e a produção de 121938 t/ano de água quente. Esta utilidade seria utilizada para abastecer o circuito de aquecimento central das instalações, para o abastecimento de águas quentes nos balneários, para o aquecimento do ar limpo que é admitido nos torradores e para a produção de eletricidade, com recurso ao *Exergyn Drive*.

O aquecimento do ar limpo é a utilização que exige um maior investimento, cuja instalação e funcionamento exige maior formação e conhecimento, mas aquela que apresenta um período de retorno mais baixo. O *Exergyn Drive* é o equipamento que necessita de maior caudal de água e é responsável pelo consumo de 77% da água quente produzida. As outras aplicações, cujo investimento é quase nulo significam poupanças excedentárias possíveis com a instalação destes permutadores.

Caso este projeto fosse implementado, é esperado que necessite de 5,2 anos com uma taxa de juro de 10% para recuperar o investimento. A taxa interna de rentabilidade, para o período de vida previsto para uma unidade de *Exergyn Drive* (20 anos) é de 25,4%.

Este investimento deve ser ainda estudado com mais detalhe no que diz respeito à realização de um anteprojecto e de eventuais alternativas dentro do mesmo. Por exemplo, caso se pretenda optar pela não instalação do *Exergyn Drive*, o circuito fechado de água entre os 70 °C e os 90 °C deste equipamento deixa de existir, a temperatura de água nos permutadores baixa para a temperatura ambiente, a amplitude térmica entre a temperatura de entrada e saída da água no permutador triplica (em vez de 25 °C, a água sofre um aquecimento de 75 °C, dos 15 °C até aos 90 °C) e o caudal e quantidade de água quente produzida é três vezes menor.

O resultado deste trabalho cumpriu com os objetivos propostos do inventário dos consumos de gás natural e da pesquisa de oportunidades de aproveitamento do caudal térmico dos gases das chaminés. Os prazos a serem cumpridos, assim como algumas limitações a níveis de recursos (discutidas na Secção 6.2), todavia, não permitiram que durante a realização do trabalho se conseguissem implementar as medidas estudadas e propostas, nem a avaliação de diferentes alternativas possíveis de projeto e investimento.

Do ponto de vista da empresa, apesar de altamente aliciante a possibilidade da redução da fatura energética, qualquer investimento realizado requer autorizações e processos burocráticos extensos, uma vez que se trata de uma multinacional muito estratificada. Isto é, a aprovação não depende unicamente de uma pessoa apenas, mas sim de uma cadeia de comando maior do que numa pequena ou média empresa.

6 Avaliação do trabalho realizado

6.1 Objetivos Realizados

Os objetivos propostos foram parcialmente realizados. Foi realizado um inventário dos consumos bastante detalhado e uma avaliação de fatores explicativos, assim como foram identificadas oportunidades de melhorias.

No que diz respeito às correntes gasosas das chaminés dos torradores, a partir de análises efetuadas às mesmas, foi possível quantificar o calor desperdiçado nessas correntes e onde e como aproveitar. Fez-se um estudo de potenciais aplicações para esse calor desperdiçado e análises económicas sem a realização dos anteprojetos para as instalações e do correto projeto e dimensionamento de cada equipamento.

Foi possível avaliar a rentabilidade do investimento necessário, sendo que, face ao prazo definido para o culminar deste projeto, não houve a possibilidade de avaliar todas as alternativas possíveis dentro das 5 aplicações possíveis para o aproveitamento do calor dos gases.

A implementação destas medidas e a realização de avaliações mais pormenorizadas, que serão trabalhos a efetuar no futuro, não foram finalizadas no período definido para esta dissertação.

6.2 Limitações e Trabalho Futuro

A realização deste projeto foi condicionada por várias situações. Em primeiro lugar, a ausência de dados ou meios para medições dificultou a realização de várias etapas do projeto, tornou algumas medições pouco exatas e obrigou a algumas estimativas. Por exemplo, não há registo do consumo de gás em cada queimador, da temperatura e pressão do gás natural nos queimadores, da temperatura e caudal do ar limpo que é admitido aos queimadores, do consumo de gás e de água nos sistemas de aquecimento central e esquentadores.

Outro problema existente relacionou-se com a necessidade de não causar prejuízo à fábrica e a importância menor do projeto dentro da fábrica. Por exemplo, os contadores de gás natural têm a possibilidade de serem ligados a um sistema de gestão de dados para fazer o registo dos consumos, mas isso não será feito até haver atualizações e reformulações nas bases de dados empresa, algo que já está previsto. No entanto, o prazo será posterior à conclusão deste trabalho. Situações idênticas ocorreram noutros casos, tais como para a realização de ensaios e testes, que muitas vezes eram relegados para segundo plano por não se sobreporem à normal produção da fábrica.

Este trabalho não está, contudo, concluído tal como foi já explicado no capítulo anterior. Este documento apenas apresenta um estudo de algumas alternativas e soluções possíveis, podendo servir de base à implementação destas medidas se for esse o interesse da empresa. Em caso afirmativo, o trabalho a realizar deverá incidir na avaliação de mais alternativas e, sobretudo, na realização do projeto da instalação.

6.3 Apreciação Final

Entre as limitações e dificuldades encontradas na realização do trabalho, foi possível encontrar alternativas interessantes para a fábrica para a racionalização dos seus consumos de gás natural.

A presente dissertação, contudo, não deve ser lida como um projeto a ser realizado para uma instalação que reduza os consumos de combustível, mas deve ser interpretada dentro da empresa como um documento onde a mesma se pode basear para implementar no futuro as medidas para a racionalização dos consumos, dentro das suas políticas de investimento e de produção.

Referências

- Air - Composition and Molecular Weight. The Engineering Toolbox, acedido a 21 de Junho de 2018, disponível em: <https://www.engineeringtoolbox.com/docs/documents/212/Minor%20Components%20dry%20air.jpg>.
- Air - Density, Specific Weight and Thermal Expansion Coefficient at Varying Temperature and Constant Pressures. The Engineering Toolbox, acedido a 22 de Junho de 2018, disponível em: https://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d_600.html.
- Brito, G., Castanheira, M. L., Ferreira, P. F., Osório, J. N., Rocha, D., *Ligas com Memória de Forma*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.
- Coffee Roasts Guide. National Coffee Association, acedido a 9 de Junho de 2018, disponível em: <http://www.ncausa.org/About-Coffee/Coffee-Roasts-Guide>.
- Collins, L., Different Types of Coffee Roasters. *NDPRoasters*, acedido a 1 de Junho de 2018, disponível em: <http://nomdeplumeroasters.com/different-types-coffee-roasters/>.
- De Monte, M., Padoano, E., Pozzetto, D., Waste heat recovery in a coffee roasting plant. *Applied Thermal Engineering*, **23**, pp. 1033-1044 (2003).
- Fordham, J., Markides, C. N., Oyewunmi, O. A., Pantaleo, A.M., Intermittent waste heat recovery via ORC in coffee torrefaction. *ICAEE2017, 9th International Conference on Applied Energy*, Cardiff, Reino Unido, Agosto, 2017.
- Langan, M., O'Toole, K. A new technology for cost effective low grade waste heat recovery. *International Conference on Sustainable Energy and Resource Use in Food Chains*, Berkshire, Reino Unido, 2017.
- Machado, A., Nestlé Portugal investe 40 milhões nas fábricas. *Jornal de Negócios*, p. 20, 15 de Maio de 2018.
- Nestlé Portugal Corporate Presentation. Nestlé Portugal, Portugal, 2017.
- O que é o Gás Natural?. Galp Gás Natural Distribuição, acedido a 15 de Junho de 2018, disponível em: <http://galpgasnaturaldistribuicao.pt/gas-natural/o-que-e>.
- Tabela de Equivalências. Galp Gás Natural Distribuição, 2018
- The Nestlé company history. Nestlé, 2018.

- Using PROFORTE To Clean Exhaust Air. PROBAT, acedido a 11 de junho de 2018, disponível em: <http://www.probat.com/en/ecotech/using-proforte-to-clean-exhaust-air/>.
- What is Coffee. National Coffee Association, acedido a 6 de Junho de 2018, disponível em: <http://www.ncausa.org/About-Coffee/What-is-Coffee>.
- World coffee consumption. International Coffee Organization, Abril, 2018.