



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Análise energética de uma indústria metalomecânica: balanços detalhados dos fornos de cementação e têmpera

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e
Gestão Industrial

Autor

Maria João Parada Afonso

Orientador

José Manuel Baranda Moreira da Silva Ribeiro

Júri

Presidente	Professor Doutor Pedro Mariano Simões Neto Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva Ribeiro
Vogais	Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra Professor Doutor José Carlos Miranda Góis Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional

SRAMPORT – Transmissões
Mecânicas, Lda.

Coimbra, Fevereiro, 2016

*“The secret of genius is to carry the spirit of the child into old age which means
never losing your enthusiasm”*

Aldous Huxley.

Agradecimentos

A realização da presente dissertação contou com o apoio e colaboração de muitas pessoas sem as quais tal não seria possível, agradeço desde já a todos.

Antes de mais agradeço à pessoa que mais de perto acompanhou o meu trabalho, Professor Baranda. Obrigada pela atenção, pela paciência, pela confiança e pela motivação que sempre me transmitiu ao longo deste trabalho.

Não poderia deixar de agradecer aos investigadores da área de Energia, Márcio Santos e João Pedro Pereira que se mostraram sempre disponíveis para me ajudar. Muito obrigada.

Agradeço à SRAMPOR que me concedeu a oportunidade de desenvolver o meu trabalho nas suas instalações. À Engenheira Alexandra Fortunado e ao Engenheiro Paulo Carvalho que se mostraram sempre disponíveis e interessados, agradeço por todos os esclarecimentos e cedência de informações fundamentais para a realização deste trabalho. Agradeço também a todos os funcionários da SRAM que me acompanharam nas visitas e me ajudaram nas medições e esclarecimento de dúvidas.

À minha mãe e à minha avó porque sem elas nada disto seria possível, obrigada por acreditarem e nunca desistirem de mim, pela incessante força e confiança que me transmitiram desde sempre. Dedico-vos este trabalho já que esta não é uma conquista minha, é uma conquista nossa. Ao meu irmão que esteve sempre disponível para me ajudar e orientar na realização deste trabalho e em todo o meu percurso académico.

A todos os meus amigos que me acompanharam durante o percurso académico, obrigada por fazerem destes os melhores anos, obrigada pelo apoio e cumplicidade. Sara e Bianca serão sempre orgulho da madrinha. À Vera, à Joana e à Joana Pereira que me apoiaram e aturaram durante a realização deste trabalho, foram uma ajuda e apoio fundamental.

Resumo

A presente dissertação tem como objetivo genérico a caracterização energética dos principais consumidores de gás natural da empresa SRAMPOR – Transmissões Mecânicas, Lda., sendo estes os fornos contínuos de têmpera/cementação e revenido. No estudo realizado com vista ao alcance do objetivo anteriormente enunciado foram estimados os custos de operação, identificadas as principais ineficiências e propostas medidas de melhoria que incluem uma análise custo/benefício. Para que isso fosse possível foram caracterizados, no local, de forma detalhada, os fluxos de energia e massa, as condições de funcionamento dos queimadores dos fornos e estabelecido o seu balanço mássico e de energia.

Foram identificadas como principais fontes de ineficiência as perdas pela chaminé, associadas ao elevado excesso de ar com que os queimadores estão normalmente a operar (cerca de 33%) e as perdas pelas paredes do forno, que representam cerca de 27 % do consumo total de gás, atribuíveis, em princípio a um insuficiente isolamento.

As propostas de melhoria da eficiência do funcionamento dos fornos inclui: a) Diminuição do excesso de ar com que operam os queimadores, o qual não acarreta qualquer custo de investimento e corresponde a uma poupança anual de 1 974€ e b) Reforço do isolamento térmico, com uma poupança anual estimada em 4 808€.

Esta dissertação inclui ainda a apresentação de uma ferramenta que ilustra o uso de matrizes na análise e previsão de consumos energéticos e de indicadores energéticos. Aplicou-se esta metodologia a um caso prático de produção de alumina, com o intuito de demonstrar funcionalidades, tais como a capacidade de prever alterações de consumos e custos energéticos face a variações dos preços de energia, da produção e de alterações na eficiência energética de determinados equipamentos.

Palavras-chave: Energia, Eficiência energética, Fornos, Perdas energéticas, Contabilidade energética, Gestão de energia.

Abstract

The main aim of this dissertation is the energetic characterization of the leading natural gas consumers of the company SRAMPORT – *Transmissões Mecânicas, Lda.*, the continuous annealing/quenching and tempering furnaces. The study developed to achieve the specified goal estimated the costs of the operation, identified the main inefficiencies and proposed measures of improvement, including a cost/benefit analysis. Therefore, the flows of energy and mass and the functioning conditions of the furnaces burners were characterized, in detail, and their mass and energy balances were established.

The flue gases losses, related to the excess of air with which the burners are usually functioning (about 33%), and the losses through the walls of the furnaces, representing about 27 % of the global gas consumption, probably due to an insufficient thermic isolation, were the main causes for inefficiency identified.

The improvement suggestions for the efficiency of the furnaces include: a) The decrease of the excess air with which the burners operate, a measure that does not imply any cost and that corresponds to annual savings of 1 974 €, b) The reinforcement of the thermic isolation, with annual savings of 4 808€.

This dissertation also includes the presentation of an energetic analysis tool that illustrates the use of analysis matrices and the prediction of energetic consumption and energetic indicators. We applied this methodology to a practical case of alumina production, with the aim of showing its functionalities, such as the ability to predict the alterations of energy consumption and costs considering the variations in energy prices, in production and in the energetic efficiency of certain equipment.

Keywords Energy, Energetic efficiency, Furnaces, Energy losses, Energetic accounting, Energy management.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xvii
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos e motivações	1
1.2. Estrutura da dissertação	2
1.3. Descrição da empresa	3
1.3.1. Processo de fabrico.....	4
1.3.2. Caracterização energética da empresa	4
1.4. Enquadramento	6
1.4.1. Reações de combustão.....	7
1.4.2. Tratamentos térmicos	10
2. <i>Benchmarking</i>	13
2.1. Contabilização energética	13
2.2. Comparação com empresas do setor.....	18
2.2.1. Consumo anual de energia.....	19
2.2.2. Consumo específico de energia	21
2.2.3. Relação entre o custo de energia e as vendas	23
3. Caracterização energética dos fornos contínuos.....	25
3.1. Recolha das características dos gases de combustão	26
3.2. Cálculo da densidade e do PCI do gás natural.....	27
3.3. Consumos de energia	30
3.3.1. Análise dos consumos registados	31
3.4. Balanço energético ao forno	34
3.4.1. Transferência de calor através das paredes.....	36
4. Medidas de eficiência	41
4.1. Diminuição do excesso de ar	41
4.2. Aplicação de isolamento térmico nas paredes do forno.....	43
5. Álgebra para modelação previsional de consumos de energia	47
5.1. Modelo previsional de consumo e custos de energia para uma empresa de produção de alumina.....	48
5.1.1. Caracterização dos consumos energéticos.....	49
5.2. Aplicação ao caso de estudo	51
5.2.1. Previsão de alterações de consumos e custos ao longo dos anos face à variação dos preços unitários e da produção	51
5.2.2. Previsão de consumos e custos decorrentes de alterações de eficiência	54

6. Conclusões.....	59
Referências Bibliográficas.....	61
Anexo A – Dados de produção e consumo de energia da empresa (2014/2015).....	65
Anexo B – Dados das empresas selecionadas para realizar o <i>Benchmarking</i>	71
Anexo C – Informação obtida pelo analisador de gases.....	73
Anexo D – Cálculos relativos ao balanço energético do forno.....	75
Anexo E – Registo dos consumos de gás natural e produção dos fornos contínuos.....	79
Anexo F – Fotografias obtidas pela câmara termográfica.....	83
Anexo G – Cálculo da transferência de calor através das paredes.....	85
Anexo H – Cálculos relativos à diminuição de excesso de ar.....	89
Anexo I – Modelo previsionial de consumos e custos de energia aplicada ao caso de estudo.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Produção em 2015.....	3
Figura 1.2: Desagregação do consumo energético por tipo de energia (2015).	5
Figura 1.3: Desagregação do custo energético por tipo de energia (2015).	5
Figura 2.1: Relação entre o consumo mensal de energia elétrica e a produção (2014 e 2015).....	14
Figura 2.2: Relação entre o consumo mensal de gás natural e a produção (2014 e 2015)..	14
Figura 2.3: Relação entre o consumo total de energia primária e a produção (2014 e 2015).	15
Figura 2.4: Regressão linear do consumo total de energia primária e produção, 2010 (Fonte: Plano de racionalização do consumo energético – CTCV (Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro), 2011 – 2018).	16
Figura 2.5: Variação entre a energia primária consumida desagregada por tipo e a produção (2015).	17
Figura 2.6: Evolução mensal do consumo específico de energia desagregado por tipo (2015).	17
Figura 2.7: Consumo anual de energia elétrica em função da produção anual para diferentes empresas do sector metalúrgico fino (<i>Benchmarking</i>).	20
Figura 2.8: Consumo anual de gás natural em função da produção anual para diferentes empresas do sector metalúrgico fino (<i>Benchmarking</i>).	20
Figura 2.9: Consumo anual de energia primária em função da produção anual para diferentes empresas do sector metalúrgico fino (<i>Benchmarking</i>).	21
Figura 2.10: Diagrama Consumo específico de energia elétrica vs produção (<i>Benchmarking</i>).	22
Figura 2.11: Diagrama Consumo específico de gás natural vs produção (<i>Benchmarking</i>).	23
Figura 2.12: Diagrama Consumo específico de energia primária total vs produção (<i>Benchmarking</i>).	23
Figura 2.13: Relação entre o custo de energia e vendas [%].....	24
Figura 3.1: Esquema dos fornos contínuos (Fonte: SRAM).	25
Figura 3.2: Diagrama de <i>Sankey</i> – Forno de têmpera/cementação.....	35
Figura 3.3: Fotografia da parede posterior do forno têmpera/cementação (câmara termográfica).	36
Figura 3.4: Distribuição energética, considerando que a temperatura média das paredes é a) 50 °C; b) 63.78 °C e c) 70 °C.....	39

Figura 4.1: Diagrama de <i>Sankey</i> após implementação das medidas propostas.	46
Figura 5.1: Fluxograma do processo de produção de alumina [12].	48
Figura 5.2: Gráfico representativo da variação de custos energéticos em função da variação do preço unitário de energia.	53
Figura 5.3: Gráfico representativo da variação do consumo energético com a alteração da eficiência energética da caldeira.	56
Figura 5.4: Gráfico representativo da variação dos custos energéticos associados à alteração da eficiência energética da caldeira.	57

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Empresas seleccionadas para o <i>benchmarking</i> e respetivas informações [2]. ...	18
Tabela 2.2: Valor das variáveis das equações das retas de regressão linear (<i>Benchmarking</i>).	21
Tabela 3.1: Média dos resultados obtidos através do analisador de gases (adaptado da SRAM).	27
Tabela 3.2: Composição do gás natural [16].	29
Tabela 3.3: Consumo e produção em cada turno analisado.	30
Tabela 3.4: Dados de consumo e produção, fornos contínuos - linha 1.	32
Tabela 3.5: Consumos quando o forno não se encontra a produzir.	33
Tabela 3.6: Distribuição energética por hora de funcionamento do forno de têmpera/cementação.	35
Tabela 3.7: Valores do coeficiente de transmissão de calor por convecção.	38
Tabela 3.8: Perdas energéticas através das paredes de cada forno de têmpera/cementação para as diferentes temperaturas consideradas.	39
Tabela 3.9: Perdas energéticas por hora de funcionamento do forno, anuais e respetivos custos (2015).	40
Tabela 4.1: Perdas energéticas através das paredes completamente isoladas.	44
Tabela 4.2: Poupanças anuais após a implementação de isolamento.	45

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

E – Energia consumida mensalmente

E_0 – Parcela da energia independente da produção

m – Parcela da energia dependente da produção

p – Produção mensal

E' – Consumo específico

P – Pressão absoluta

v – Volume específico

R – Constante específica do gás

T – Temperatura

R_u – Constante universal dos gases

M_m – Massa molar

ρ – Densidade

\bar{h}_c – Entalpia de combustão

\bar{h}_f° – Entalpia de formação

\bar{h} – Entalpia sensível no estado especificado

\bar{h}° – Entalpia sensível no estado de referência

N – Coeficiente estequiométrico

\dot{E} – Fluxo de energia

\dot{m} – Fluxo mássico

\dot{Q}_e – Taxa de entrada de energia sob a forma de calor

\dot{Q}_s – Taxa de saída de energia sob a forma de calor

\dot{W}_e – Taxa de entrada de energia sob a forma de trabalho

\dot{W}_s – Taxa de entrada de energia sob a forma de trabalho

$\dot{Q}_{convecção}$ – Transferência de calor por convecção

$\dot{Q}_{radiação}$ – Transferência de calor por radiação

h – Coeficiente de transferência de calor por convecção

A – Área

ΔT – Diferença de temperaturas

ε – Emissividade

σ – Constante de Stefan Boltzmann

$\dot{Q}_{condução}$ – Transferência de calor por condução

R_{cond} – Resistência térmica por condução

L – Espessura

K – Condutibilidade térmica

$\eta_{gerador}$ – Eficiência do gerador

$\eta_{caldeira}$ – Eficiência da caldeira

P_{elec} – Preço unitário de eletricidade

P_{GN} – Preço unitário de gás natural

Siglas

PREn – Plano de Racionalização do consumo Energético

SGCIE – Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia

IAC – Industrial Assessment Centers

URE – Utilização Racional de Energia

VAB – Valor Acrescentado Bruto

PCI – Poder Calorífico Inferior

EES – Engineering Equation Solver

DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia

PEP – Plant Energy Profiler

1. INTRODUÇÃO

1.1. Objetivos e motivações

O principal objetivo da presente dissertação centra-se na caracterização energética dos principais consumidores de gás natural da empresa SRAMPORT – Transmissões Mecânicas, Lda.

O Dec. Lei nº 71/2008 de 15 de Abril estabelece metas com o intuito de aumentar a eficiência energética através da aplicação de medidas resultantes de auditorias energéticas, destas auditorias resulta um plano de racionalização do consumo energético (PREn). De acordo com o disposto no artigo 2º do referido Decreto-lei o Regulamento do Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (SGCIE) é aplicável às instalações consumidoras de energia com consumo energético superior a 500 tep/ano. A SRAM apresentou em 2009 um consumo superior a 500 tep estando portanto abrangida pelo SGCIE desde o ano de 2010, apresentando uma auditoria e PREn realizados em 2011 [1].

Apesar de a energia elétrica ser a mais consumida e ser a que acarreta maior custos para a empresa tem sido esta que nos últimos anos mais atenção e maior esforço na redução do consumo tem sido dedicados. Na referida auditoria são apenas propostas medidas de eficiência no que diz respeito a este tipo de energia. Na altura em foi realizada esta auditoria os fornos contínuos consumiam propano, atualmente estes são consumidores de gás natural.

Os fornos contínuos encontram-se sempre ligados, sendo apenas desligados cerca de três semanas por ano, como tal e acrescentando a especial importância que estes apresentam no processo produtivo estima-se que representem a maior parte do consumo de gás natural registado na empresa, assim sendo estes merecem uma análise detalhada de modo a identificar as principais ineficiências e aplicar medidas de modo a reduzir o consumo energético por parte destes, bem como os custos associados.

1.2. Estrutura da dissertação

O presente documento encontra-se dividido em seis capítulos. Neste capítulo introduz-se o tema abordado incluindo uma breve descrição da empresa em estudo e um enquadramento dos conceitos mais relevantes.

No capítulo 2 ir-se-á analisar a performance energética da empresa, aplicando para tal ferramentas de contabilidade energética e recorrendo ao *benchmarking* comparando-a com empresas do mesmo setor, para tal foi utilizada a base de dados do IAC (*Industrial Assessment Centers*) [2] que permite aceder a informações relativas a consumos energéticos, produção anual, recomendações de melhoria de eficiência, entre outras, de várias empresas dos mais diversos sectores.

Segue-se a caracterização energética dos dois fornos contínuos da empresa, esta compreende uma análise detalhada dos fluxos de energia e massa das condições de funcionamento dos queimadores, o cálculo da transferência de calor por radiação, convecção e condução através das paredes dos fornos de modo a conhecer as causas das principais perdas de energia.

Depois de ser feita uma avaliação da utilização da energia nestes equipamentos serão apresentadas no capítulo quatro, algumas medidas de forma a minimizar os desperdícios energéticos. Partindo do princípio que o consumo energético nos sistemas produtivos tem um forte impacto na vertente económica da empresa serão também estimados os potenciais investimentos e lucros aliados à implementação das medidas apresentadas.

No quinto capítulo ir-se-á apresentar uma metodologia que passa pela implementação de matrizes na análise dos consumos de energia e respetivos custos, de modo a descrever a utilização desta metodologia e a sua finalidade optou por se aplicar um exemplo prático de produção de alumina.

No último capítulo são apresentadas as principais conclusões desta dissertação bem como sugestões para trabalhos futuros.

1.3. Descrição da empresa

A SRAMPORT - Transmissões Mecânicas, Lda., situada na zona Industrial da Pedrulha, em Coimbra foi adquirida pelo grupo americano SRAM em 1997 e é atualmente a única unidade fabril do grupo na Europa. A SRAM foi fundada em 1987 em Chicago, nos Estados Unidos. Atualmente a empresa encontra-se expandida por todo o mundo sendo o segundo maior fabricante mundial de componentes de bicicleta. No total, a empresa possui dezassete fábricas e escritórios que empregam cerca de 3.825 colaboradores espalhados por 13 países, que se dedicam ao desenvolvimento, produção e comercialização dos produtos do grupo.

A organização em Portugal tem como atividade principal o desenvolvimento e produção de correntes e seus componentes. Recentemente a SRAMPORT passou a produzir também rodas de bicicleta. Na Figura 1.1 pode observar-se o gráfico da produção referente ao ano de 2015 desagregada por produto e por mês. Note-se que o produto identificado por rodas se refere apenas à montagem de rodas para bicicletas, nenhum dos componentes das rodas é produzido na SRAM.

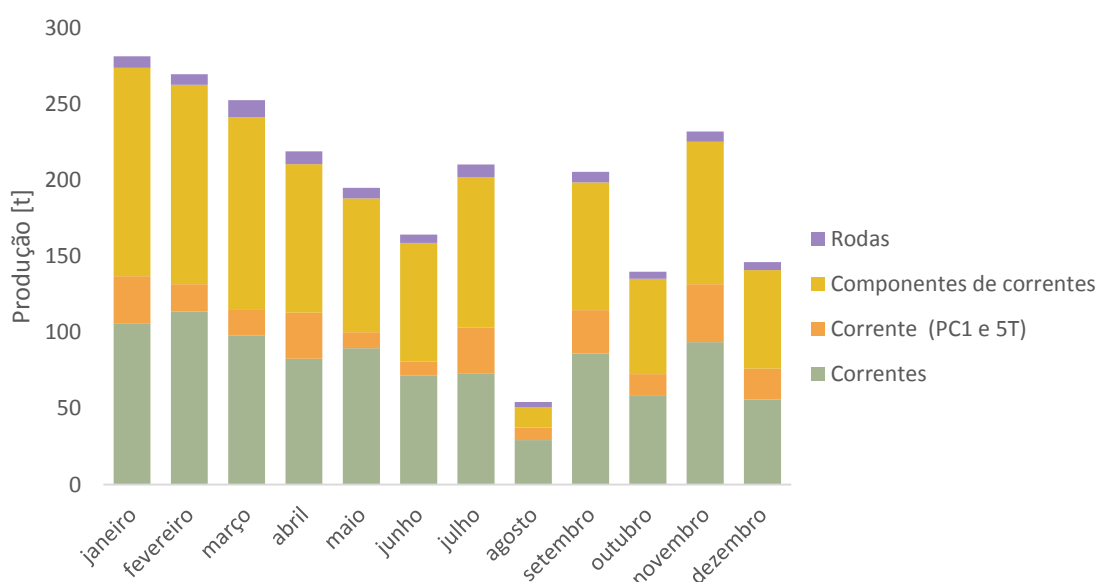


Figura 1.1: Produção em 2015.

É de notar que a produção no mês de Agosto é muito reduzida quando comparada com a registada nos restantes meses. Tal facto deve-se ao encerramento da empresa durante

três semanas nesse mês. Os valores de produção registados em 2015 encontram-se no Anexo A.

1.3.1. Processo de fabrico

O procedimento adotado pela empresa inicia-se com a receção dos aços em bobines. Logo na primeira operação de transformação esse aço é, simultaneamente cortado, prensado e furado por uma das cinco prensas existentes na SRAM. Após esta etapa as peças são sujeitas a um desgorduramento e depois “bariadas” por centrifugação. De seguida as peças são sujeitas a um tratamento térmico, têmpera ou cementação o que obriga as peças a passar por um dos doze fornos da SRAM. A empresa dispõe de dez fornos intermitentes, sendo que destes sete consomem gás natural e três energia elétrica e dois fornos contínuos consumidores de gás natural. As peças podem sofrer tratamento térmico em qualquer um destes fornos dependendo da peça e aço em questão. Como parte do tratamento térmico, após passarem no forno, as peças são resfriadas num banho de água, óleo ou polímero. Depois de lavadas e secas as peças podem prosseguir para outro forno onde são submetidas a um tratamento térmico de revenido. Segue-se uma nova “bariagem”, a montagem e o embalamento para expedição [1,3].

1.3.2. Caracterização energética da empresa

Durante o ano de 2015 a SRAM consumiu cerca de 647 tep¹ de energia sob a forma de energia elétrica, gás natural, propano e gasóleo. Nas tabelas do Anexo A apresentam-se os dados disponibilizados pela empresa relativos ao consumo dos quatro tipos de energia em 2014 e 2015. Os principais equipamentos consumidores de energia elétrica são os motores elétricos das prensas e das linhas de montagem, os ventiladores e as bombas utilizadas nos fornos e nas torres de arrefecimento.

O gás natural é utilizado como combustível em três fornos intermitentes e nos fornos contínuos. O gás natural é ainda usado, depois de misturado com ar nas devidas proporções, como atmosfera de tratamento térmico no interior dos fornos contínuos. O propano além de ser utilizado como combustível num empilhador é ainda usado para a

¹ A conversão de energia elétrica para energia primária é feita de acordo com o Despacho nº 17313/2008 da DGEG.

produção de uma atmosfera rica em carbono nas operações de cementação. O gasóleo é utilizado como combustível de dois automóveis e um empilhador.

Na Figura 1.2 pode observar-se a desagregação dos consumos de energia primária por tipo de energia. Verifica-se que apenas 0.7% do consumo de energia se refere ao propano e gasóleo; 71% do consumo refere-se à energia elétrica e 29% ao gás natural. Na Figura 1.3 pode observar-se a desagregação dos custos por tipo de energia primária.

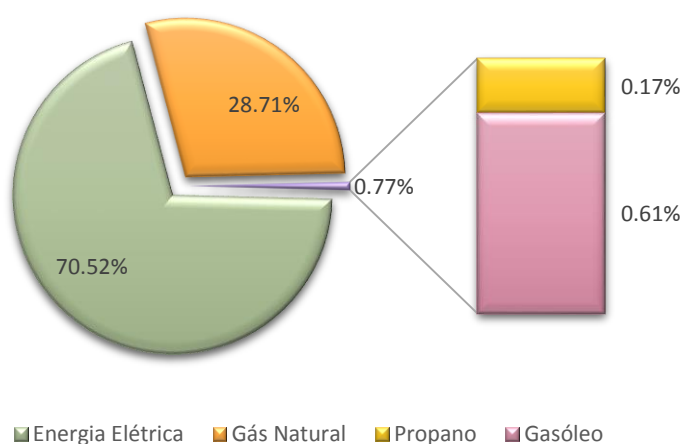


Figura 1.2: Desagregação do consumo energético por tipo de energia (2015).

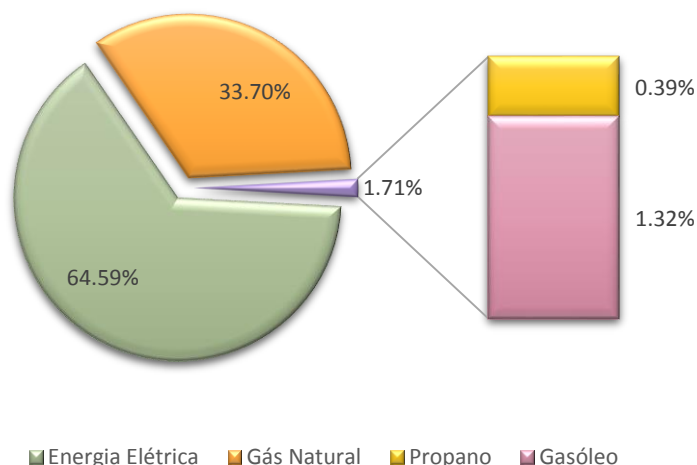


Figura 1.3: Desagregação do custo energético por tipo de energia (2015).

1.4. Enquadramento

É do domínio comum, e muitas empresas têm esse conceito como certo, que a um crescimento produtivo está associado um crescimento do consumo energético. No entanto, segundo o conceito de Utilização Racional de Energia (URE) tal não é necessariamente verdade. De acordo com a URE é possível aumentar o nível de produção sem que tal implique um aumento do consumo energético; para que isto aconteça é necessário inovar nos produtos, nos processos e na sua gestão [4, 5]. “A chave da questão designa-se gestão de energia. Como qualquer outro fator de produção, a energia deve ser gerida contínua e eficazmente.” [4].

Na generalidade das empresas, principalmente nas grandes indústrias, os custos associados à energia são significativos o que influencia não só os lucros da empresa mas leva também ao enfraquecimento da competitividade face a concorrentes globais com acesso a energia mais barata [6].

No atual contexto industrial é o aspeto económico o que mais sensibiliza as empresas a optar pela diminuição dos consumos energéticos, no entanto, a crescente preocupação ambiental veio reforçar a necessidade da contabilização e gestão da energia [4]. A gestão de energia na indústria é fundamental para diminuir o desperdício de energia e os custos a isso associados, no entanto, para que essa gestão seja eficaz é necessário um conhecimento detalhado da estrutura de consumos de energia e para isso é necessário realizar-se uma correta contabilização das quantidades de energia consumida [7].

É com base nesse conhecimento que é possível realizar-se uma análise detalhada do ponto de vista da energia, o que inclui a desagregação do consumo por tipo de energia, por equipamento, ou por operação unitária. Associando aos valores do consumo de energia os respetivos custos é possível retirar conclusões acerca do impacto que determinado tipo de energia ou equipamento tem na estrutura de custos da empresa. Também muito relevante é a análise da variação do consumo de energia com a produção. Essa correlação permite facilmente identificar se uma variação de consumos se deve a uma variação na produção ou se, pelo contrário, está associada a uma anomalia que necessite de ser investigada e corrigida [8].

Assim através da contabilização energética é possível identificar desvios na utilização da energia, investigar as causas desses desvios e, posteriormente, aplicar

determinadas medidas para corrigir esses desvios e evitar que eles se tornem a repetir de modo a que, desta maneira, haja um aumento da eficiência energética.

Apesar da contabilização energética permitir conhecer de uma forma detalhada o modo como a energia é utilizada em determinada indústria isso pode revelar-se insuficiente para uma gestão eficaz do consumo de energia e para a tomada de decisão que conduzam a efetivas melhorias de eficiência. Para além da contabilidade do consumo de energia é necessário conhecer o modo como cada equipamento ou operação unitária utiliza a energia, determinando o seu rendimento e as perdas de energia. Assim “para por em prática soluções que permitam reduzir energia em todas as utilizações, é necessário proceder a medições, recolhendo os dados necessários aos cálculos das várias perdas energéticas dos principais consumidores de energia” [7]. Aplicar soluções de melhoria nestes equipamentos significa melhorar a performance energética da empresa no geral.

No caso particular dos fornos industriais as perdas de energia mais comuns são as perdas associadas aos gases de combustão e as perdas de radiação, condução e convecção através de paredes. São vários os fatores que afetam a quantidade de energia disponível para exercer o “efeito” útil sendo esta a que resta da inicialmente introduzida no forno após lhe ser subtraída as perdas associadas aos gases de combustão, que, por sua vez, depende do excesso de ar de combustão, da sua temperatura e da temperatura dos gases de combustão. A aplicação de medidas com o intuito de aumentar a temperatura do ar de combustão, reduzir a temperatura dos gases ou reduzir a quantidade de oxigénio no ar de combustão traduz-se invariavelmente em melhorias de eficiência muito significativas.

1.4.1. Reações de combustão

As reações de combustão são reações químicas nas quais um combustível é oxidado com o objetivo de libertar calor. O oxidante mais utilizado nos processos de combustão é o ar atmosférico [9]. Na análise de processos de combustão industrial para fins energéticos é comum aproximar o ar, em base seca, a uma mistura que apresenta na sua composição 21% de Oxigénio e 79% de Azoto, ou seja 3.76 moles de N_2 por cada mole de O_2 . No entanto, o ar contem pequenas quantidades de dióxido de carbono, Hidrogénio e Árgon [10]. Este último, que pode atingir concentrações de, aproximadamente, 1% é tratado como azoto para efeitos de balanços termoquímicos, e os restantes constituintes são

desprezados na análise da reação de combustão já que a sua presença no ar atmosférico é muito reduzida [9].

Um processo de combustão é considerado teórico quando todos os elementos dos combustíveis são oxidados e os produtos de combustão não apresentam combustível não queimado nem oxigénio livre. Deste modo, nos processos de combustão em que o combustível seja um hidrocarboneto, os produtos da reação completa são o CO_2 , H_2O e o N_2 . No caso de uma reação completa que ocorra com excesso de ar, nos produtos da reação ir-se-á encontrar o O_2 em excesso. Numa reação incompleta, os elementos do combustível não são totalmente oxidados e observa-se a presença de combustível não totalmente oxidado nos produtos da combustão. Os principais motivos para que ocorra uma reação de combustão incompleta são: uma quantidade insuficiente de oxigénio na câmara de combustão e/ou uma mistura insuficiente entre combustível e o oxigénio [9].

Os processos de combustão reais dificilmente são considerados completos. Para que haja maior probabilidade de tal acontecer ou, pelo menos, para reduzir a quantidade de combustível não queimado nos produtos, é comum utilizar mais ar do que o estequiometricamente necessário para a combustão completa [9].

Quando a razão ar/combustível real é menor que a razão estequiométrica a mistura ar/combustível é considerada rica, tal situação está normalmente associada a um significativo desperdício de combustível e a uma elevada produção de poluentes [11]. No caso de a razão ar/combustível real ser superior à razão estequiométrica trata-se de uma mistura pobre. Isso significa que se está a usar no processo de combustão uma quantidade de ar acima da teoricamente necessária. A utilização de quantidades de ar acima da teoricamente necessária é prática corrente para, desse modo, se conseguir manter baixo o nível de hidrocarbonetos não queimados nos produtos da combustão. Note-se que, no entanto, quantidades muito elevadas de excesso de ar podem conduzir a um aumento das perdas pela chaminé e a uma diminuição da eficiência. Assim em processos reais de combustão é necessário um controlo preciso da quantidade de excesso de ar, pois este é um dos fatores que influencia significativamente a eficiência do processo em questão [11,3].

Para determinar a composição dos produtos de uma reação de combustão é aplicado o princípio de conservação de massa, ou seja, a massa total dos produtos deve ser igual á massa total dos reagentes e, para além disso, “a massa total de cada elemento é

conservada durante uma reação química” e é igual nos reagentes e nos produtos da combustão [9].

Mesmo com excesso de ar é praticamente impossível garantir que uma reação de combustão real seja completa. Nesses casos é impossível prever a composição dos produtos de combustão através de balanços mássicos sendo necessário recorrer à utilização um de analisador de gases (para evitar a degradação dos elementos sensores, na maior parte dos casos, estes aparelhos analisam a composição dos gases depois de condensada a água) [12].

Durante uma reação química, admitindo que os átomos de cada reagente permanecem intactos e desprezando as variações da energia cinética e potencial entre a entrada e a saída da câmara de combustão, ou seja entre os reagentes e os produtos da combustão, a variação de energia deve-se a uma mudança de estado e a uma alteração na composição química. Num sistema que envolva reação química é necessário definir um estado universal de referência para todas as substâncias já que os elementos antes e depois da reação não são os mesmos; o estado de referência escolhido corresponde a uma temperatura de 25°C e 1 atm de pressão [12].

A entalpia utilizada nos balanços energéticos compreende duas parcelas, a primeira é designada por entalpia de formação (de um dado composto) e pode ser entendida como a energia por mole de produto formada e que é libertada (ou absorvida) quando os elementos fundamentais da tabela periódica, no estado de referência, se combinam para formar esse referido produto. A segunda componente corresponde á diferença entre a entalpia sensível num estado especificado, que pode ser o estado a que o produto sai da câmara de combustão, e a entalpia sensível no estado de referência padrão. Normalmente uma reação de combustão em fornos envolve a produção de energia sob a forma de calor mas não envolve qualquer interação sob a forma de trabalho. Assim num processo de combustão típico em regime permanente o balanço energético compreende apenas a diferença entre a entalpia dos produtos e a entalpia dos reagentes e a energia sob a forma de calor disponível para exercer “efeito” útil, em terminologia de origem Anglo-Saxónica, “*available heat*” [9].

1.4.2. Tratamentos térmicos

O tratamento térmico é um processo de aquecimento e arrefecimento de metais e ligas no estado sólido sob condições controladas de temperatura, atmosfera, tempo e velocidade do aquecimento e arrefecimento, de modo a obter as propriedades desejadas. O tratamento térmico é frequentemente utilizado para aumentar a resistência do material, para aliviar tensões internas, melhorar a ductilidade e maquinabilidade, aumentar a dureza e resistência à tração, entre outros [13].

O tratamento de peças em aço requer, geralmente, elevadas temperaturas sendo portanto um dos principais requisitos dos fornos industriais onde são realizados estes tratamentos, a capacidade de fornecer o calor à temperatura necessária para que as peças atinjam as propriedades desejadas. Tal implica um elevado consumo energético por parte destes fornos [13,14].

De entre os processos de tratamento térmico conhecidos destaca-se os processos de têmpera, cementação e revenido, sendo estes os efetuados na SRAM. Segue-se uma breve explicação destes tipos de tratamento térmico.

A têmpera é um processo térmico que permite aumentar a dureza e resistência dos aços. Este processo é composto por duas etapas, a fase de aquecimento e a de arrefecimento rápido. A primeira fase consiste no aquecimento do metal até ser atingida uma determinada temperatura à qual se dá a formação de austenite que é o ponto de partida para conferir ao aço as propriedades pretendidas [14]. Na SRAM essa temperatura varia entre os 855°C e os 880°C dependendo do tipo de aço que está a ser tratado. Na fase de arrefecimento dá-se a formação de um constituinte mais duro do aço, a martensite [14].

O processo térmico de cementação tem como principal objetivo elevar a dureza superficial do aço. Através do enriquecimento da atmosfera do forno com gases ricos em carbono dá-se a difusão do carbono na estrutura cristalina do aço. No caso da SRAM a atmosfera do forno é composta por endogás e propano. Após o arrefecimento rápido das peças as suas superfícies vão endurecer devido à maior concentração de carbono, conferindo ao aço uma elevada resistência ao desgaste [14].

Na SRAM, a fase de arrefecimento tanto no que diz respeito à têmpera como à cementação, é realizada por imersão do aço em polímero (“THERMISOL P260”) que se encontra entre os 23°C e os 30°C.

Após o tratamento de cementação ou têmpera a peça pode passar pelo tratamento de revenido, sendo que este é aplicado aos aços com o objetivo de aumentar a sua ductilidade e resistência ao choque eliminando as tensões internas e corrigindo a excessiva dureza e fragilidade do material [13]. Neste processo o aço é reaquecido a temperaturas que, na SRAM, variam entre os 190°C e os 350°C, dependendo da peça a tratar. Após a passagem pelo tratamento térmico de revenido as peças são arrefecidas através de ar.

2. BENCHMARKING

O *benchmarking* trata-se da avaliação do desempenho de determinada organização, comparando os seus produtos ou processos, externamente com organizações do mesmo setor ou internamente com operações que desempenhem atividades semelhantes [15], com o objetivo de melhorar a sua eficiência produtiva, económica, ou energética. De modo a avaliar a situação energética da SRAM ir-se-á comparar a sua performance energética com empresas do mesmo setor, recorrendo para tal à base de dados do *Industrial Assessment Centers* [2].

De modo a estabelecer estas comparações sobre o estado de eficiência energética torna-se necessário dispor de um sistema de contabilidade energética que permita selecionar indicadores que relacionem o consumo de energia com a produção ou com o valor acrescentado bruto. Selecionou-se um indicador técnico, o consumo específico, e como não são conhecidos dados das empresas selecionadas que permitam o cálculo da intensidade energética, o indicador económico selecionado para proceder a esta comparação foi a relação entre o custo de energia e as vendas.

2.1. Contabilização energética

De modo a comparar a performance energética da empresa com outras empresas do mesmo setor é necessário antes de mais conhecer a sua própria estrutura de consumos.

Através da análise da evolução dos consumos com os níveis de produção pode avaliar-se o consumo específico de energia. Essa análise permite não só determinar o consumo específico como permite ainda identificar possíveis situações irregulares (ou de mau funcionamento) para as quais uma determinada variação de consumo não é acompanhada da respetiva variação de produção. A análise foi realizada a partir dos valores do consumo de energia primária e da produção mensal referentes aos anos de 2014 e 2015, estes dados são apresentados nas Figura 2.1 a Figura 2.3. As informações, disponibilizadas pela empresa, que serviram de base para a referida análise encontram-se no Anexo A.

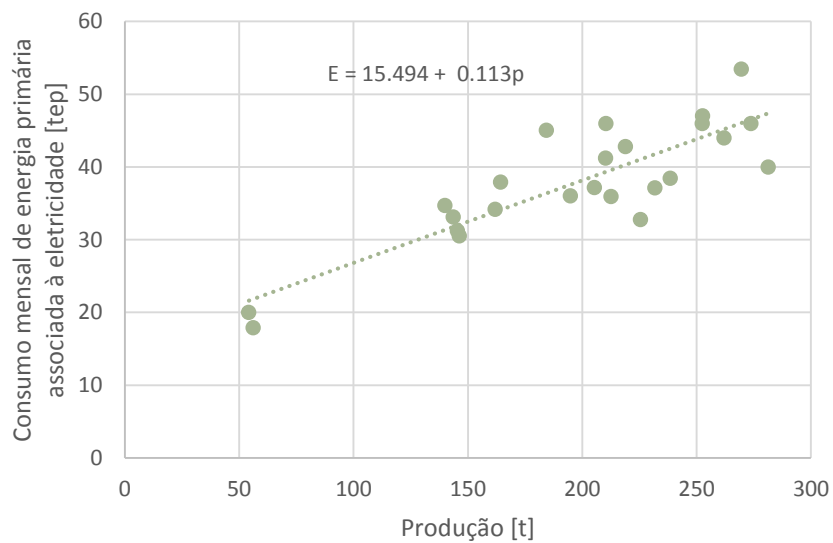


Figura 2.1: Relação entre o consumo mensal de energia elétrica e a produção (2014 e 2015).

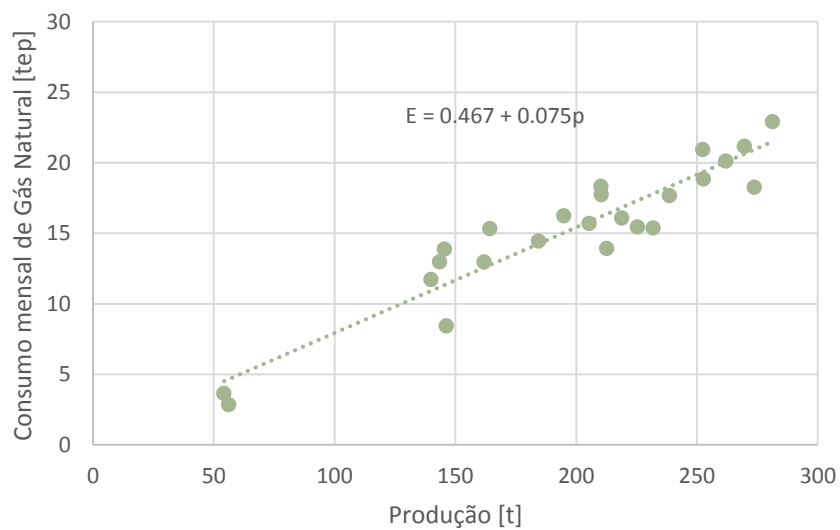


Figura 2.2: Relação entre o consumo mensal de gás natural e a produção (2014 e 2015).

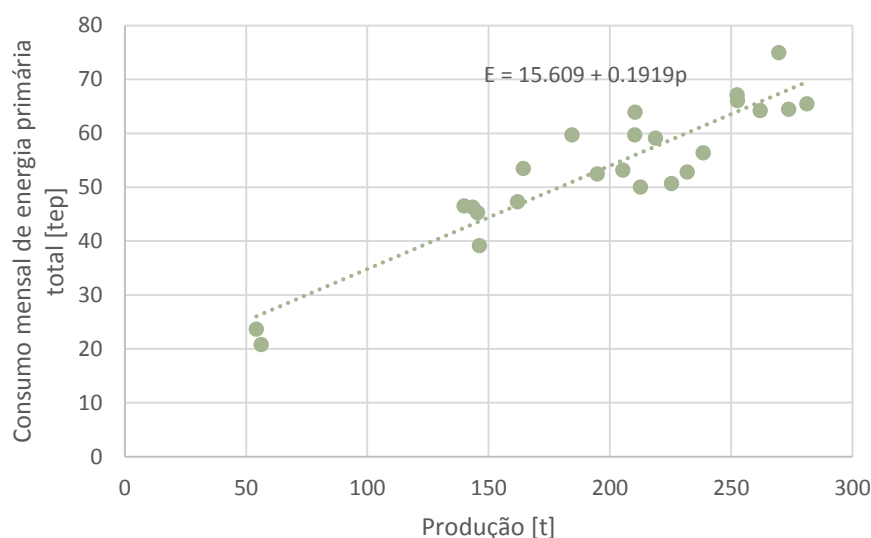


Figura 2.3: Relação entre o consumo total de energia primária e a produção (2014 e 2015).

Aproximando a variação do consumo de energia com a produção por uma reta pode escrever-se:

$$E = E_0 + mp, \quad (2.1)$$

em que E representa a energia consumida mensalmente, E_0 refere-se à parcela da energia que é independente da produção, está normalmente associada aos consumos provenientes dos equipamentos auxiliares que têm necessariamente de existir mas também eventuais perdas de energia no sistema [8]. O declive da reta, m , representa o coeficiente de afetação da energia à produção, ou seja refere-se à parcela de energia dependente da produção (p).

Dos gráficos apresentados anteriormente, o que se refere à energia elétrica, (Figura 2.1) apresenta uma dispersão considerável de valores relativamente à reta de regressão linear o que acaba por se refletir, como seria de esperar dado o peso do consumo de energia elétrica no total do consumo de energia, no gráfico referente ao consumo de energia primária total (Figura 2.3). Tal indica, muito provavelmente, que pode haver mais fatores a afetar o consumo de energia além da massa produzida. Por exemplo o consumo de energia pode depender, para além da quantidade produzida, do tipo/qualidade das correntes ou componentes de correntes produzidos.

Como foi referido anteriormente a empresa em questão apresenta uma auditoria e respetivo PReN, neste foi feita uma análise da relação entre o consumo e a produção referente ao ano de 2010. Na Figura 2.4 apresenta-se o gráfico que representa esta relação

entre o consumo de energia total e a produção e respetiva reta de regressão linear apresentado no PREn, 2011-2018.

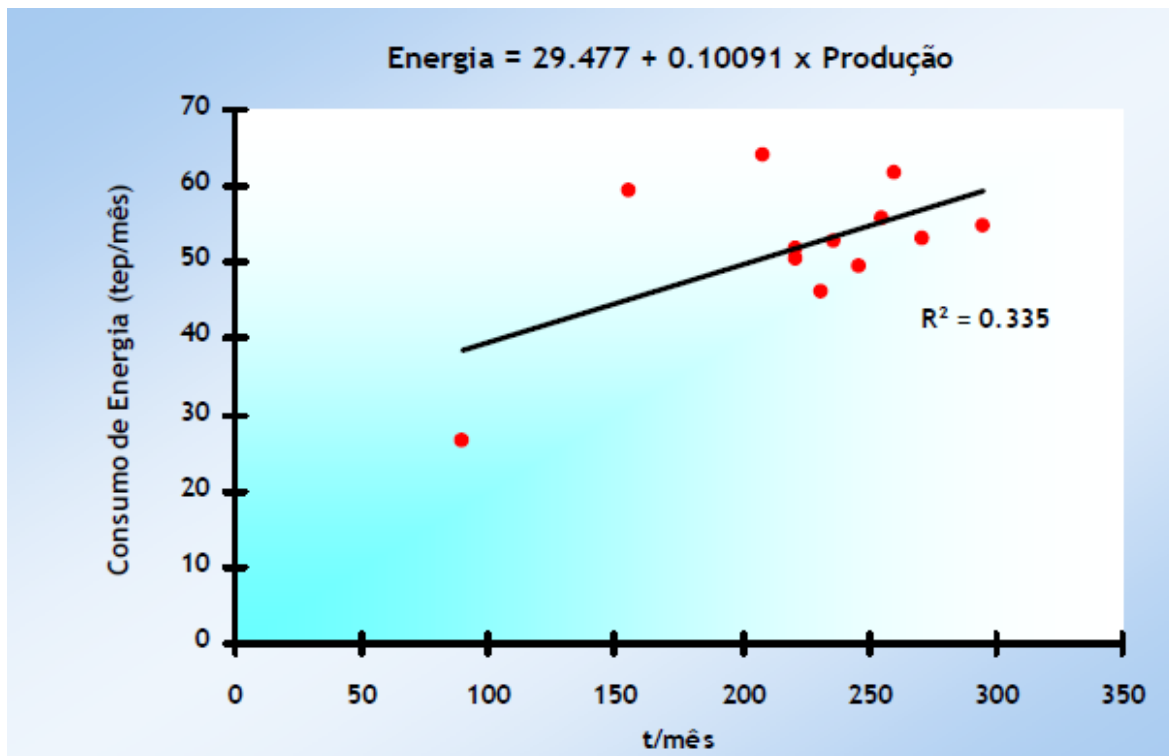


Figura 2.4: Regressão linear do consumo total de energia primária e produção, 2010 (Fonte: Plano de racionalização do consumo energético – CTCV (Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro), 2011 – 2018).

Atendendo à equação da reta de regressão linear apresentada para 2010 (Figura 2.4) e comparando-a com a obtida para 2014/2015 (Figura 2.3) repara-se que a energia associada a perdas no sistema e/ou a equipamentos auxiliares decresce significativamente, no entanto a energia dependente da produção é inferior à registada atualmente, pelo que quando se trata de uma produção significativa o consumo de energia atual supera o consumo registado em 2010, por exemplo, considerando uma produção mensal de 250 toneladas verifica-se que, para produzir essa quantidade, em 2010 eram necessários cerca de 55 tep atualmente são necessários cerca de 64 tep.

Uma outra forma de apresentar e analisar a relação entre consumo de energia e produção é ilustrada na Figura 2.5. Nesta figura é possível verificar que as variações no consumo de gás natural acompanham perfeitamente as variações de produção enquanto que as variações do consumo de energia elétrica, nem sempre acompanham essas variações. Esta discrepância poderia ser justificada pelo facto da contabilização/faturação da energia ter sido num mês diferente do que no mês em que foi efetivamente consumida, no entanto esta

hipótese foi descartada, pelo que não é encontrada explicação para o comportamento observado.

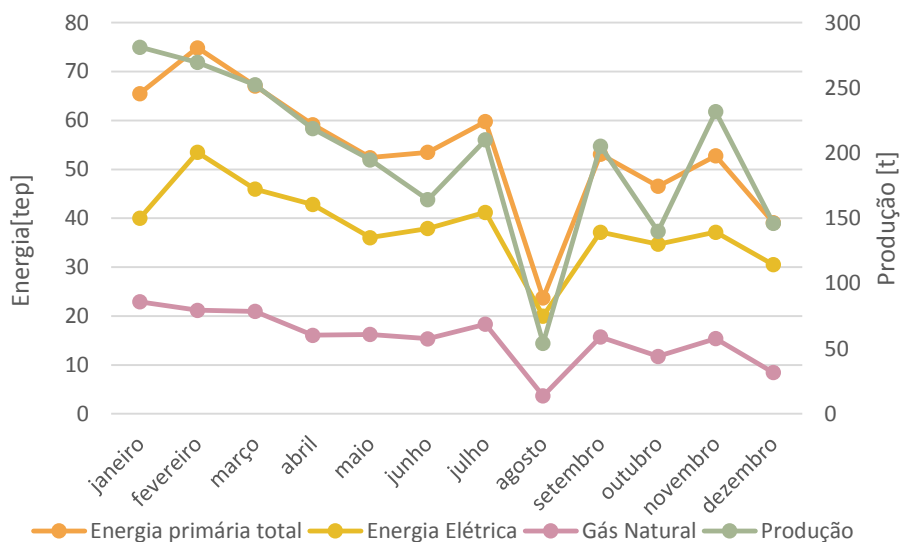


Figura 2.5: Variação entre a energia primária consumida desagregada por tipo e a produção (2015).

Na Figura 2.6 é apresentado o gráfico da evolução do consumo específico mensal durante 2015.

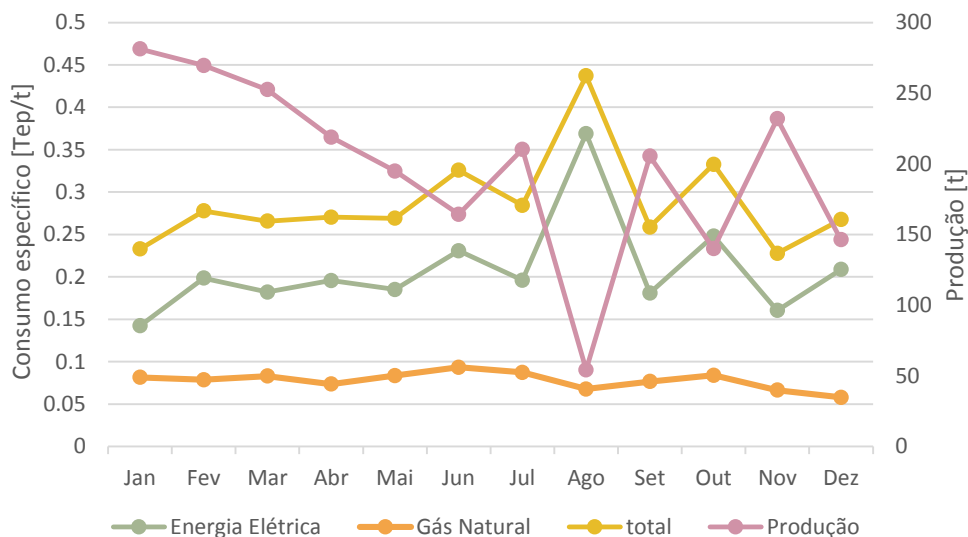


Figura 2.6: Evolução mensal do consumo específico de energia desagregado por tipo (2015).

Analisando o gráfico apresentado nota-se que o mês de agosto apresenta um acentuado “pico” de consumo específico, sendo que neste mês o nível de produção é visivelmente inferior à produção dos restantes meses, tal deve-se, provavelmente ao maior peso dos consumos auxiliares.

2.2. Comparação com empresas do setor

Com o objetivo de caracterizar do ponto de vista energético a situação da SRAM relativamente a outras empresas do mesmo sector realizou-se o *Benchmarking*. Esta ferramenta permite detetar como é que a empresa se encontra do ponto de vista da eficiência energética em comparação com outras empresas do sector.

Recorrendo à base de dados do IAC [2] foram recolhidos os dados relevantes do consumo de energia e da produção de doze empresas com atividades semelhantes às desenvolvidas pela SRAM.

Na Tabela 2.1 é apresentada a localização, os produtos produzidos e os dados relativos à produção e aos consumos de energia anuais das empresas selecionadas e da SRAM. Informações adicionais podem ser encontradas no Anexo B. Com base na informação recolhida e nos dados disponibilizados pela SRAM foram comparados os valores relativos ao consumo anual de energia e os valores do consumo específico, desagregados por tipo de energia e calculado um indicador económico que relaciona o peso dos custos de energia com as vendas.

Tabela 2.1: Empresas selecionadas para o *benchmarking* e respetivas informações [2].

	Localização	Principais produtos	Produção anual [t]	Consumo de energia		
				Energia elétrica [MWh]	Gás natural [GJ]	Energia primária total [tep]
1	Iowa	Rolamentos de película de fluido	5 902	15 312	24 470	3 875
2	Iowa	Rolamentos	6 810	13 636	18 837	3 381
3	Pensilvânia	Transmissões mecânicas	33 000	27 347	65 396	7 439
4	Massachusetts	Correntes de rolo	1 816	6 047	41 678	2 503
5	Massachusetts	Correntes de distribuição	1 816	8 765	9 316	2 262
6	Ohio	Correntes de transmissão	7 102	5 033	45 660	2 172

7	Pensilvânia	Tratamento térmico de aços e ferros	18 728	13 370	72 493	4 604
8	Minesota	Pneus e correntes	19 000	13 730	85 580	4 994
9	Pensilvânia	Correntes soldadas e sem solda	26 000	17 765	107 910	6 394
10	Pensilvânia	Correntes soldadas	12 757	10 891	62 257	3 827
11	Tennessee	Correntes de transmissão	4 994	8 738	67 526	3 490
12	Oklahoma	Montagem de motores, rolamentos	2 088	2 393	10 420	763
SRAM	Portugal	Correntes de bicicleta e componentes	2 369	2 126	779	648

2.2.1. Consumo anual de energia

Como foi referido anteriormente a SRAM consome quatro tipos de energia, energia elétrica, gás natural, gasóleo e propano. Analisando os dados recolhidos verifica-se que todas as empresas consideradas são consumidoras de energia elétrica e gás natural, no entanto apenas duas consomem propano. Tendo em conta este facto considerar-se-á apenas o consumo de energia elétrica e de gás natural, sendo o consumo das restantes formas de energia apenas consideradas quando se apresenta valores totais de energia primária.

Nas figuras seguintes (Figura 2.7, Figura 2.8 e Figura 2.9) são apresentados os gráficos que representam os valores do consumo anual de eletricidade, em MWh, de gás natural, em GJ, e de energia primária, em tep, em função da produção, das empresas em análise, bem como uma reta de regressão linear obtida com os dados das doze empresas selecionadas e respetiva equação do tipo da apresentada em (2.1).

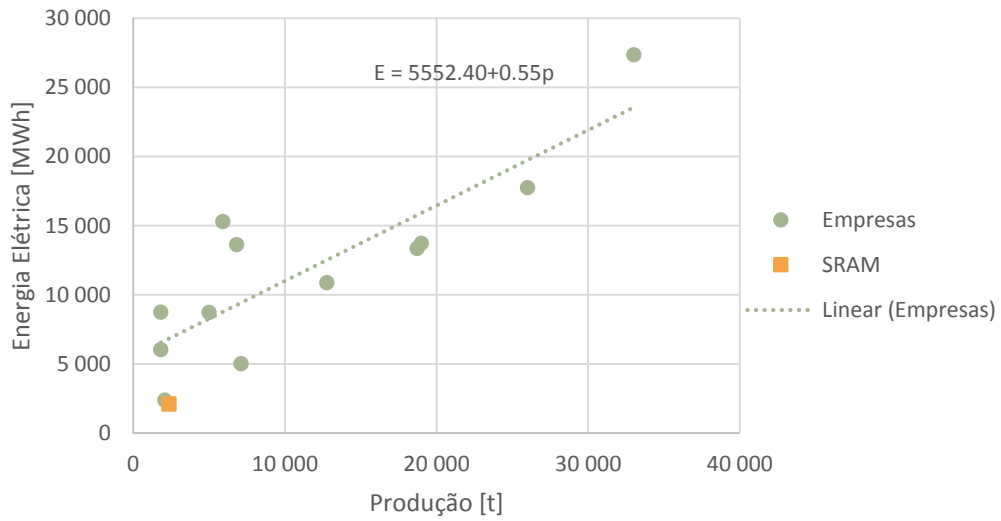


Figura 2.7: Consumo anual de energia elétrica em função da produção anual para diferentes empresas do sector metalúrgico fino (*Benchmarking*).

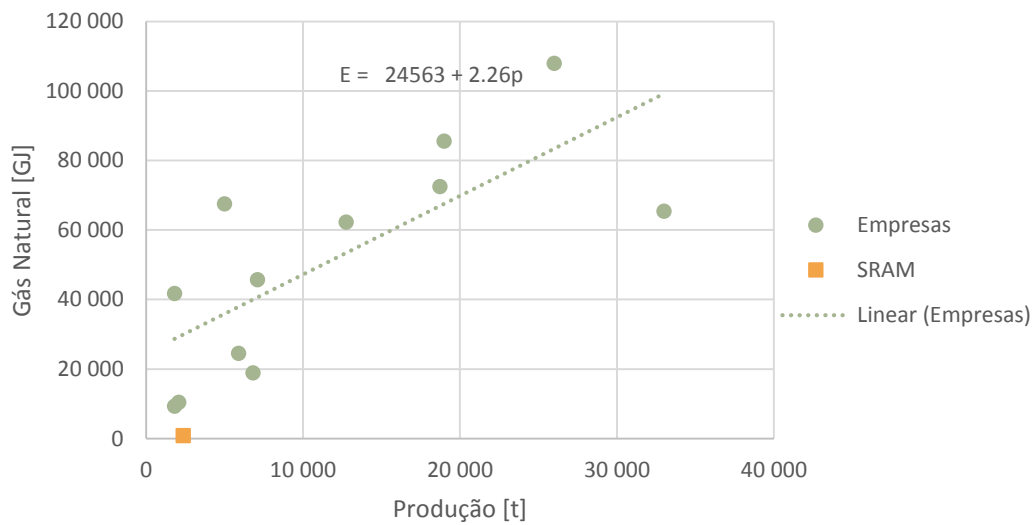


Figura 2.8: Consumo anual de gás natural em função da produção anual para diferentes empresas do sector metalúrgico fino (*Benchmarking*).

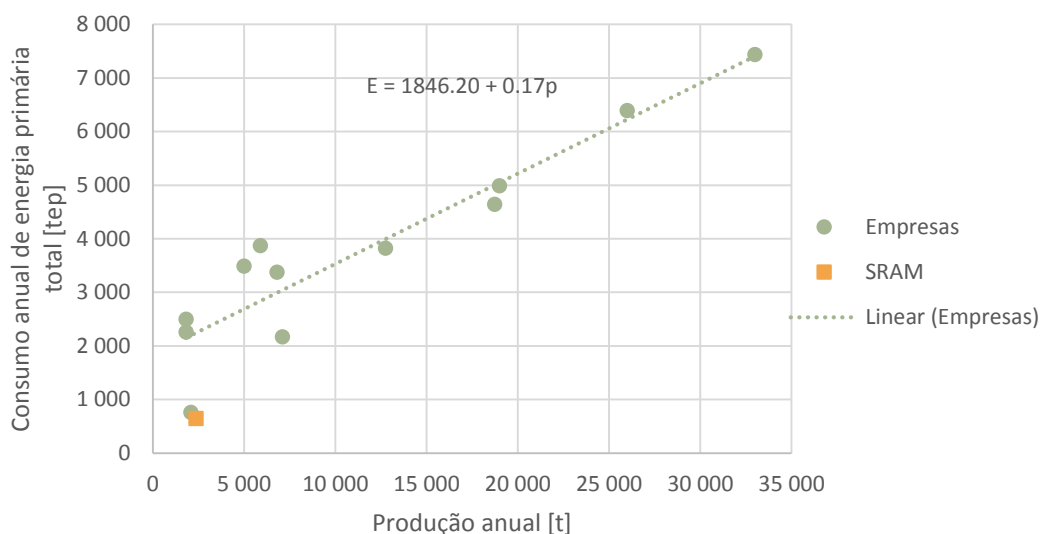


Figura 2.9: Consumo anual de energia primária em função da produção anual para diferentes empresas do sector metalúrgico fino (*Benchmarking*).

Analisando os gráficos anteriores e prestando especial atenção ao ponto que representa a SRAM verifica-se que este se situa abaixo da reta de regressão linear, ou seja, apresenta um consumo energético inferior ao consumo médio das empresas do sector. No entanto é necessário ter em conta o facto de que, entre outras coisas, não é conhecido com detalhe os produtos produzidos pelas diferentes unidades industriais o que pode fazer toda a diferença.

Na Tabela 2.2 encontram-se os valores das variáveis (E_0 e m) das retas de regressão linear apresentadas nos gráficos relativamente à energia primária total, energia elétrica e gás natural que serão úteis na análise de consumos específicos que se segue.

Tabela 2.2: Valor das variáveis das equações das retas de regressão linear (*Benchmarking*).

Variáveis	Energia elétrica [MWh]	Gás natural [GJ]	Total [Tep]
m	0.55	2.26	0.17
E_0	5 552.40	24 563	1 846.20

2.2.2. Consumo específico de energia

Se bem que o consumo específico de energia seja um indicador energético muito utilizado para comparar as performances energéticas de empresas do mesmo sector este tem que ser analisado com cuidado pois o seu valor, embora possa parecer, não é independente da produção. Na verdade para empresas mais pequenas, que apresentem menor produção, é

de esperar que o consumo em vazio (equipamento auxiliar, e.g. iluminação, climatização, etc) tenha um peso mais relevante do que para empresas de maiores dimensões.

O consumo específico obtém-se dividindo a energia consumida pela produção para um período de referência (normalmente, mensal ou anual). A variação do consumo específico com a produção, desagregado por tipo de energia, é apresentada nos gráficos das Figura 2.10 a Figura 2.12. Para além dos valores correspondendo aos consumos específicos de cada uma das empresas individualmente são também apresentadas as curvas de consumo específico, E' que resultam da divisão das equações de regressão linear pelo valor da produção:

$$E' = \frac{E_0}{p} + m, \quad (2.2)$$

em que m e E_0 tomam os valores expressos na Tabela 2.2.

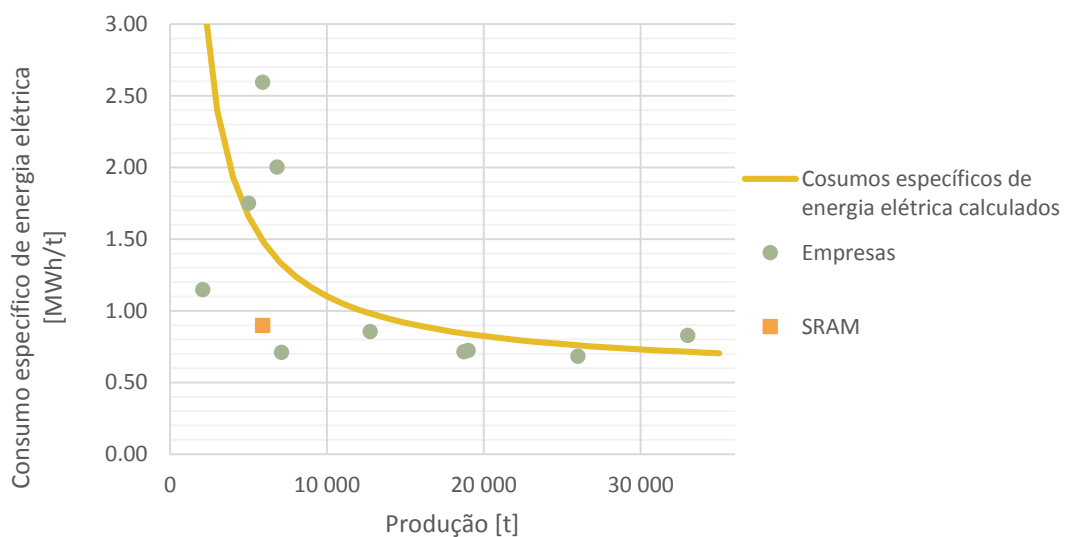


Figura 2.10: Diagrama Consumo específico de energia elétrica vs produção (*Benchmarking*).

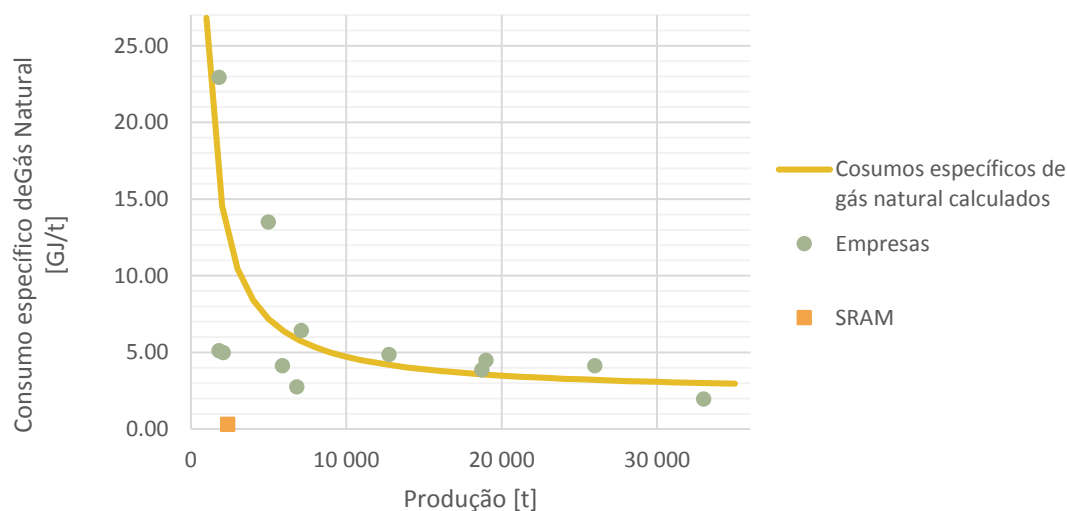


Figura 2.11: Diagrama Consumo específico de gás natural vs produção (*Benchmarking*).

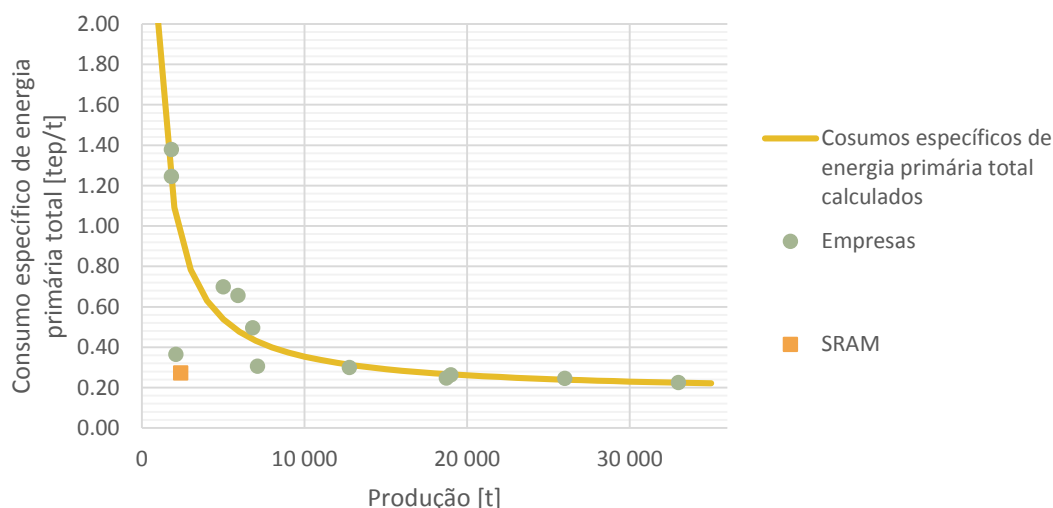


Figura 2.12: Diagrama Consumo específico de energia primária total vs produção (*Benchmarking*).

Analisando as figuras anteriores observa-se que o ponto que corresponde ao consumo específico de energia da SRAM se encontra abaixo da curva nos três casos considerados, tal facto leva a crer que a situação energética da SRAM é realmente vantajosa quando comparada com as restantes empresa.

2.2.3. Relação entre o custo de energia e as vendas

A informação disponível e recolhida não permite o cálculo do indicador económico mais conhecido, a intensidade energética (quociente entre o consumo de energia

e o VAB), pelo que ir-se-á analisar a relação entre o custo da energia e as vendas. Esses valores são apresentados no gráfico da Figura 2.13, em função da produção.

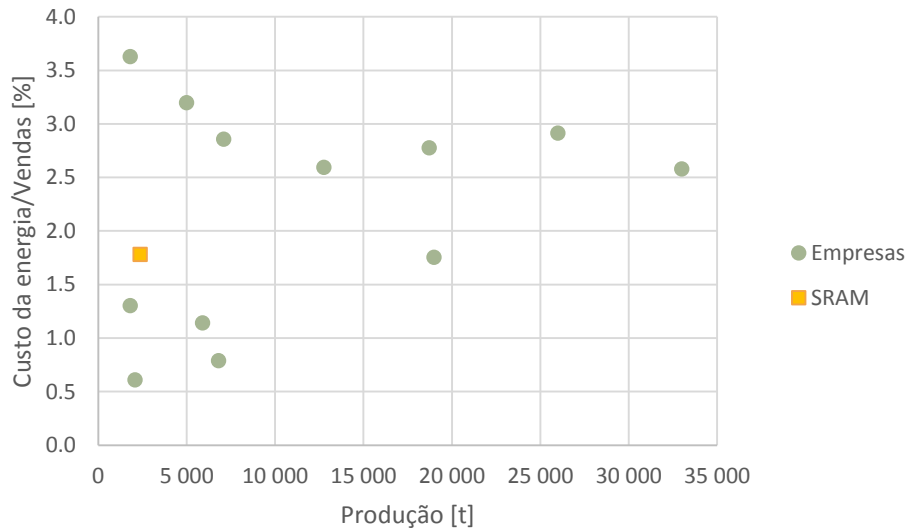


Figura 2.13: Relação entre o custo de energia e vendas [%].

Empresas com maior dimensão produtiva apresentarão mais custos de energia mas por sua vez o valor das vendas deverá também ser superior ao de empresas com menor produção, assim seria de esperar que esta relação custo de energia/vendas fosse semelhante em todas as empresas, independentemente da produção. Comparando o ponto que representa a SRAM com os que correspondem à generalidade das restantes empresas esta apresenta um valor inferior ao da maioria, no entanto se esta for comparada apenas com empresas que apresentem produção semelhante apresenta uma relação custo/vendas inferior.

3. CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS FORNOS CONTÍNUOS

No presente capítulo ir-se-á analisar detalhadamente os fornos contínuos já que serão estes, no seu conjunto, os principais consumidores de gás natural que apresenta aproximadamente 29% do consumo energético total registado na empresa.

Estes fornos estão dispostos em duas linhas idênticas paralelas, cada uma é composta por um forno onde pode ocorrer cementação ou têmpera e outro onde se dá o tratamento térmico de revenido. Na Figura 3.1 apresenta-se um esquema da disposição dos fornos contínuos.

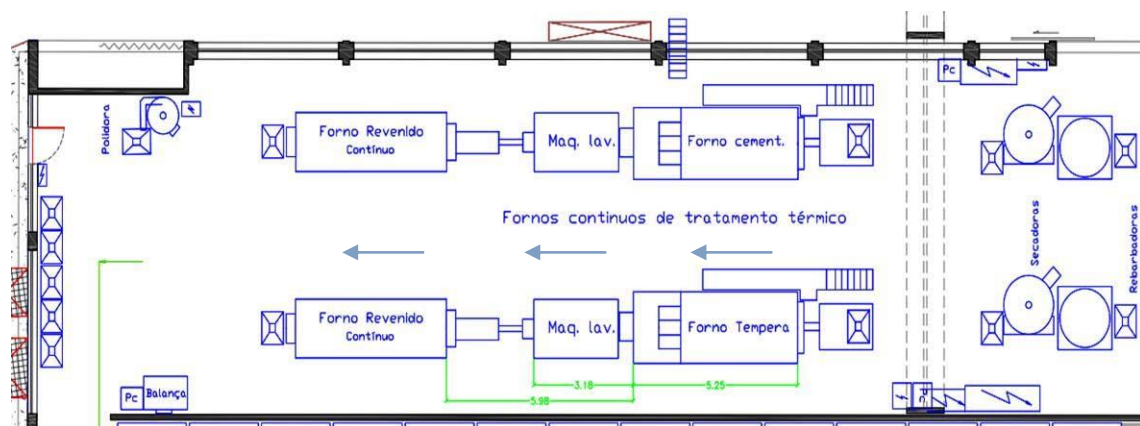


Figura 3.1: Esquema dos fornos contínuos (Fonte: SRAM).

No caso de as peças seguirem para um dos fornos contínuos elas são carregadas através de um elevador para o forno de têmpera ou cementação. Dependendo do tipo de peça que está a ser tratada existem diversas variáveis pré-definidas apresentadas de seguida:

- Temperatura das zonas de queimadores [°C];
- Temperatura da retorta [°C];
- Tempo de permanência no forno [minutos];
- Ciclo de carga [segundos];
- Dimensão da carga [kg];

- Débito de gases, sendo estes o propano² e endogás [L/h];
- Atmosfera do forno [%C, %CO e %CO₂].

Quando as peças terminam o tratamento de têmpera ou cementação caem para um banho de polímero (THERMISOL P260) sendo posteriormente recolhidas por um tapete magnetizado e seguem para uma máquina lavadora e um secador. Após a têmpera ou cementação as peças podem ainda seguir para o forno de revenido. Após este tratamento as peças são arrefecidas por uma corrente de ar ambiente gerada por um ventilador.

Os fornos contínuos de têmpera/cementação possuem oito queimadores (Aichelin) distribuídos por três zonas, sendo que as duas primeiras são compostas por três queimadores e a última por dois. Cada um dos queimadores tem uma potência nominal de 26 kW. Os fornos de revenido contêm três queimadores, cada um com uma potência nominal de 52 kW.

Os fornos de têmpera/cementação encontram-se sempre ligados, mesmo quando não estão a produzir sendo apenas desligados cerca de quatro semanas por ano, três em agosto e uma em dezembro. No entanto, importa referir que durante o funcionamento do forno os queimadores não estão continuamente ligados, quando a temperatura de cada zona atinge a temperatura *setpoint* definida para cada tipo de peça estes desligam-se voltando a ligar quando esta temperatura desce relativamente a esse valor.

Parte da informação requerida para se proceder a uma análise energética detalhada dos fornos contínuos foi obtida através da consulta de dados fornecidos pela empresa ou por visualização do procedimento ou equipamento no entanto de forma a obter outros dados essenciais foi necessário efetuar algumas medições e cálculos.

3.1. Recolha das características dos gases de combustão

A realização dos balanços de energia e massa torna necessário conhecer as características dos gases de combustão. Para identificar a quantidade de cada elemento dos gases de combustão bem como respetivas temperaturas recorreu-se a um analisador de gases que a empresa possui (Testo 320). As medições foram realizadas nos oito queimadores do forno da linha 1. No momento das medições o forno encontrava-se a realizar tratamento térmico

² O propano é utilizado apenas no tratamento de cementação, o endogás é utilizado, além da cementação no tratamento térmico de têmpera.

de têmpera, com temperatura no interior do forno de 880  C e temperatura *setpoint* dos queimadores de 900  C. Na Tabela 3.1 apresenta-se: a temperatura dos gases de combustão, a quantidade de O₂, CO e CO₂, o rendimento de combustão de cada um dos queimadores e a temperatura do ar de combustão, estes resultados são os valores médios obtidos, os resultados totais obtidos com recurso ao analisador de gases encontram-se no Anexo C.

Tabela 3.1: Média dos resultados obtidos através do analisador de gases (adaptado da SRAM).

Temperatura dos gases de combustão [�C]	471.19
O2 [%]	5.59
CO [ppm]	0.25
CO2 [%]	8.73
Rendimento dos queimadores [%]	76.3
Temperatura do ar de combustão [�C]	25.99

3.2. Cálculo da densidade e do PCI do gás natural

Para prosseguir com a análise torna-se necessário conhecer o poder calorifico inferior (PCI) e a densidade do gás natural nas condi es reais de funcionamento.

Os cálculos realizados para obter o PCI e a densidade do gás natural foram efetuados utilizando o EES e são apresentados no Anexo D. Segue-se uma explica o do que foi feito bem como os resultados obtidos.

Para obter o valor da densidade do gás natural considerando uma pressão absoluta   entrada do contador de 131 kPa e temperatura de 298 K recorreu-se   equa o de estado de gás ideal (3.1) onde P e T representam a pressão e a temperatura, v   o volume específico e R   a constante específica do gás.

$$Pv = RT \quad (3.1)$$

A constante do gás ideal varia consoante o gás, assim sendo determinou-se este valor recorrendo   equa o (3.2), sendo que M_m representa a massa molar do gás e R_u refere-se   constante universal dos gases que   a mesma para todos os gases.

$$R[kPa.m^3/kg.K] = \frac{R_u[kPa.m^3/kmol.K]}{M_m[kg/kmol]} \quad (3.2)$$

Relacionando as equações apresentadas anteriormente com a equação:

$$\rho[\text{kg}/\text{m}^3] = \frac{1}{v[\text{m}^3/\text{kg}]} \quad (3.3)$$

Obtêm-se:

$$\rho[\text{kg}/\text{m}^3] = \frac{P[\text{kPa}]}{RT[\text{kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg}]} \quad (3.4)$$

Tendo por base a equação (3.4) retira-se a densidade do gás natural nas condições de alimentação dos fornos contínuos:

- Densidade do gás natural: 0.9444 kg/m³.

Para calcular o valor do teórico do PCI calculou-se a quantidade de calor libertada durante a reação completa de combustão do gás natural em que os produtos e os reagentes se encontram no estado de referência (25 °C, 1atm) e a água dos produtos está em forma de vapor. O valor do PCI é portanto igual ao valor absoluto da entalpia de combustão (\bar{h}_c), sendo esta igual á diferença entre a entalpia dos produtos e a entalpia dos reagentes de uma reação completa de combustão. Na equação em (3.5) demonstra-se o que foi dito bem como fórmula para obter a entalpia dos produtos ($\bar{H}_{\text{produtos}}$) e dos reagentes ($\bar{H}_{\text{reagentes}}$) considerando que \bar{h}_f° representa a entalpia de formação, \bar{h} e \bar{h}° referem-se à entalpia sensível no estado especificado e no estado de referência, respetivamente e N refere-se ao coeficiente estequiométrico de cada reagente ou produto na reação de combustão.

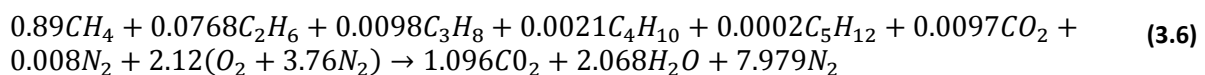
$$\bar{h}_c = \bar{H}_{\text{produtos}} - \bar{H}_{\text{reagentes}} \leftrightarrow \sum N_p(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p - \sum N_r(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_r \quad (3.5)$$

Para calcular a entalpia de combustão torna-se então necessário conhecer a composição do gás natural, para tal acedeu-se ao portal de acesso às infraestruturas de gás natural da REN [16], tendo-se obtidos os valores registados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Composição do gás natural [16].

Composição do gás natural	Fração Molar [%]
Metano [CH ₄]	89.34
Etano [C ₂ H ₆]	7.68
Propano [C ₃ H ₈]	0.98
Butano [C ₄ H ₁₀]	0.21
Pentano [C ₅ H ₁₂]	0.02
Dióxido de Carbono [CO ₂]	0.97
Azoto [N ₂]	0.80

Para a composição apresentada na Tabela 3.2 a equação da reação de combustão é, tendo em conta o balanço das espécies químicas:



Note-se que como os produtos e os reagentes se encontram ambos á temperatura de referência (25 °C) as entalpias sensíveis e de referência são iguais assim para calcular a entalpia de combustão só é considerada a entalpia de formação:

$$\bar{h}_c = \sum N_p(\bar{h}_f^\circ)_p - \sum N_r(\bar{h}_f^\circ)_r \quad (3.7)$$

Substituindo os valores em (3.7) calculou-se a entalpia de combustão, e considerando o seu módulo obteve-se o PCI do gás natural em MJ/kmol (852.935 MJ/kmol), de modo a obter este valor por kg de gás natural procedeu-se ao cálculo da massa molar do gás natural ($M_{m,GN}$) tendo em conta a sua composição química:

$$M_{m,GN} = \sum N_i \times M_{m,i} \quad (3.8)$$

Sendo que N_i e $M_{m,i}$ representam, respetivamente a composição e a massa molar de cada elemento químico do gás natural. Dividindo o valor do PCI em MJ/kmol pela massa molar do gás natural (17.86 kg/kmol) obtém-se:

- PCI do gás natural: 47.752 MJ/kg.

3.3. Consumos de energia

De modo a obter os consumos nestes fornos efetuou-se o registo dos volumes de gás no início de cada turno durante quatro dias. Em cada dia existem três turnos, cada um com oito horas, sendo as mudanças de turno efetuadas à meia-noite e meia, oito e meia e quatro e meia. Estes registos correspondem portanto a doze turnos de funcionamento do forno. O forno de revenido da linha 2 não tem contador de gás natural assim estes registos referem-se a ambos os fornos da linha 1 e ao forno de têmpera/cementação da linha 2. Esta informação é apresentada no Anexo E.

Para cada lote tratado nestes fornos é preenchida uma ficha que compreende informações tais como: hora de início de lote, hora de fim de lote e tipo de peça. Como foi referido anteriormente para cada tipo de peça encontra-se estabelecida a carga e o respetivo ciclo, tendo por base essa informação calculou-se a produção relativa a cada lote, tendo assim a produção em cada turno. Essa informação foi obtida após o tratamento dos resultados apresentados no Anexo E. Na Tabela 3.3 apresenta-se os consumos e respetivas produções para ambas as linhas de fornos por cada turno analisado.

Tabela 3.3: Consumo e produção em cada turno analisado.

Turno	Forno linha 1			Forno linha2	
	Têmpera/cementação		Revenido	Produção [kg]	Consumo [m ³]
	Produção [kg]	Consumo [m ³]	Consumo [m ³]		
1	0	27	0	474	59
2	0	27	0	850	65
3	0	26	0	1184	70
4	0	34	4	1295	73
5	827	47	3	1200	66
6	761	47	3	963	66
7	0	28	0	1326	71
8	0	28	0	1026	67
9	0	26	0	1097	64
10	0	33	4	632	64
11	796	44	4	685	64
12	1050	51	4	0	44
Total	3434	418	22	10733	773

No ano de 2015 passaram por estes fornos 895.87 toneladas de aço, sendo que 669.70 se referem aos fornos da linha 1 e 226.17 aos fornos da linha 2. Tendo em conta estes valores e os consumos e produções registados na Tabela 3.3 estima-se o consumo específico e o consumo anual dos referidos fornos:

- Linha 1:

$$\text{Consumo específico} = \frac{418 + 22}{3434} \approx 0.13 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{Consumo anual} = 0.13 \times 669.70 \times 1000 \approx 85\,809 \text{ m}^3$$

- Linha 2:

$$\text{Consumo específico} = \frac{773}{10733} \approx 0.07 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{Consumo anual} = 0.07 \times 226.17 \times 1000 \approx 16\,290 \text{ m}^3$$

Assim o consumo anual estimado para ambas as linhas é cerca de 102 099 m³, Atendendo aos dados anuais de 2015 relativos ao consumo de gás natural apresentados no Anexo A pode concluir-se que estes fornos são responsáveis por cerca de 50% do consumo total de gás natural o que corresponde a cerca de 55 684 € de gastos em energia a eles associados. De referir que não é aqui contabilizado o consumo do forno de revenido da linha 2 já que não foi possível obter o consumo por parte deste, assim estes dados referem-se a ambos os fornos da linha 1 e ao forno tempera/cementação da linha 2.

Como a análise realizada posteriormente se dedica exclusivamente aos fornos de têmpera/cementação (não sido conhecidos os dados requeridos para fazer uma análise detalhada acerca dos fornos de revenido), os valores utilizados como base para cálculos anuais são os relativos aos fornos de têmpera/cementação:

- Consumo anual: 4 411.03 GJ/ano
- Custo anual: 53 344 €/ano

3.3.1. Análise dos consumos registados

Analisando a Tabela 3.3 observa-se que os fornos da linha 2 estiveram mais tempo em funcionamento que os fornos da linha 1, sendo que apenas num dos turnos não esteve a produzir. Como os consumos dos fornos quando estes não se encontram a produzir

são significativos fez-se a análise dos consumos de energia considerando as duas situações: o forno a produzir e o forno parado (consumo em vazio). Sendo os fornos em ambas as linhas exatamente iguais, e visto que ambos realizam os mesmos tratamentos térmicos para realizar a referida análise optou por se utilizar os dados relativos aos fornos da linha 1, já que são conhecidos os consumos quando o forno se encontra em funcionamento, o consumo em vazio e o consumo do forno de revenido.

Selecionou-se os turnos 5,6,11, e 12 para analisar os consumos quando o forno se encontra a produzir. Na Tabela 3.4 apresentam-se: os consumos e produção por hora de funcionamento e a temperatura média em cada turno relativamente a ambos os fornos da linha 1.

Tabela 3.4: Dados de consumo e produção, fornos contínuos - linha 1.

Fornos contínuos - Linha 1					
Turno	Produção por hora [kg/h]	Forno têmpera/cementação		Forno de revenido	
		Consumo por hora [m³/h]	Temperatura Média [°C]	Consumo por hora [m³/h]	Temperatura Média [°C]
5	103	5.875	868	0.375	208
6	95	5.875	880	0.375	225
11	100	5.500	872	0.500	230
12	131	6.375	855	0.500	240
Média	107	5.906	869	0.438	226

Na Tabela 3.5 encontram-se os consumos e respetiva média quando o forno não se encontra a produzir.

Tabela 3.5: Consumos quando o forno não se encontra a produzir.

Consumo do forno em vazio		
Turno	Forno Têmpera/cementação – Linha 1	
	Consumo [m ³]	Consumo por hora [m ³ /h]
1	27	3.375
2	27	3.375
3	26	3.250
7	28	3.500
8	28	3.500
9	26	3.250
Média	27	3.375

Tendo em conta os valores médios apresentados Tabela 3.4 e Tabela 3.5 e os valores de PCI e densidade calculados anteriormente é possível calcular os consumos horários:

- Consumo médio quando o forno está a produzir:

$$5.906 \times 47.755 \times 0.944 \approx 266.354 \text{ MJ/h}$$

- Consumo médio do forno em vazio:

$$3.375 \times 47.755 \times 0.944 \approx 152.212 \text{ MJ/h}$$

A energia necessária para elevar a temperatura inicial das peças a tratar até à temperatura de saída, ou seja a energia útil (\dot{E}_{util}) é obtida por:

$$\dot{E}_{util} = \dot{m}_{aço} \times c_p (T_{aço,out} - T_{aço,in}) \quad (3.9)$$

Em que $\dot{m}_{aço}$ representa a quantidade de aço produzida por hora, c_p refere-se ao calor específico do aço ao carbono, à temperatura média de 447°C, considera-se que a temperatura final do aço ($T_{aço,out}$) é igual á temperatura média no interior do forno e a temperatura inicial ($T_{aço,in}$) é a temperatura ambiente de 25 °C. Tendo em conta os valores apresentados em Tabela 3.4 tem-se que a energia útil é 62.476 MJ/h. Para se conseguir fornecer esta energia útil às peças a tratar é necessário utilizar uma quantidade de gás natural ($\dot{E}_{teórica}$) que tenha em conta o rendimento da combustão obtido pelo analisador de gases (Tabela 3.1).

$$\dot{E}_{teórica} = \frac{\dot{E}_{util}}{0.76} = \frac{62.476}{0.76} \approx 82.205 \text{ MJ/h} \quad (3.10)$$

Subtraindo o consumo em vazio ao consumo do forno quando este se encontra a produzir, obtém-se o consumo realmente necessário para exercer o efeito útil (\dot{E}_{real}):

$$\dot{E}_{real} = 266.354 - 152.212 \approx 114.14 \text{ MJ/h} \quad (3.11)$$

Comparando ambos os valores obtidos observa-se que a diferença entre eles é significativa, no entanto é necessário ter em atenção que nesta análise foi considerado que a temperatura no interior do forno e o rendimento da combustão são idênticos quando o forno se encontra parado e quando este está a produzir.

3.4. Balanço energético ao forno

De modo a obter as devidas considerações acerca da utilização da energia nos fornos de têmpera/cementação teve-se por base o balanço energético do forno:

$$\dot{Q}_e + \dot{W}_e + \sum \dot{m}_r(\vec{h}_f^\circ + \vec{h} - \vec{h}^\circ)_r = \dot{Q}_s + \dot{W}_s + \sum \dot{m}_p(\vec{h}_f^\circ + \vec{h} - \vec{h}^\circ)_p \quad (3.12)$$

Considera-se as taxas de entrada e saída de energia sob a forma de trabalho (\dot{W}_e , \dot{W}_s) nulas bem como a taxa de entrada de calor (\dot{Q}_e), assim a saída de calor durante o processo de combustão por hora de funcionamento do forno (\dot{Q}_s) expressa-se pela diferença entre a energia dos produtos e a energia dos reagentes (3.13), esta representa a energia sob a forma de calor disponível para exercer trabalho útil, *Available Heat*. De salientar que não foram feitas considerações sobre as perdas energéticas relativas aos fornos de revenido já que não foi possível obter informações a cerca das temperaturas e composição dos gases de combustão.

$$\dot{Q}_s = \sum \dot{m}_r(\vec{h}_f^\circ + \vec{h} - \vec{h}^\circ)_r - \sum \dot{m}_p(\vec{h}_f^\circ + \vec{h} - \vec{h}^\circ)_p \quad (3.13)$$

Para descobrir os valores de massa dos reagentes e dos produtos procedeu-se ao cálculo da fração molar de cada elemento aplicando o princípio de conservação da massa na

reação de combustão real considerando a composição de gases apresentada na Tabela 3.1, conhecendo esse valor, a massa molar de cada elemento e do gás natural calcula-se a fração mássica de cada reagente e produto, posto isto e tendo em conta a massa do gás natural calcula-se a massa de cada elemento que compõe a reação de combustão, por hora de funcionamento do forno. Assim aplicando a equação apresentada em (3.13) retira-se o *Available Heat*, subtraindo esse valor ao consumo de gás natural obtém-se a quantidade de energia perdida através dos gases de combustão.

Conhecida a energia utilizada de forma útil calculada em (3.9) e subtraindo-a ao valor de *Available Heat* obtém-se as perdas através das paredes, e outras perdas tais como as perdas atmosféricas, perdas “por aberturas” entre outras. Na Tabela 3.6 que se segue apresentam-se os valores obtidos por hora de funcionamento do forno, bem como o consumo médio de gás natural obtido anteriormente. Estes cálculos encontram-se no Anexo D.

Tabela 3.6: Distribuição energética por hora de funcionamento do forno de têmpera/cementação.

Energia útil, transferida para as peças [MJ/h]	<i>Available heat</i> [MJ/h]	Energia associada aos gases de combustão [MJ/h]	Energia associada a outras perdas [MJ/h]	Consumo de gás natural [MJ/h]
62.476	202.053	64.301	139.577	266.354

Na Figura 3.2 apresenta-se um diagrama de *Sankey* que representa os resultados obtidos na Tabela 3.6.

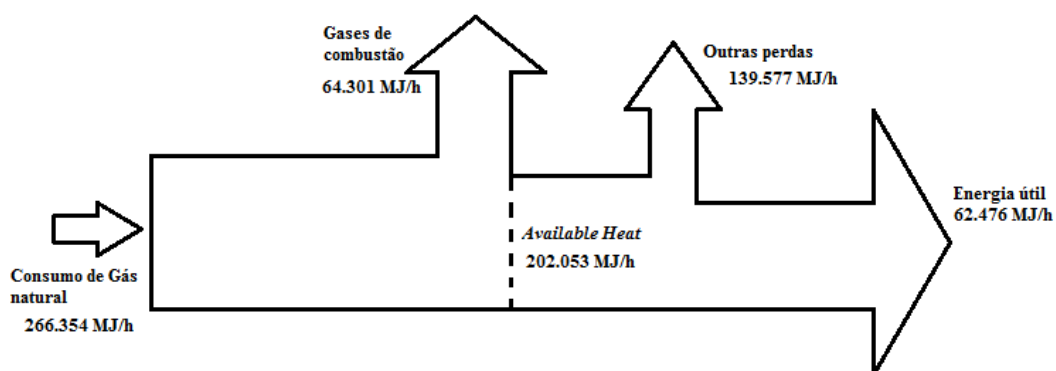


Figura 3.2: Diagrama de *Sankey* – Forno de têmpera/cementação.

Tendo em conta os dados apresentados verifica-se que este forno apresenta uma eficiência térmica que ronda os 23%. As perdas energéticas associadas aos gases de combustão é significativa correspondendo a aproximadamente 24% da energia total consumida. No entanto a maior parte da energia consumida é perdida através das paredes,

aberturas no forno, perdas atmosféricas entre outras apresentando 52 % do consumo energético, tendo em conta este resultado torna-se necessário identificar as causas destas perdas energéticas para tal procedeu-se ao cálculo da energia perdida através das paredes do forno.

3.4.1. Transferência de calor através das paredes

De modo a determinar as perdas energéticas através das paredes torna-se necessário conhecer a temperatura destas, para tal recorreu-se a uma câmara termográfica. Com recurso às fotografias obtidas pela câmara identifica-se que a temperatura média das paredes dos fornos se situa entre os 50 °C e os 70 °C, assim para determinar as perdas energéticas através das paredes consideraram-se três temperaturas distintas, a temperatura mínima de 50°C, uma temperatura média, 63.78 °C (determinada com recurso às fotografias) e uma temperatura máxima de 70 °C. Na Figura 3.3 apresenta-se uma das fotografias obtidas pela câmara, sendo as restantes apresentadas no Anexo F.



Figura 3.3: Fotografia da parede posterior do forno têmpera/cementação (câmara termográfica).

Não sendo possível identificar a temperatura da parede superior e inferior do forno e observando as fotografias obtidas pela câmara termográfica constata-se que as paredes laterais se encontram a temperaturas semelhantes, assim assumir-se-á uma temperatura média para todas as paredes do forno.

Tendo em conta as elevadas temperaturas de operação no forno as temperaturas consideradas são relativamente baixas, no entanto tendo em contas as grandes dimensões do

forno (apresenta 52 m² de área) as perdas pelas paredes representarão grande parte das perdas energéticas.

A energia perdida pelas superfícies exteriores das paredes para o meio envolve transferências de calor por convecção e por radiação, assim a taxa de energia sob a forma de calor transferida através das paredes ($\dot{Q}_{paredes}$) resulta do somatório da taxa de calor perdida por convecção ($\dot{Q}_{convecção}$) e por radiação ($\dot{Q}_{radiação}$):

$$\dot{Q}_{paredes} = \dot{Q}_{convecção} + \dot{Q}_{radiação} \quad (3.14)$$

De modo a determinar a transferência de calor por convecção recorreu-se á lei de Newton do arrefecimento apresentada em (3.15) em que A representa a área da superfície através da qual a transferência de calor convectiva ocorre, ΔT refere-se á diferença de temperatura entre a superfície e o fluido afastado da superfície, neste caso o ar à temperatura ambiente (25°C).

$$\dot{Q}_{convecção} = h \times A \times \Delta T \quad (3.15)$$

O coeficiente de transferência de calor por convecção (h) depende de diversas variáveis, tais como a geometria da superfície, as propriedades do fluido, a velocidade de escoamento e a natureza do movimento do fluido. Neste caso o movimento do fluido depende apenas das diferenças de densidade resultantes do aquecimento deste tratando-se portanto de um fenómeno de convecção natural. Assim como este coeficiente não é conhecido foi necessário recorrer a correlações empíricas de modo a determinar este valor. Para tal recorreu-se a uma ferramenta Excel utilizada para determinar coeficientes de convecção natural considerando diversas configurações, para adquirir esta ferramenta recorreu-se ao *site: bright huben engineering* [17]. As equações utilizadas por esta ferramenta para calcular os coeficientes de transferência de calor por convecção natural surgem de correlações de números adimensionais, sendo estes o número de Nusselt, o número de Prandtl, o número Grashof e o número de Rayleigh.

Tendo em conta o valor obtido para o número de Rayleigh, existem várias correlações para determinar o número de Nusselt, estas dependem da geometria da peça em questão. Neste caso, sendo que os fornos são retangulares considera-se três geometrias distintas:

- a) Superfície plana vertical;
- b) Placa horizontal com superfície superior quente;
- c) Placa horizontal com superfície inferior quente.

Os valores do coeficiente de transmissão de calor por convecção calculados para cada uma das situações são apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Valores do coeficiente de transmissão de calor por convecção.

Temperatura média das paredes [°C]	Coeficiente de transmissão de calor por convecção [W/m ² .K]		
	a)	b)	c)
50 °C	3.88	10.16	2.77
63.78 °C	4.40	11.73	3.11
70°C	4.58	12.32	3.23

Conhecido o coeficiente de transmissão de calor por convecção para cada geometria de superfície, aplicando a equação (3.15) calculou-se a transferência de calor por convecção através da parede inferior do forno, superior e das paredes laterais, para cada temperatura considerada. Somando estes valores obtém-se a energia perdida por convecção através das paredes dos fornos, os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 3.8.

De modo a determinar a transferência de calor por radiação considera-se que as paredes do forno apresentam a emissividade usada na câmara termográfica para obter as temperaturas, assim $\varepsilon = 0.60$. Recorrendo à lei de Stefan Boltzmann apresentada em (3.16) determina-se o valor de energia transferida por radiação pelas paredes do forno. Considere-se que ε se refere à emissividade da superfície, T_s e T_r referem-se respetivamente, à temperatura absoluta da superfície transmissora (a parede do forno) e da superfície recetora (as paredes do pavilhão onde o forno está instalado) e σ é a constante de Stefan Boltzmann ($\sigma = 5.6697E-8$ W/m²K).

$$\dot{Q}_{radiação} = \varepsilon \times \sigma \times A \times (T_s^4 - T_r^4) \quad (3.16)$$

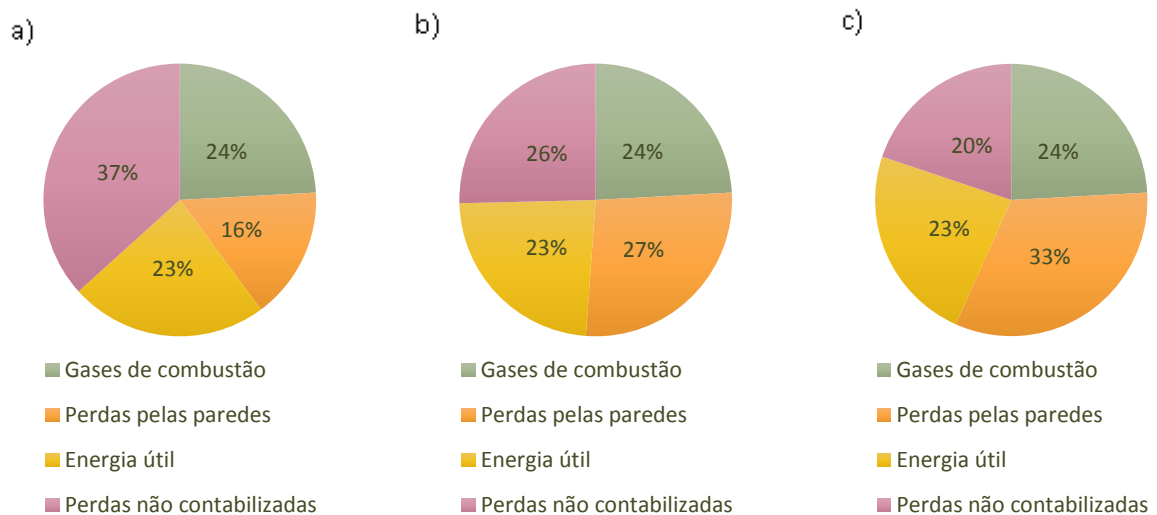
Na Tabela 3.8 apresentam-se os valores das perdas energéticas pelas paredes por convecção, radiação e o total para cada temperatura considerada.

Tabela 3.8: Perdas energéticas através das paredes de cada forno de têmpera/cementação para as diferentes temperaturas consideradas.

$T_{\text{paredes}} [^{\circ}\text{C}]$	50 °C	63.78 °C	70 °C
$\dot{Q}_{\text{Convecção}} [\text{MJ/h}]$	22.744	40.252	48.783
$\dot{Q}_{\text{Radiação}} [\text{MJ/h}]$	19.095	31.702	37.924
$\dot{Q}_{\text{Total}} [\text{MJ/h}]$	41.839	71.954	86.707

Todos os cálculos efetuados relativamente às perdas energéticas através das paredes dos fornos encontram-se no Anexo G.

Nos gráficos apresentados de seguida (Figura 3.4) encontra-se representada a distribuição do consumo energético associado às três temperaturas consideradas para as paredes.

**Figura 3.4:** Distribuição energética, considerando que a temperatura média das paredes é a) 50 °C; b) 63.78 °C e c) 70 °C.

Analisando os gráficos apresentados verifica-se que para a temperatura máxima das paredes considerada as perdas energéticas não contabilizadas são consideráveis, estas incluem as perdas por aberturas no forno quando as portas são abertas para carga e descarga do material, a perdas por condução e a reações endotérmicas não contabilizadas.

Atendendo aos gráficos apresentados na Figura 3.4 e considerando o consumo anual e os custos associados a esse consumo calculados anteriormente, estima-se que dos 4 411.03 GJ consumidos anualmente pelos fornos apenas 1 034.65 GJ são efetivamente

utilizados para elevar a temperatura do aço à temperatura necessária o que corresponde a 12 512 €, assim sendo os restantes 3 376.38 GJ (40 832 €) serão gastos para compensar as perdas que ocorrem através das chaminés, das paredes e de outras perdas não contabilizadas. Posto isto apresenta-se na Tabela 3.9 os valores energéticos e respetivos custos associados às perdas energéticas através das paredes, dos gases de combustão e a outras perdas não contabilizadas.

Tabela 3.9: Perdas energéticas por hora de funcionamento do forno, anuais e respetivos custos (2015).

Perdas energéticas	Através das paredes		Não contabilizadas		Gases de combustão	
	Energia perdida anualmente [GJ]	Custo anual [€]	Energia perdida anualmente [GJ]	Custo anual [€]	Energia perdida anualmente [GJ]	Custo anual [€]
T_{paredes}						
50 °C	693	8 379	1 619	19 575	1 065	12 878
63.78 °C	1 192	14 411	1 120	13 543		
70 °C	1 436	17 365	876	10 589		

Repare-se que mesmo considerando a temperatura média das paredes 50 °C, as perdas energéticas representam um custo anual de 8 379 €, no entanto sendo que, como foi dito anteriormente, as perdas não contabilizadas referem-se em grande parte a perdas atmosféricas e a componentes estruturais dos fornos, como os queimadores, será de esperar que a energia perdida pelas paredes seja mais significativa quando comparadas com as referidas perdas não contabilizadas.

4. MEDIDAS DE EFICIÊNCIA

Como se constatou no capítulo anterior as perdas energéticas mais significativas são as que ocorrem através das paredes seguindo-se as perdas associadas aos gases de combustão.

Existem diversos fatores que influenciam as perdas associadas aos gases de combustão, tais como a temperatura do ar e dos gases de combustão e a quantidade de oxigénio presente no ar de combustão. De modo a reduzir estas perdas propõe-se a redução da quantidade de oxigénio no ar de combustão, ou seja reduzir o excesso de ar.

Quanto às perdas pelas paredes aconselha-se a implementação de isolamento.

A implementação destas medidas é considerada para aplicação em ambos fornos de têmpera/cementação, os valores de poupanças anuais calculados têm por base os consumos e custos anteriormente calculados, que contabilizam não só o forno a produzir mas também quando está parado.

4.1. Diminuição do excesso de ar

O excesso de ar típico utilizado nas reações de combustão envolvendo gás natural varia entre os 5% e os 10 % de excesso de ar [18]. Na situação atual a reação de combustão dos fornos de têmpera/cementação apresenta cerca de 33% de excesso de ar que corresponde a 5.9% de O₂, assim propõe-se a redução do excesso de ar para 15% o que equivale a cerca de 3% de O₂.

Inicialmente aplicou-se o princípio de conservação da massa à reação de combustão real admitindo um excesso de ar de 15%. Posto isto calculou-se a quantidade de O₂ nos produtos de combustão, em base seca. Conhecida a quantidade de cada produto da combustão, calculou-se a energia libertada (*Available Heat*) por mole de gás natural consumido, este cálculo encontra-se no Anexo H. Tendo por base o *Available Heat* na situação atual calcula-se a poupança conseguida com a afinação dos queimadores:

- Available Heat:

Available Heat na situação atual (AH_1): 647.071 MJ/kmol.

Available Heat com a diminuição do excesso de ar (AH_2): 671.907 MJ/kmol.

$$\text{Poupança}[\%] = \frac{AH_2 - AH_1}{AH_2} \approx 3.7 \%$$

Após a diminuição do excesso de ar o *Available Heat* aumenta, pois a quantidade energia que está associada aos gases irá diminuir e essa quantidade de energia estará agora disponível para exercer o “efeito” útil. Sendo que o *Available Heat* aumenta na ordem dos 3.7% o consumo de gás natural necessário para que se obtenha o *Available Heat* da situação atual irá decrescer também 3.7 %. Assim enquanto que na situação atual são consumidos 266.354 MJ/h para exercer um *available heat* de 202.053 MJ/h após implementação desta medida serão consumidos 256.50 MJ/h, poupando-se portanto 9.854 MJ/h. Tendo por base os dados anuais de consumo e custos calculados no capítulo anterior estima-se as poupanças anuais atingidas após a implementação desta medida:

- Consumo de gás natural anual:

Consumo atual: 4 411 GJ

Consumo com a diminuição do excesso de ar: 4 248GJ

Poupança: 163 GJ

- Custos de gás natural anuais:

Custo atual: 53 344 €

Custo com a diminuição do excesso de ar: 51 371€

Poupança: 1 974 €

A implementação desta medida não envolve qualquer investimento, é necessário apenas ajustar a quantidade de O_2 . A afinação dos queimadores para uma quantidade de O_2 mais reduzido já foi posta em prática na empresa, no entanto apesar de se ter verificado um aumento do rendimento dos queimadores, foi constatado que devido à tendência para a colmatação dos filtros dos ventiladores estes, rapidamente, deixavam de fornecer a quantidade de ar que estavam a fornecer no momento de afinação conduzindo a situações de aumento de CO. Assim para que esta medida cause o devido efeito é necessário a limpeza frequente destes filtros. Atualmente os filtros são limpos de duas a duas semanas, a

frequência de limpeza necessária terá que ser ajustada de acordo com os resultados obtidos, para tal será necessário controlar a quantidade de CO nos gases de combustão. Quando este valor atingir as 100 ppm procede-se á limpeza dos filtros, deste modo será possível manter o rendimento dos queimadores a um nível superior.

4.2. Aplicação de isolamento térmico nas paredes do forno

Como se verificou no capítulo anterior a energia perdida pelas paredes representa grande parte do consumo energético do forno. De modo a reduzir as perdas através das paredes, ir-se-á fazer o estudo acerca da implementação de isolamento térmico tendo em conta cada temperatura considerada para as paredes. Existem diversos tipos de isolamentos térmicos que poderão ser aplicados nos fornos com o objetivo de reduzir transferência de calor pelas paredes, na análise que se segue considera-se a implementação de um isolamento exterior, lâ de rocha com revestimento de fita de alumínio. Foi escolhido este isolamento pela facilidade de implementação e custos reduzidos que implica.

Todos os resultados apresentados para esta medida foram obtidos através dos cálculos apresentados no Anexo G.

De modo a calcular a quantidade de energia transferida através do isolamento térmico torna-se necessário conhecer a temperatura exterior do isolamento, para tal aplica-se o balanço energético nas paredes do forno, considerando que a transferência de calor por condução através da parede interior do forno até á superfície exterior do isolamento é igual ao somatório da transferência de calor por radiação e convecção da superfície exterior do isolamento para o meio envolvente. Assim pela conservação de energia fica:

$$\dot{Q}_{condução} = \dot{Q}_{convecção} + \dot{Q}_{radiação} \quad (4.1)$$

A transferência de calor por convecção e radiação determinam-se recorrendo às equações apresentadas em (3.15) e (3.16), respetivamente. Neste caso para o cálculo da transferência de calor por radiação é considerada a emissividade do alumínio ($\epsilon = 0.09$).

A transferência de calor por condução pode ser obtida por:

$$\dot{Q}_{condução,Total} = \frac{T_f - T_i}{R_{cond,f} + R_{cond,i}} \quad (4.2)$$

Sendo que T_f e T_i representam, respetivamente, a temperatura da parede interior do forno e da superfície exterior do isolamento. Considera-se que as paredes interiores do forno se encontram à mesma temperatura que o interior deste, pelo que $T_f = 866 \text{ }^\circ\text{C}$. $R_{\text{cond},f}$ e $R_{\text{cond},i}$ referem-se às resistências térmicas do forno e do isolamento, respetivamente. A resistência térmica por condução é obtida por:

$$R_{\text{cond}} = \frac{L}{KA} \quad (4.3)$$

Em que L e K representam a espessura e condutibilidade térmica, respetivamente e A é a área das paredes do forno. No entanto não são conhecidos dados para calcular a resistência térmica das paredes do forno, então como é conhecida a transferência de calor através das paredes sem isolamento (determinada no capítulo anterior), aplica-se o balanço energético das paredes do forno (4.1) antes da implementação do isolamento de modo a obter a resistência térmica por condução nas paredes do forno antes da aplicação do isolamento.

Considerando que o isolante escolhido apresenta 25 mm de espessura, a condutibilidade térmica deste varia consoante a temperatura das paredes do forno consideradas ($50 \text{ }^\circ\text{C}$, 63.78°C e 70°C), sendo este 0.034 W/mK , 0.035 W/mK e 0.036 W/mK respetivamente, calcula-se a resistência térmica do isolamento (4.3).

Conhecidas ambas as resistências térmicas aplicando a equação (4.2) e relacionando-a com (4.1) obtém-se a transferência de calor através das paredes do forno com a implementação do isolamento, bem como a temperatura exterior (T_i).

Na Tabela 4.1 apresenta-se a energia perdida através das paredes, agora isoladas, e a temperatura da superfície exterior.

Tabela 4.1: Perdas energéticas através das paredes completamente isoladas.

Temperatura das Paredes com isolamento [$^\circ\text{C}$]	Perdas energéticas através das paredes [MJ/h]
49.12	24.31
56.65	32.78
59.45	35.86

Com a implementação desta medida seria possível reduzir as perdas pelas paredes em 42%, 54% ou 59 %, dependendo da temperatura das paredes que corresponde a

poupanças anuais entre os 3 510€ e os 10 184€, dependendo se a temperatura média das paredes é de 50°C ou 70°C.

No entanto é difícil isolar completamente todas as paredes dos fornos, já que estas não são completamente planas, nas duas paredes laterais situam-se as portas do forno e na parede frontal estão localizados os queimadores, assim estudou-se a implementação de isolamento apenas nas superfícies planas, a parede superior, inferior e a parede posterior do forno. Com esta medida as perdas energéticas pelas paredes decrescem 25%, 33% ou 36%. O que corresponde a uma redução que pode ir de 10.412 MJ/h a 31.391MJ/h, dependendo da temperatura média das paredes. Na Tabela 4.2 apresentam-se os resultados anuais obtidos para a implementação parcial de isolamento em ambos os fornos de têmpera/cementação, tendo em conta os valores anuais relativos às perdas energéticas pelas paredes apresentados na Tabela 3.9.

Tabela 4.2: Poupanças anuais após a implementação de isolamento.

Temperatura das Paredes do Forno [°C]	Perdas energéticas anuais através das paredes [GJ]	Custo anual [€]	Poupanças	
			Energia [GJ]	Euros [€]
50	520	6 294	172	2 085
63.78	794	9 603	398	4 808
70	916	11 078	520	6 287

Segundo a empresa de refratários e isolamentos ISOLUSA, cada manta de lã de rocha com dimensões (7320 × 610) mm custa cerca de 98.70€, caso se opte por implementar isolamento nas paredes consideradas o isolamento custa cerca de 1 382€, com o revestimento alumínio ronda os 1 416 € (para ambos os fornos de têmpera cementação). Assim, mesmo considerando a temperatura mínima para as paredes dos fornos (50 °C), sendo que são poupados 2 085 € ao ano, no primeiro ano é pago o investimento. Caso se pretenda implementar isolamento em todas as superfícies o investimento total ronda os 2 428 €.

Na Figura 4.1 apresenta-se um diagrama de *Sankey* que representa a distribuição energética após a implementação das medidas propostas, considerando a temperatura média para as paredes de 63.78 °C. Observa-se que o consumo de gás natural decresce cerca de 12% e a eficiência energética do forno aumenta para 27%.

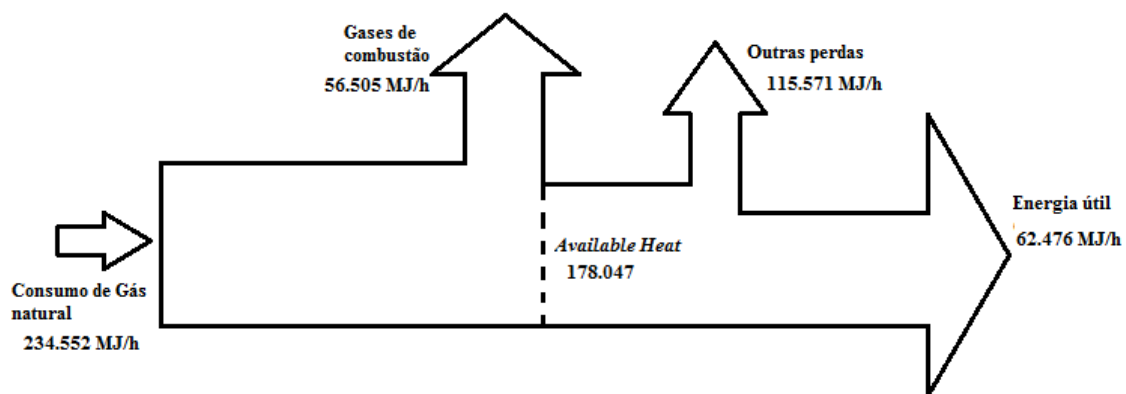


Figura 4.1: Diagrama de Sankey após implementação das medidas propostas.

5. ÁLGEBRA PARA MODELAÇÃO PREVISIONAL DE CONSUMOS DE ENERGIA

A capacidade que uma unidade industrial tem em conseguir prever alterações de consumo de energia associadas a variações de produção ou às condições particulares de funcionamento de uma determinada operação unitária é extremamente importante no âmbito da gestão de energia. Um modelo previsional permite, por exemplo, antecipar picos de carga e evitar os problemas a isso associados e perspetivar variações de custos decorrentes de variações do preço de combustíveis ou do preço da energia, e fazer a gestão financeira adequada a essa situação. Dado o interesse que existe no desenvolvimento deste tipo de modelos, nesta secção será apresentada e ilustrada, com um exemplo relativo à produção industrial de alumina, a álgebra necessária para construir um modelo de previsão de consumos e de custos de energia. Com recurso a este método é possível fazer as mais diversas análises energéticas, permitindo calcular o consumo e custo desagregados por tipo de energia, por equipamento, mensal ou anualmente entre outras funcionalidades.

Empresas industriais de grande dimensão e complexidade, com vários equipamentos e uma vasta gama de produtos apresentam também vários e complexos fluxos energético, assim não é fácil a contabilização destes consumos. Nestes casos é necessário estruturar os consumos de energia de modo a avaliar a eficiência energética do modo mais objetivo possível [19]. Desta forma, neste método, o sistema energético de uma empresa está representado numa matriz que expressa a quantidade de energia consumida por cada equipamento ou por mês.

Para dar início à implementação desta metodologia é necessário ter dados iniciais dos consumos de cada tipo de energia associados às variáveis que se pretendam analisar (equipamento, mês, ano, processo, entre outros). Assim partindo do conhecimento destes consumos é possível obter uma vasta gama de informações úteis e detalhadas para futuras considerações energéticas.

De modo a perceber melhor esta metodologia de modelação segue-se um exemplo prático de implementação. Todos os cálculos foram realizados recorrendo ao EES, apresentando-se no Anexo J.

5.1. Modelo previsional de consumo e custos de energia para uma empresa de produção de alumina

O exemplo apresentado de seguida corresponde a uma empresa padrão³ de produção de alumina. Os dados iniciais sobre esta empresa incluem os fluxos de energia e massa desagregados por operação unitária.

A empresa em questão apresenta doze operações distintas e usa três tipos de energia, energia elétrica, gás natural e vapor. Na Figura 5.1 apresenta-se o fluxograma que representa o processo de produção de alumina bem como as operações unitárias associadas e os respetivos fluxos energéticos.

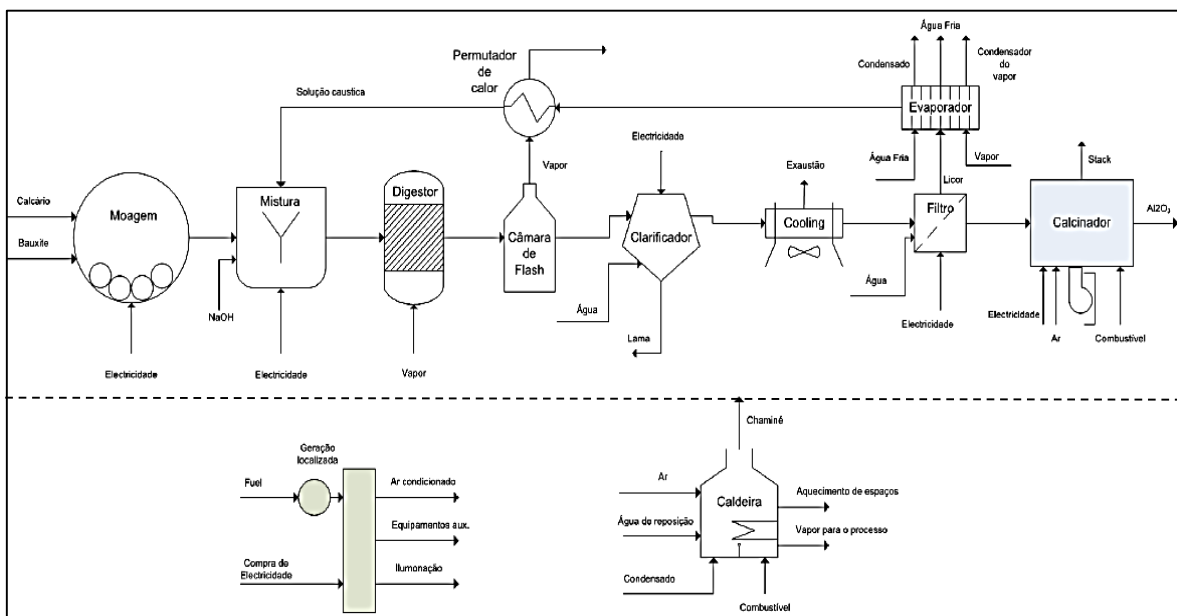


Figura 5.1: Fluxograma do processo de produção de alumina [12].

Numa primeira fase considerar-se-á que a caldeira e o gerador não fazem parte do processo, já que além de serem equipamentos consumidores de energia também produzem energia para o processo. Os consumos específicos por operação unitária serão apresentados sob a forma de matrizes do tipo A_{ej} , considerando que o índice e representa cada consumidor de energia (exceto o gerador e caldeira) assim este varia entre um e dez e j representa o tipo de energia que varia de um a três, sendo $j=1$ relativo à energia elétrica, $j=2$ ao gás natural e $j=3$ refere-se ao consumo de vapor.

³ Tratam-se de dados que se referem à média/padrão de consumos de energia para empresas do setor dos materiais não metálicos [20].

Neste exemplo optou-se por inicialmente caracterizar detalhadamente os consumos energéticos, apresentando-os de várias formas e posteriormente apresentar algumas utilidades desta ferramenta.

5.1.1. Caracterização dos consumos energéticos

Inicialmente foi construída uma matriz onde foram introduzidos os consumos específicos desagregados por operação e por tipo de energia fornecidos (CEE). Esta é a informação de base, expressa em Btu por lbm de produto acabado.

$$CEE = \begin{bmatrix} cee_{11} & cee_{12} & cee_{13} \\ cee_{21} & cee_{22} & cee_{22} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ cee_{9,1} & cee_{9,2} & cee_{9,3} \\ cee_{10,1} & cee_{10,2} & cee_{10,3} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

O primeiro passo do tratamento foi transformar a matriz dos consumos específicos em unidades do Sistema Imperial para unidades para unidades do Sistema Internacional. A nova base para o cálculo do consumo específico será a tonelada e por uma questão prática e de facilidade de manipulação, as unidades usadas para os diferentes tipos de energia serão diferentes, assim: a eletricidade será expressa em kWh/tonelada enquanto que o gás natural e o vapor virão em MJ/tonelada. A matriz de transformação (TU) de unidades terá a forma:

$$TU = \begin{bmatrix} TU_{11} & 0 & 0 \\ 0 & TU_{22} & 0 \\ 0 & 0 & TU_{33} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Onde TU_{ii} é o coeficiente de transformação de unidades de Btu/lbm para, respetivamente, kWh/tonelada, MJ/tonelada e MJ/tonelada, com i a variar de 1 a 3. Logo:

$$CEE(SI) = CEE(BU) \times TU \quad (5.3)$$

O cálculo dos consumos específicos por tipo de energia obtém-se a partir de:

$$CEDTE = (CEE(SI))^T \times ICE)^T \quad (5.4)$$

Onde ICE é uma matriz coluna de 10 elementos unitários. O resultado do produto anterior será uma matriz linha com três elementos (CEDTE) em que cada um dos elementos representa o consumo específico total de cada um dos três tipos de energia.

No caso de os valores de produção mensal estarem disponíveis, o que é uma situação muito comum, pode facilmente calcular-se o consumo mensal de energia, desagregado por tipo de energia através de:

$$CME_{ij} = PM_i \times CETDE_j \quad (5.5)$$

Onde PM_i ($i=1\dots 12$) é uma matriz coluna com os valores da produção mensal e CME_{ij} será uma matriz com 12×3 elementos ($i=1\dots 12$, $j=1\dots 3$), em que cada linha corresponde ao consumo mensal dos três tipos de energia.

Tendo em conta que no processo industrial em estudo existe um gerador de eletricidade, nem toda a energia elétrica consumida pelo processo é comprada. Parte da energia elétrica consumida advém do gerador, ou seja, é produzida localmente e afeta o consumo de combustível (para o gerador). A partir dos dados referentes à energia elétrica produzida pelo gerador calculou-se a percentagem de energia elétrica consumida pelo processo que é produzida localmente (PG).

Conhecido este valor calcula-se as matrizes que representam a quantidade de energia elétrica consumida mensalmente que é comprada (EEC) e a que é produzida pelo gerador (EEPG), através de:

$$\begin{aligned} EEPG_i &= CME_{i1} \times PG \\ EEC_i &= CME_{i1} - EEPG_i \end{aligned} \quad \text{com } i = 1,12 \quad (5.6)$$

O processo em questão precisa de combustível não só para consumo direto mas também para produzir eletricidade e vapor. Considerando a energia elétrica produzida pelo gerador mensalmente, calculada com a equação (5.6) bem como a eficiência do gerador (η_{gerador}) é possível calcular a matriz que representa o consumo de combustível do gerador em cada mês (CCG):

$$CCG_i = \frac{EEPG_i}{\eta_{\text{gerador}}}, \text{ com } i = 1,12 \quad (5.7)$$

De modo a descobrir o consumo mensal de combustível pela caldeira (CCC) procedeu-se á mesma metodologia aplicada para calcular o consumo de combustível por parte do gerador:

$$CCC_i = \frac{CME[i, 3]}{\eta_{caldeira}}, \quad \text{com } i = 1,12 \quad (5.8)$$

Assim o combustível total consumido pela empresa resulta do somatório do consumo de combustível direto, combustível consumido pelo gerador e pela caldeira:

$$CCT_i = CME_{i2} + CCG_i + CCC_i, \quad \text{com } i = 1,12 \quad (5.9)$$

Para determinar os custos energéticos basta multiplicar o preço unitário de cada tipo de energia pela matriz que representa os respetivos consumos conforme está explicitado na equação (5.10) onde (CUSTO_{elec,i}) e (CUSTO_{GN,i}) se referem, respetivamente, ao custo da energia elétrica e ao custo do gás natural consumido no mês i, sendo que P_{elec} representa o preço unitário da energia elétrica e P_{GN} refere-se ao preço unitário de gás natural.

$$\begin{aligned} CUSTO_{elec,i} &= EEC_i \times P_{elec} \\ CUSTO_{GN,i} &= CCT_i \times P_{GN} \end{aligned} \quad \text{com } i = 1,12 \quad (5.10)$$

5.2. Aplicação ao caso de estudo

A aplicação desta metodologia permite prever modificações dos consumos e dos custos da energia associados a, por exemplo, alterações de eficiência dos processos, do preço unitário de energia, e nível de produção. Optou por se apresentar de que modo esta ferramenta pode prever alterações nos consumos e custos de energia como consequência da variação do custo unitário da energia, da produção e da eficiência energética de alguns dos equipamentos de processo produtivo, tendo como base o exemplo de produção de alumina apresentado.

5.2.1. Previsão de alterações de consumos e custos ao longo dos anos face à variação dos preços unitários e da produção

Ao longo dos anos qualquer empresa está sujeita a alterações dos preços da energia, a variações na produção e a modificações do equipamento produtivo. A evolução

do consumo de energia numa empresa está diretamente relacionada com o nível de produção, por sua vez os custos energéticos são afetados não só pelos consumos, e produção, mas também pelo preço da energia. Conseguir prever os custos de energia tendo em conta as previsões para a evolução do nível de produção e para os preços da energia, é uma capacidade importante para os gestores de empresas intensivas do ponto de vista energético. A “álgebra” introduzida nas secções anteriores permite, recorrendo a estimativas dos preços de energia ao longo dos anos e estimando a taxa de evolução da produção, estimar os consumos de energia e os respetivos custos para anos futuros.

A ilustração da afirmação anteriormente referida passou, numa primeira fase, pela realização de um processo de pesquisa e recolha de dados que permitisse estabelecer um padrão, mais ou menos realista, de variação do nível de produção da empresa em estudo [2]. Como só foi possível recolher dados referentes a um ano de produção (2013) admite-se que para os anos restantes (por disponibilidade de dados a análise foi realizada entre 2012 e 2016) e para este exemplo, que a produção variou, relativamente a esse ano de “referência” de modo idêntico à produção anual de alumina nos USA (v. U.S Geological Survey) [21]. Com base nestes valores fez-se uma estimativa de modo a conhecer a produção da empresa do caso de estudo no ano 2016. Posto isto e conhecidos os consumos específicos de cada tipo de energia determina-se o consumo total de energia relativos a cada ano.

Para conhecer a evolução dos custos associados ao consumo de energia ao longo dos anos é necessário conhecer os preços de ambos os tipos de energia consumidos pela empresa em questão. Essa informação foi obtida a partir da página da internet da DGEG [22]. Note-se que os dados relativos ao preço da eletricidade só estavam disponíveis até ao ano 2014 e os do gás natural até 2015. Com base nesses valores procedeu-se á estimativa do preço de energia elétrica para 2015 e 2016 e gás natural para 2016 [23]. Apresenta-se nas seguintes matrizes os preços unitários de gás natural (VP_{GN}) e da energia elétrica (VP_{elec}) ao longo dos cinco anos considerados:

$$VP_{GN}[\text{€/GJ}] = \begin{bmatrix} 11.39 \\ 11.66 \\ 12.10 \\ 11.57 \\ 11.92 \end{bmatrix} \quad VP_{elec}[\text{€/KWh}] = \begin{bmatrix} 0.064 \\ 0.068 \\ 0.070 \\ 0.069 \\ 0.070 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Conhecidos os valores dos custos unitários, calculou-se o custo total de energia para cada ano considerado, VC_k , em que o índice k refere-se ao ano considerado e varia entre 1 e 5 (2012 a 2016). A matriz apresentada em (5.13) representa o custo total gasto em €/ano.

$$VC_k = VP_{GN_k} \times \sum_{i=1}^{12} CCT_i + VP_{elec_k} \times \sum_{i=1}^{12} EEC_i \quad (5.12)$$

$$VC[\text{€}] = \begin{bmatrix} 1.964 \times 10^7 \\ 2.026 \times 10^7 \\ 2.096 \times 10^7 \\ 1.829 \times 10^7 \\ 1.975 \times 10^7 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

A variação anual da produção, dos custos unitários e dos custos totais calculados desta maneira para o caso de estudo que tem vindo a ser analisado, pode ser observada na Figura 1.2.

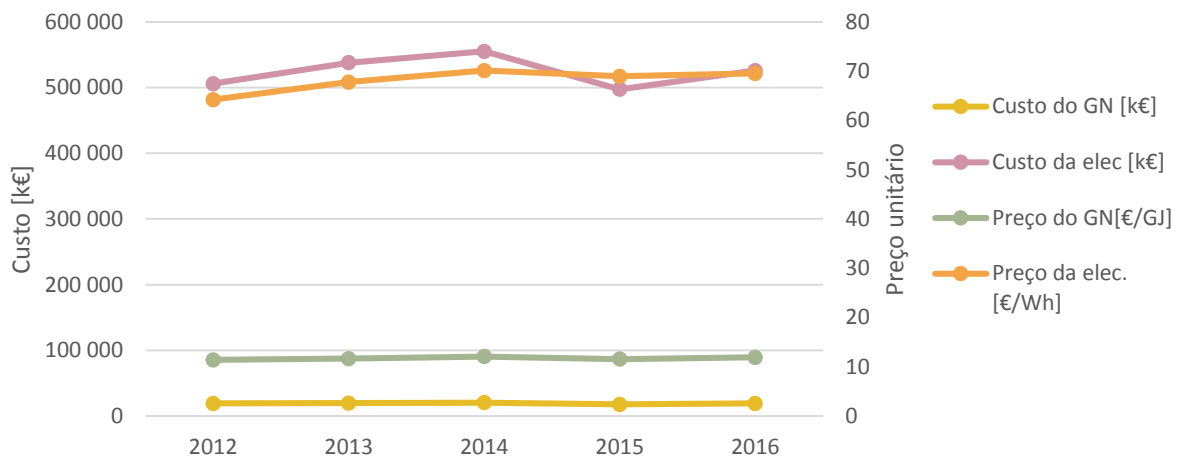


Figura 5.2: Gráfico representativo da variação de custos energéticos em função da variação do preço unitário de energia.

Note-se que a partir da previsão da produção e do custo unitário de gás natural e de eletricidade para 2016 o modelo/metodologia calcula o custo anual estimado, uma informação importante para a gestão económico-financeira da empresa. Aplicar esta análise num caso real permite retirar informações valiosas do que será de esperar no futuro. Tendo registos da variação de produção ao longo dos anos é possível estimar qual será a produção e consequentemente o consumo energético no ano seguinte, assim recorrendo a estimativas

do preço unitário de energia é possível fazer as devidas considerações e tomar medidas de modo diminuir o consumo energético e respetivos custos.

5.2.2. Previsão de consumos e custos decorrentes de alterações de eficiência

Para além da produção e do custo unitário da energia, os custos energéticos de uma empresa também podem ser afetados com alterações ao nível da eficiência de funcionamento de algumas máquinas, operações ou processos. Com recurso à metodologia que tem vindo a ser descrita é possível estimar a variação tanto dos custos como dos próprios consumos decorrentes de alterações na eficiência.

Recorrendo novamente à base de dados do IAC foi possível ter acesso a recomendações propostas para empresas semelhantes à do caso de estudo. De entre as várias propostas de melhoria existentes na bases de dados para este tipo de indústria selecionou-se uma referente à caldeira por ser, tipicamente, um grande consumidor de energia. A medida selecionada prendia-se com o *Aproveitamento da energia sob a forma de calor associada aos gases de combustão para pré aquecer a água de alimentação da caldeira* [2]. Associado a esta recomendação, na referida base de dados, é possível obter o valor da poupança de energia alcançado com a sua implementação. Como não é fornecida nenhuma informação sobre o consumo de energia na caldeira é impossível saber-se o peso percentual dessa poupança no consumo total. Esse valor percentual de poupança pode ser determinado a partir do valor típico (percentual) do consumo de energia da caldeira neste tipo de indústria. Essa informação não está disponível no IAC *Database* mas pode ser encontrado no *Plant Energy Profiler* (PEP) [24].

Para o tipo de indústria em questão os dados do PEP indicam que o consumo de energia em caldeiras é de 25% do consumo de gás natural. Com este valor (25%), e conhecido o consumo de gás natural para a empresa para a qual foi feita a recomendação em causa (pré aquecer a água de alimentação da caldeira) é possível estimar qual é o consumo anual de gás natural na caldeira e tendo o valor da poupança de energia anual associada à implementação da anteriormente referida saber qual a percentagem de poupança. Admitindo que recomendações idênticas têm percentagens de poupança idênticas é possível usar esse valor no caso de estudo apresentado e estimar as consequências ao nível da variação dos consumos e dos custos.

Assim após calcular uma estimativa do que seria esperado do consumo de gás natural por parte da caldeira e dividindo esse valor pela poupança conseguida com a implementação da medida de eficiência referida verifica-se que ouve um acréscimo de eficiência na ordem dos 3%. Com este valor calculou-se o consumo de combustível por parte da caldeira após a implementação da referida medida (CCC_i'):

$$CCC_i' = CCC_i - CCC_i \times A_{ef} \quad (5.14)$$

Conhecido este valor calculou-se novamente o consumo de combustível total, para cada mês, substituindo o CCC_i por CCC_i' na equação (5.9). Após somar o novo consumo de combustível ao consumo de energia elétrica obtêm-se o consumo mensal de energia total após implementação desta medida. Apresenta-se em (5.15) as matrizes que representam o consumo atual de energia total (CMT) e o consumo esperado após implementação (CMT₁) da medida desagregada por mês.

$$CMT[GJ] = \begin{bmatrix} 170978 \\ 188075 \\ 188075 \\ 153880 \\ 188075 \\ 136782 \\ 170978 \\ 34196 \\ 102587 \\ 153880 \\ 102587 \\ 119684 \end{bmatrix} \quad CMT_1[GJ] = \begin{bmatrix} 166863 \\ 183549 \\ 183549 \\ 150177 \\ 183549 \\ 133490 \\ 166863 \\ 33373 \\ 100118 \\ 150177 \\ 100118 \\ 116804 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Apesar de, quando se comparam as duas matrizes apresentadas em (5.15) não se notarem grandes diferenças nos consumos de energia mensais, essas diferenças somadas ao longo do ano acabam por ser significativas como o ilustra o gráfico da Figura 5.3, observa-se uma poupança energética de 41 147 GJ durante um ano.

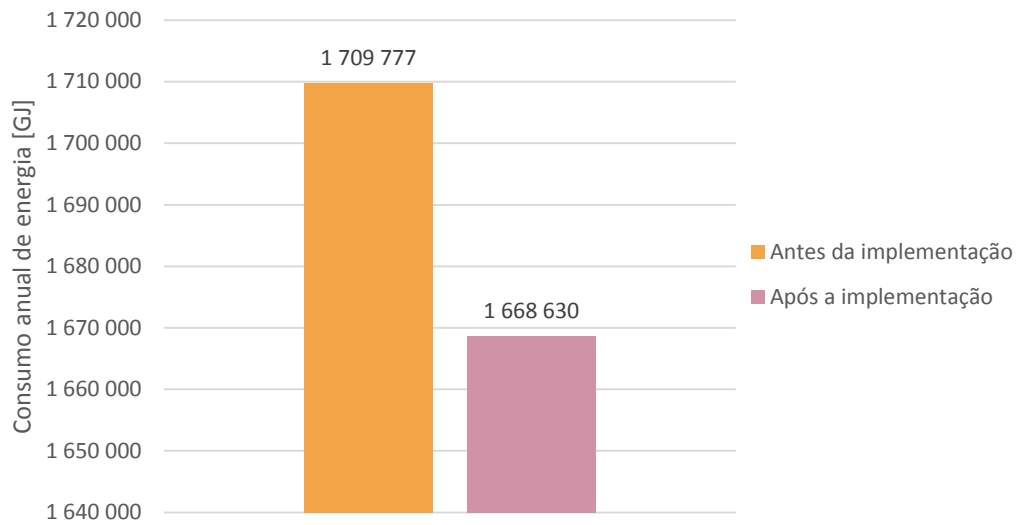


Figura 5.3: Gráfico representativo da variação do consumo energético com a alteração da eficiência energética da caldeira.

De modo a calcular os custos associados ao novo consumo energético multiplicou-se a matriz que representa os novos consumos mensais pelo preço unitário do gás natural estimado para 2016. Representa-se nas matrizes que se seguem o custo associado á energia antes ($CUSTO_{mensal}$) e após a implementação ($CUSTO_{mensal,1}$):

$$CUSTO_{mensal}[\text{€}] = \begin{bmatrix} 2.057 \times 10^6 \\ 2.263 \times 10^6 \\ 2.263 \times 10^6 \\ 1.851 \times 10^6 \\ 2.263 \times 10^6 \\ 1.646 \times 10^6 \\ 2.057 \times 10^6 \\ 411\,412 \\ 1.234 \times 10^6 \\ 1.851 \times 10^6 \\ 1.234 \times 10^6 \\ 1.440 \times 10^6 \end{bmatrix} \quad CUSTO_{mensal,1}[\text{€}] = \begin{bmatrix} 2.008 \times 10^6 \\ 2.209 \times 10^6 \\ 2.209 \times 10^6 \\ 1.807 \times 10^6 \\ 2.209 \times 10^6 \\ 1.606 \times 10^6 \\ 2.008 \times 10^6 \\ 401\,603 \\ 1.205 \times 10^6 \\ 1.807 \times 10^6 \\ 1.205 \times 10^6 \\ 1.406 \times 10^6 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Posto isto no que diz respeito a custos anuais de energia é esperada uma poupança de 489 809 €, como se observa no gráfico da Figura 5.4.

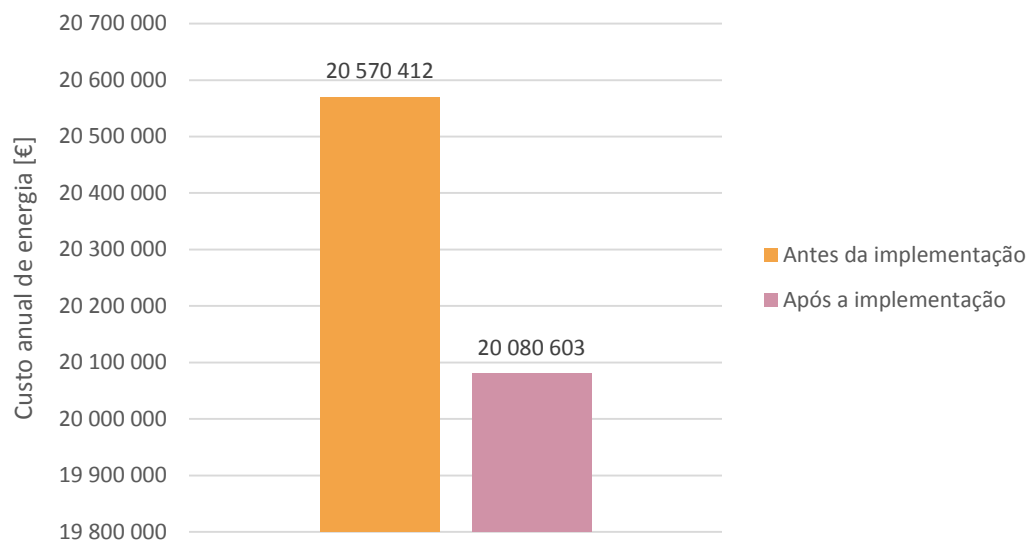


Figura 5.4: Gráfico representativo da variação dos custos energéticos associados à alteração da eficiência energética da caldeira.

As funcionalidades apresentadas foram meramente demonstrativas, várias análises podem ser realizadas recorrendo a esta metodologia, por exemplo, imagine-se uma empresa que está a pensar produzir a totalidade da energia elétrica consumida num sistema de cogeração, com recurso a esta ferramenta é possível estimar os custos associados a esta implementação, e os benefícios que dela viram, basta para tal ter indicações de eficiência desses equipamentos.

6. CONCLUSÕES

Conforme as medições e cálculos realizados observa-se que os fornos contínuos são responsáveis por cerca de 50% do consumo de gás natural, o que representa um valor menor do que o esperado devido ao contínuo funcionamento destes fornos. No entanto é necessário ter em conta que este valor não inclui o consumo do forno de revenido da linha 2, devido á inexistência de contador de gás natural. Também não é aqui contabilizado o consumo de gás para gerar o endogás introduzido nos fornos contínuos, pelo que tendo isto em conta estes são com certeza os principais consumidores de gás natural na empresa.

Repara-se também que o consumo dos fornos contínuos quando não se encontram a produzir é significativo pelo que se propõe uma redução do tempo em que estes estão a consumir “em vazio”, sendo apenas ligados consoante as necessidades de produção, por exemplo, se eles tiverem uma semana ligados sem produzir se forem desligados com certeza que compensaria o consumo inicial necessário para manter o forno em funcionamento, no entanto não foi possível confirmar esta afirmação devido ao desconhecimento do consumo necessário para elevar a temperatura do forno à requerida.

Relativamente às medidas de eficiência propostas repara-se que apresentando um investimento reduzido (no caso da diminuição do excesso de ar este é nulo) é possível atingir poupanças significativas. Foi estudada a implementação de uma terceira medida que não foi apresentada, esta passava pelo aproveitamento dos gases de combustão dos fornos de têmpera/cementação para o forno de revenido, no entanto este forno não apresenta um consumo de energia que justificasse o investimento.

Propõe-se a monitorização do consumo de gás natural nos fornos contínuos, registando os seus valores no início de cada turno ou em cada dia, assim é possível detetar potenciais consumos anómalos, permitindo dar respostas imediatas de modo a resolver esses comportamentos.

Relativamente à metodologia de previsão apresentada considera-se que esta é uma ferramenta que traduz muitas vantagens quando se trata da análise de empresas que apresentem elevados consumos de energia, no entanto a ferramenta de cálculo utilizada, EES, não foi a mais indicada já que não permite realizar operações entre matrizes, pelo que

é necessário considerar cada elemento individualmente. Assim propõe-se o desenvolvimento desta ferramenta utilizando para tal um programa informático que permita realizar cálculos diretamente com matrizes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro, (2011), “Auditoria Energética, Plano de Racionalização do Consumo de Energia 2011-2018”, SRAMPORT – Transmissões Mecânicas, Lda.
- [2] Industrial Assessment Centers, acessido a 20 de Novembro de 2015 em: <https://iac.university/download>.
- [3] Ferreira, V.A.R., (2010), “Medidas de eficiência energética aplicadas à empresa SRAMPORT, Lda”. Tese de Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [4] Gaspar, C. (2004, janeiro), “Eficiência Energética na Indústria”, acessido a 21 de Janeiro de 2016 em: <http://horacio.no.sapo.pt/Eficiencia%20Energetica%20na%20Industria%20ADENE.pdf>.
- [5] GEOTA, “Economia de Energia, Utilização Racional de Energia (URE)”, acessido a 21 de Janeiro de 2016 em: http://www.geota.pt/xFiles/scContentDeployer_pt/docs/articleFile212.pdf.
- [6] Afonso, H. / PWC, “Principais desafios da indústria em Portugal – 2013, Uma abordagem coerente para a dinamização do setor”, acessido a 22 de Janeiro de 2016.
- [7] ADENE, “Gestão de Energia – Auditoria energética”, acessido a 20 de Janeiro de 2016 em: <http://www.adene.pt/textofaqs/auditoria-energetica>.
- [8] Centro para a Conservação de Energia, “Manual do Gestor de Energia”.
- [9] Çengel, Y.A. e Boles, M.A (2006).”Termodinâmica”, 5ªEd, McGraw-Hill.
- [10] Borman, G.L (1998). “Combustion Engineering”, McGraw-Hill.
- [11] Santos, A.M. “Preparação da mistura ar-combustível”, acessido a 24 de Fevereiro de 2016 em: <http://pt.scribd.com/doc/13183026/Estequiometria-Preparacao-Da-Mistura-Ar-Combustivel#scribd>

- [12] Ribeiro, J.M. (2014/2015). Notas de apoio às aulas de Gestão de Energia.
- [13] Purushothaman, R. (2008). “Evaluation and Improvement of Heat Treat Furnace Model”. Tese de Doutoramento em Gestão de Produção. Instituto Politécnico de Worcester, Massachusetts.
- [14] Ricardo Ferreira (2013), “Proposta de ações de Eficiência Energética numa Instalação de Tratamentos Térmicos”. Tese de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto, Porto.
- [15] Rigby, D.K. (2015), “Management tools 2015 – An executive’s guide”, pp.14. Bain & Company.
- [16] Portal de acesso às infraestruturas de gás natural, REN, acessido a 10 de Dezembro de 2015 em: <https://www.ign.ren.pt/web/guest/monitorizacao-da-qualidade-do-gn>.
- [17] *Bright hub engineering* acessido a 7 de fevereiro de 2016 em: <http://www.brighthubengineering.com/hvac/92660-natural-convection-heat-transfer-coefficient-estimation-calculations>
- [18] The engineering ToolBox, acessido a 28 de Janeiro em: http://www.engineeringtoolbox.com/fuels-combustion-efficiency-d_167.html
- [19] Giaccone, E. e Mancò, S. “Energy efficiency measurement in industrial processes”, Energy, 2012, vol. 38, pages 331-345.
- [20] Brown, H.L. (1936), “Energy analysis of 108 industrial processes”.
- [21] U.S. Geological Survey, 2016, ”Mineral commodity summaries 2016”, 202 p.32, acessido a 19 de fevereiro de 2016 em <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2016/mcs2016.pdf>
- [22] Direção Geral de Energia e Geologia, acessido a 20 de janeiro de 2016 em: <http://www.dgeg.pt/>
- [23] ISCTE (2007), acessido a 20 de janeiro de 2016 em: <https://mbaiscee.files.wordpress.com/2008/01/5-previsao-de-vendas.pdf>.

[24] Plant Energy Profiler, acessido a 20 de janeiro de 2016 em:
<https://ecenter.ee.doe.gov/EM/tools/Pages/ePEPSharePoint.aspx>.

ANEXO A – DADOS DE PRODUÇÃO E CONSUMO DE ENERGIA DA EMPRESA (2014/2015)

2014

Produção (t)							
	Correntes	Correntes (PC1 e 5T)	Comp. Cor	Cassetes	Rodas	Cubos	TOTAL:
jan/14	83.734	51.553	83.464	0.806	5.472	0.394	225.423
fev/14	98.001	58.251	88.404	0.000	7.833	0.121	252.610
mar/14	115.697	22.632	115.617	0.000	7.845	0.218	262.009
abr/14	83.014	16.100	103.768	0.000	7.462	0.010	210.354
mai/14	123.287	22.220	117.773	0.000	10.498	0.000	273.778
jun/14	70.811	7.125	99.210	0.000	7.160	0.061	184.367
jul/14	75.334	48.234	106.308	1.170	7.201	0.316	238.563
ago/14	30.604	10.976	9.985	0.000	4.481	0.177	56.223
set/14	46.657	27.538	66.033	0.000	5.272	0.006	145.506
out/14	81.934	52.842	72.740	0.000	5.008	0.098	212.622
nov/14	59.649	26.294	52.199	1.088	4.188	0.133	143.551
dez/14	69.617	10.867	78.291	0.000	3.115	0.063	161.953
TOTAL	938.34	354.63	993.79	3.06	75.54	1.60	2366.959

Gás Natural						
Mês	Consumo (kWh)	Consumo (t)	Consumo (m³)	Energia (tep)	Custo Global (€)	Custo Unitário (€/t)
Jan	199053	14.35	17074.00	15.45	9658.00	673.03
Fev	241619	17.52	20847.00	18.87	11421.35	651.90
Mar	258032	18.69	22242.00	20.13	12231.63	654.45
Abr	227215	16.49	19622.00	17.76	10720.11	650.10
Mai	234296	16.96	20185.00	18.27	11056.24	651.90
Jun	184992	13.42	15965.00	14.45	8902.82	663.40
Jul	226565	16.43	19545.00	17.70	11009.75	670.10
Ago	36791	2.67	3172.00	2.88	3944.71	1477.42
Set	175094	12.91	15360.00	13.90	7248.10	561.43
Out	175716	12.95	15414.56	13.95	7493.23	692.35
Nov	167416	12.05	14335.00	12.98	8342.78	707.34
Dez	167788	12.05	14340.00	12.98	8523.48	707.34
TOTAL	2294577	166.49	198101.56	179.32	110552.20	664.02

Propano				
Mês	Consumo (t)	Energia (tep)	Custo Global (€)	Custo Unitário (€/t)
Jan	2.155	2.435	102.50	47.564
Fev	0.165	0.186	307.50	1 863.636
Mar	0.110	0.124	205.00	1 863.636
Abr	0.165	0.186	295.95	0.000
Mai	0.165	0.186	284.85	1 726.364
Jun	0.110	0.124	189.90	1 726.364
Jul	0.176	0.199	303.84	1 726.364
Ago	0.055	0.062	94.95	1 726.364
Set	0.110	0.124	189.90	1 726.364
Out	0.110	0.124	189.90	1 726.364
Nov	0.110	0.124	183.40	1 667.273
Dez	0.110	0.124	178.50	1 622.727
TOTAL	3.54	3.998	4 741.69	1 339.460

Energia Elétrica				
Mês	Energia (kWh)	Custo Global (€)	Energia (tep)	Custo Unitário (€/kWh)
Jan	152528.16	16552.42	32.79	0.11
Fev	218882.81	23338.77	47.06	0.11
Mar	204640.45	21572.54	44.00	0.11
Abr	213823.47	22656.61	45.97	0.11
Mai	213823.47	22656.61	45.97	0.11
Jun	209505.22	22469.01	45.04	0.11
Jul	178961.00	18026.38	38.48	0.10
Ago	83232.00	8981.83	17.89	0.11
Set	145250.00	14816.25	31.23	0.10
Out	167218.00	17073.52	35.95	0.10
Nov	154160.00	15900.59	33.14	0.10
Dez	159087.00	15820.76	34.20	0.10
TOTAL	2101111.6	219865.29	451.72	0.10

Gasóleo					
Mês	Consumo (l)	Consumo (t)	Energia (tep)	Custo Global (€)	Custo Unitário (€/l)
Jan	21.44	0.018	0.019	27.20	1.2687
Fev	22.23	0.019	0.020	27.20	0.0000
Mar	35.74	0.030	0.031	45.33	1.2683
Abr	50.96	0.043	0.044	63.60	1.2480
Mai	78.19	0.065	0.067	73.57	0.9409
Jun	154.46	0.129	0.133	226.11	0.0000
Jul	43.20	0.036	0.037	77.20	1.7870
Ago	21.67	0.018	0.019	27.20	1.2552
Set	45.15	0.038	0.039	54.39	1.2047
Out	29.74	0.025	0.026	40.03	1.3460
Nov	102.04	0.085	0.088	132.77	1.3012
Dez	47.46	0.040	0.041	58.95	1.2421
TOTAL	652.28	0.546	0.564	853.55	1.3086

2015

Produção (t) 2015					
	Correntes	Correntes (PC1 e 5T)	Comp. Cor	Rodas	TOTAL:
jan/15	106.04	30.95	136.74	7.58	281.30
fev/15	113.84	17.79	130.99	6.98	269.59
mar/15	97.84	17.47	126.17	10.99	252.47
abr/15	82.64	30.41	97.48	8.31	218.84
mai/15	89.55	10.67	87.75	6.89	194.85
jun/15	71.54	9.29	77.95	5.53	164.31
jul/15	72.87	30.23	98.91	8.20	210.20
ago/15	29.35	8.19	13.21	3.47	54.22
set/15	85.96	28.71	83.85	6.83	205.35
out/15	58.39	14.14	62.69	4.74	139.96
nov/15	93.58	38.06	93.55	6.66	231.86
dez/15	56.09	20.18	64.64	5.31	146.23
TOTAL	957.69	256.07	1073.94	81.48	2369.18

Gás Natural						
Mês	Consumo (kWh)	Consumo (t)	Consumo (m³)	Energia (tep)	Custo Global (€)	Custo Unitário (€/t)
Jan	297 082.0	21.28	25 323.00	22.919	14 039.87	659.768
Fev	278 139.0	19.67	23 401.00	21.185	13 099.57	665.967
Mar	275 963.00	19.46	23 161.00	20.958	13 138.85	675.172
Abr	207 205.00	14.94	17 775.00	16.090	10 161.32	680.142
Mai	210 381.00	15.10	17 973.00	16.263	10 340.86	684.825
Jun	197 581.00	14.25	16 962.00	15.347	9 750.73	684.262
Jul	236 037.00	17.03	20 265.00	18.341	9 886.39	580.528
Ago	47 167.00	3.41	4 057.00	3.673	2 572.93	754.525
Set	202 797.00	14.59	17 358.00	15.713	8 634.80	591.830
Out	150 823.00	10.91	12 985.00	11.750	6 784.95	621.902
Nov	198 293.00	14.30	17 016.00	15.401	8 470.88	592.369
Dez	109 497.00	7.84	9 330.00	8.444	5 251.47	669.830
TOTAL	2 410 965.00	172.78	205 606.00	186.084	112 132.62	648.991

Propano				
Mês	Consumo (t)	Energia (tep)	Custo Global (€)	Custo Unitário (€/t)
Jan	2.270	2.565	2 483.25	1 093.943
Fev	0.165	0.186	257.40	1 560.000
Mar	0.099	0.112	160.29	1 619.091
Abr	0.187	0.211	302.77	0.000
Mai	0.055	0.062	89.05	1 619.091
Jun	0.110	0.124	172.40	1 567.273
Jul	0.165	0.186	253.20	1 534.545
Ago	0.000	0.000	0.00	0.000
Set	0.165	0.186	253.20	1 534.545
Out	0.055	0.062	84.40	1 534.545
Nov	0.110	0.124	168.80	1 534.545
Dez	0.110	0.124	168.80	1 534.545
TOTAL	3.49	3.942	6 609.06	1 893.713

Energia Elétrica				
Mês	Energia (kWh)	Custo Global (€)	Energia (tep)	Custo Unitário (€/kWh)
Jan	186049.00	16552.42	40.00	0.09
Fev	248758.00	23338.77	53.48	0.09
Mar	213885.00	21857.85	45.99	0.10
Abr	199177.00	20596.17	42.82	0.10
Mai	167665.00	17538.34	36.05	0.10
Jun	176341.00	18222.05	37.91	0.10
Jul	191687.00	19767.03	41.21	0.10
Ago	93043.00	9937.80	20.00	0.11
Set	172869.00	17874.82	37.17	0.10
Out	161509.00	16703.00	34.72	0.10
Nov	172812.00	17762.88	37.15	0.10
Dez	141934.00	14745.12	30.52	0.10
TOTAL	2125729.00	214896.25	457.02	0.10

Gasóleo					
Mês	Consumo (l)	Consumo (t)	Energia (tep)	Custo Global (€)	Custo Unitário (€/l)
Jan	0.00	0.000	0.000	0.00	0.00
Fev	190.90	0.159	0.164	202.60	0.00
Mar	160.78	0.134	0.139	162.60	1.01
Abr	31.40	0.026	0.027	36.26	1.15
Mai	173.72	0.145	0.150	192.60	1.11
Jun	153.96	0.129	0.133	162.60	0.00
Jul	24.43	0.020	0.021	31.00	1.27
Ago	0.00	0.000	0.000	0.00	0.00
Set	169.64	0.142	0.147	162.60	0.96
Out	0.00	0.000	0.000	0.00	0.00
Nov	185.62	0.155	0.160	178.86	0.96
Dez	150.94	0.126	0.130	177.35	1.18
TOTAL	1 241.39	1.04	1.07	1 306.47	1.05

ANEXO B – DADOS DAS EMPRESAS SELECIONADAS PARA REALIZAR O *BENCHMARKING*

ID	SIC Code	Ano	Produção [toneladas]	Vendas [€]	Principais Produtos	Energia Eléctrica [MWh]	Gas Natural [GJ]	Energia Primária [TEP]			Custo de Energia [€]	
								GPL e Gasoleo	Energia Eléctrica	Gás Natural		TOTAL
IA0203	3568	1998	5 902.00	50 000 000	Rolamentos de película de flúido	35.56	0.00	0.56	0.10	0.66	570 344	
IA0368	3568	2005	6 810.00	75 000 000	Rolamentos	34.62	0.00	0.43	0.07	0.50	590 654	
LE0137	3568	2002	33 000.00	72 000 000	Transmissões mecânicas	36.47	0.00	0.18	0.05	0.23	1 855 443	
MA0611	3568	2007	1 816.00	32 000 000	Correntes de rolo	13.55	220.15	1.38	0.72	0.55	2.64	1 160 278
MA0616	3568	2007	1 816.00	65 000 000	Correntes de distribuição	18.77	163.88	1.25	1.04	0.12	2.41	846 031
UD0757	3568	2007	7 102.38	30 000 000	Correntes de transmissão	0.00	0.00	0.15	0.15	0.15	0.31	856 708
WV0329	3568	2005	18 727.50	45 000 000	Tratamento térmico de aços e ferros	32.26	0.00	0.15	0.09	0.25	1 249 120	
IA0194	3496	1998	19 000.00	50 000 000	Pneus e correntes	27.91	0.00	0.16	0.11	0.26	875 939	
LE0212	3496	2005	26 000.00	55 000 000	Correntes soldadas e sem solda	38.39	0.00	0.15	0.10	0.25	1 601 645	
LE0381	3496	2014	12 757.40	44 600 000	Correntes soldadas	29.87	0.00	0.18	0.12	0.30	1 156 866	
TN0485	3499	1993	4 994.00	22 000 000	Correntes de transmissão	0.00	0.00	0.38	0.32	0.70	703 341	
OK0315	3714	1990	2 088.40	24 000 000	Montagem de motores, rolamentos	0.00	0.00	0.25	0.12	0.37	146 317	

ANEXO C – INFORMAÇÃO OBTIDA PELO ANALISADOR DE GASES

	Queimador 1	Queimador 2	Queimador 3	Queimador 4	Queimador 5	Queimador 6	Queimador 7	Queimador 8
°C TF	486.00	527.60	488.20	444.30	447.50	483.80	413.50	478.60
ppm μ CO	0.00	0.00	0.00	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00
% O ₂	4.90	5.60	5.40	6.10	5.00	6.90	5.10	5.70
ppm CO	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Lambda	1.30	1.36	1.35	1.41	1.31	1.49	1.32	1.37
% CO ₂	9.12	8.73	8.84	8.44	9.07	7.99	9.01	8.67
% qA	23.70	26.80	24.40	22.90	21.60	26.10	20.00	24.10
°C TA	23.60	23.70	24.50	25.70	27.50	27.40	27.70	27.80
°C TF	486.00	527.60	488.20	444.30	447.50	483.80	413.50	478.60
% REN	76.30	73.20	75.60	77.10	78.40	73.90	80.00	75.90

ANEXO D – CÁLCULOS RELATIVOS AO BALANÇO ENERGÉTICO DO FORNO

"DADOS NECESSÁRIOS"

"1) Massa Molar "

$M_m_CH4 = \text{MolarMass}(CH4);$
 $M_m_C2H6 = \text{MolarMass}(C2H6)$
 $M_m_C3H8 = \text{MolarMass}(C3H8)$
 $M_m_C4H10 = \text{MolarMass}(C4H10)$
 $M_m_C5H12 = \text{MolarMass}(C5H12)$
 $M_m_O2 = \text{MolarMass}(O2)$
 $M_m_N2 = \text{MolarMass}(N2)$
 $M_m_CO2 = \text{MolarMass}(CO2)$
 $M_m_CO = \text{MolarMass}(CO)$
 $M_m_H2O = \text{MolarMass}(H2O)$

"2) Entalpia de formação"

$" \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} "$
 $hf_CH4[1] = \text{Enthalpy_formation}(CH4)$
 $hf_C2H6[1] = \text{Enthalpy_formation}(C2H6)$
 $hf_C3H8[1] = \text{Enthalpy_formation}(C3H8)$
 $hf_C4H10[1] = \text{Enthalpy_formation}(C4H10)$
 $hf_C5H12[1] = \text{Enthalpy_formation}(C5H12)$
 $hf_CO2[1] = \text{Enthalpy_formation}(CO2)$
 $hf_H2O[1] = \text{Enthalpy_formation}(H2O)$
 $hf_CO[1] = \text{Enthalpy_formation}(CO)$
 $" \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} "$

$hf_CH4[2] = hf_CH4[1]/M_m_CH4$
 $hf_C2H6[2] = hf_C2H6[1]/M_m_C2H6$
 $hf_C3H8[2] = hf_C3H8[1]/M_m_C3H8$
 $hf_C4H10[2] = hf_C4H10[1]/M_m_C4H10$
 $hf_C5H12[2] = hf_C5H12[1]/M_m_C5H12$
 $hf_CO2[2] = hf_CO2[1]/M_m_CO2$
 $hf_H2O[2] = hf_H2O[1]/M_m_H2O$
 $hf_CO[2] = hf_CO[1]/M_m_CO$

"3) Entalpia sensível no estado especificado"

$" \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} "$
 $h_bar_ar_O2[1] = \text{Enthalpy}(O2, T=T_in_ar)$
 $h_bar_ar_N2[1] = \text{Enthalpy}(N2, T=T_in_ar)$
 $h_bar_CO2[1] = \text{Enthalpy}(CO2, T=T_stack)$
 $h_bar_H2O[1] = \text{Enthalpy}(H2O, T=T_stack)$
 $h_bar_N2[1] = \text{Enthalpy}(N2, T=T_stack)$
 $h_bar_O2[1] = \text{Enthalpy}(O2, T=T_stack)$
 $h_bar_CO[1] = \text{Enthalpy}(CO, T=T_stack)$
 $" \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} "$

$h_bar_ar_O2[2] = h_bar_ar_O2[1]/M_m_O2$

$h_{bar_ar_N2[2]} = h_{bar_ar_N2[1]} / M_m_N2$
 $h_{bar_CO2[2]} = h_{bar_CO2[1]} / M_m_CO2$
 $h_{bar_H2O[2]} = h_{bar_H2O[1]} / M_m_H2O$
 $h_{bar_N2[2]} = h_{bar_N2[1]} / M_m_N2$
 $h_{bar_O2[2]} = h_{bar_O2[1]} / M_m_O2$
 $h_{bar_CO[2]} = h_{bar_CO[1]} / M_m_CO$

"4) Entalpia sensível no estado de referencia"

" $\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$ "

$h|o_ref_O2[1] = \text{Enthalpy}(O2, T=T_ref)$
 $h|o_ref_N2[1] = \text{Enthalpy}(N2, T=T_ref)$
 $h|o_ref_CO2[1] = \text{Enthalpy}(CO2, T=T_ref)$
 $h|o_ref_H2O[1] = \text{Enthalpy}(H2O, T=T_ref)$
 $h|o_ref_CO[1] = \text{Enthalpy}(CO, T=T_ref)$

" $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ "

$h|o_ref_O2[2] = h|o_ref_O2[1] / M_m_O2$
 $h|o_ref_N2[2] = h|o_ref_N2[1] / M_m_N2$
 $h|o_ref_CO2[2] = h|o_ref_CO2[1] / M_m_CO2$
 $h|o_ref_H2O[2] = h|o_ref_H2O[1] / M_m_H2O$
 $h|o_ref_CO[2] = h|o_ref_CO[1] / M_m_CO$

"5) Temperaturas "

$T_in_aço = 25$
 $T_out_aço = 868.542$
 $DELTA T = T_out_aço - T_in_aço$
 $T_in_ar = 26 \text{ [C]}$
 $T_GN = 25 \text{ [C]}$
 $T_stack = 471.19 \text{ [C]}$
 $T_ref = 25 \text{ [C]}$

"6) Elementos quimicos, nº de atomos,coluna 1- carbono,2- hidrogénio,3- oxigenio, 4 Azoto"

$CH4[1..4] = [1,4,0,0]$
 $C2H6[1..4] = [2,6,0,0]$
 $C3H8[1..4] = [3,8,0,0]$
 $C4H10[1..4] = [4,10,0,0]$
 $C5H12[1..4] = [5,12,0,0]$
 $O2[1..4] = [0,0,2,0]$
 $N2[1..4] = [0,0,0,2]$
 $CO2[1..4] = [1,0,2,0]$
 $CO[1..4] = [1,0,1,0]$
 $H2O[1..4] = [0,2,1,0]$

"7) composição do gas natural "

$X_bar_CH4 = 89.34E-2$
 $X_bar_C2H6 = 7.68E-2$
 $X_bar_C3H8 = 9.8E-3$
 $X_bar_C4H10 = 2.1E-3$
 $X_bar_C5H12 = 2E-4$
 $X_bar_N2_GN = 8E-3$
 $X_bar_CO2_GN = 9.7E-3$

"8) Fração molar dos produtos da reacção real-analisador de gases"

$X_bar_CO2_outx = 8.73E-2$
 $X_bar_O2x = 5.63E-2$
 $X_bar_COx = 2.5E-7$

"9) Massa molar do Gas Natural"

$$M_m_GN = (X_bar_CH4 * M_m_CH4) + (X_bar_C2H6 * M_m_C2H6) + (X_bar_C3H8 * M_m_C3H8) + (X_bar_C4H10 * M_m_C4H10) + (X_bar_C5H12 * M_m_C5H12) + (X_bar_N2_GN * M_m_N2) + (X_bar_CO2_GN * M_m_CO2)$$

"10) Reação completa de combustão Produtos : H2O CO2 N2 "

DUPLICATE i=1,4

$$X_bar_CH4 * CH4[i] + X_bar_C2H6 * C2H6[i] + X_bar_C3H8 * C3H8[i] + X_bar_C4H10 * C4H10[i] + X_bar_C5H12 * C5H12[i] + X_bar_N2_GN * N2[i] + X_bar_CO2_GN * CO2[i] + Z[1] * (O2[i] + 3.76 * N2[i]) = X_bar_CO2_est * CO2[i] + X_bar_H2O_est * H2O[i] + X_bar_N2_est * N2[i]$$

END

"11) Reação real de combustão Produtos : H2O CO2 N2 CO O2"

"Para a quantidade de gás natural queimado "

DUPLICATE i=1,4

$$X_bar_GN * (X_bar_CH4 * CH4[i] + X_bar_C2H6 * C2H6[i] + X_bar_C3H8 * C3H8[i] + X_bar_C4H10 * C4H10[i] + X_bar_C5H12 * C5H12[i] + X_bar_N2_GN * N2[i] + X_bar_CO2_GN * CO2[i]) + Zx * (O2[i] + 3.76 * N2[i]) = X_bar_CO2_outx * CO2[i] + X_bar_H2Ox * H2O[i] + X_bar_N2x * N2[i] + X_bar_COx * CO[i] + X_bar_O2x * O2[i]$$

END

"composição de cada elemento por kmol de gás queimado "

$$X_bar_H2O = X_bar_H2Ox / X_bar_GN$$

$$X_bar_N2_out = X_bar_N2x / X_bar_GN$$

$$Z[2] = Zx / X_bar_GN$$

$$X_bar_CO2_out = X_bar_CO2_outx / X_bar_GN$$

$$X_bar_CO = X_bar_COx / X_bar_GN$$

$$X_bar_O2 = X_bar_O2x / X_bar_GN$$

$$X_bar_N2_ar = Zx * 3.76 / X_bar_GN$$

"12) Descobrir a massa dos elementos da equação de combustao"

"[X_i]--> Fração massica"

$$X_CH4 = X_bar_CH4 * (M_m_CH4 / M_m_GN)$$

$$X_C2H6 = X_bar_C2H6 * (M_m_C2H6 / M_m_GN)$$

$$X_C3H8 = X_bar_C3H8 * (M_m_C3H8 / M_m_GN)$$

$$X_C4H10 = X_bar_C4H10 * (M_m_C4H10 / M_m_GN)$$

$$X_C5H12 = X_bar_C5H12 * (M_m_C5H12 / M_m_GN)$$

$$X_CO2_GN = X_bar_CO2_GN * (M_m_CO2 / M_m_GN)$$

$$X_N2_GN = X_bar_N2_GN * (M_m_N2 / M_m_GN)$$

$$X_N2_ar = X_bar_N2_ar * (M_m_N2 / M_m_GN)$$

$$X_O2_ar = Z[2] * (M_m_O2 / M_m_GN)$$

$$X_N2_out = X_bar_N2_out * (M_m_N2 / M_m_GN)$$

$$X_CO2_out = X_bar_CO2_out * (M_m_CO2 / M_m_GN)$$

$$X_H2O = X_bar_H2O * (M_m_H2O / M_m_GN)$$

$$X_CO = X_bar_CO * (M_m_CO / M_m_GN)$$

$$X_O2 = X_bar_O2 * (M_m_O2 / M_m_GN)$$

"13) Massa de cada elemento"

$$m_CH4 = X_CH4 * m_GN$$

$$m_C2H6 = X_C2H6 * m_GN$$

$$m_C3H8 = X_C3H8 * m_GN$$

$$m_C4H10 = X_C4H10 * m_GN$$

$$m_C5H12 = X_C5H12 * m_GN$$

$$m_CO2_GN = X_CO2_GN * m_GN$$

$$m_N2_GN = X_N2_GN * m_GN$$

$$m_O2_ar = X_O2_ar * m_GN$$

$$m_N2_ar = X_N2_ar * m_GN$$

$$m_H2O = X_H2O * m_GN$$

$$m_N2_out = X_N2_out * m_GN$$

$$\begin{aligned}m_{\text{CO}_2\text{ out}} &= X_{\text{CO}_2\text{ out}} * m_{\text{GN}} \\m_{\text{O}_2} &= X_{\text{O}_2} * m_{\text{GN}} \\m_{\text{CO}} &= X_{\text{CO}} * m_{\text{GN}}\end{aligned}$$

"Cálculo do PCI e da Densidade do Gás Natural"

"Consumo de gas natural [m³/h]"

$$E_{\text{GN cont}} = 5.906 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$E_{\text{GN cont R}} = 0.438 \text{ [m}^3\text{]}$$

"1) Densidade"

$$P_{\text{GN}} = 131 \text{ [kPa]} \text{ "Pressão do gas natural á entrada dos contadores"}$$

$$T_{\text{GN}_2} = 298 \text{ [K]} \text{ "Temperatura do gas natural em Kelvin (temp.amb)"}$$

$$R_{\text{GN}} = R_u / M_{\text{m GN}} \text{ "constante do gas natural"}$$

$$R_u = 8.31447 \text{ [kJ/kmol}^{\circ}\text{K]}$$

$$\rho_{\text{GN}} = P_{\text{GN}} / (R_{\text{GN}} * T_{\text{GN}_2})$$

"2) Massa do gas natural"

$$m_{\text{GN}} = \rho_{\text{GN}} * E_{\text{GN cont}} \text{ "Massa do gas natural [kg]}"$$

$$m_{\text{GN R}} = \rho_{\text{GN}} * E_{\text{GN cont R}}$$

"3) Calculo do PCI do gas natural"

$$\begin{aligned}\text{PCI} &= \text{abs}(((X_{\text{bar H}_2\text{O est}} * hf_{\text{H}_2\text{O}[1]}) + (X_{\text{bar CO}_2 \text{ est}} * hf_{\text{CO}_2[1]}) - ((X_{\text{bar CH}_4} * hf_{\text{CH}_4[1]}) \\&+ (X_{\text{bar C}_2\text{H}_6} * hf_{\text{C}_2\text{H}_6[1]}) + (X_{\text{bar C}_3\text{H}_8} * hf_{\text{C}_3\text{H}_8[1]}) + (X_{\text{bar C}_4\text{H}_{10}} * hf_{\text{C}_4\text{H}_{10}[1]}) + \\&(X_{\text{bar C}_5\text{H}_{12}} * hf_{\text{C}_5\text{H}_{12}[1]}) + (X_{\text{bar CO}_2 \text{ GN}} * hf_{\text{CO}_2[1]}))) \text{ "PCI em kJ/kmol"}\end{aligned}$$

$$\text{PCI}_{\text{GN}} = \text{PCI} / M_{\text{m GN}} \text{ "em KJ/kg"}$$

"Calculo da energia do gas natural[kj/h]"

"1) forno tempera cementação:"

$$E_{\text{GN}} = m_{\text{GN}} * \text{PCI}_{\text{GN}} \text{ "Energia do gas natural [kj/h]}"$$

"2) forno de revenido:"

$$E_{\text{GN R}} = m_{\text{GN R}} * \text{PCI}_{\text{GN}}$$

"AVAILABLE HEAT e PERDAS"

"[A_H] --> Available heat"

$$\begin{aligned}A_H &= m_{\text{CH}_4} * hf_{\text{CH}_4[2]} + m_{\text{C}_2\text{H}_6} * hf_{\text{C}_2\text{H}_6[2]} + m_{\text{C}_3\text{H}_8} * hf_{\text{C}_3\text{H}_8[2]} + \\&m_{\text{C}_4\text{H}_{10}} * hf_{\text{C}_4\text{H}_{10}[2]} + m_{\text{C}_5\text{H}_{12}} * hf_{\text{C}_5\text{H}_{12}[2]} + m_{\text{CO}_2 \text{ GN}} * hf_{\text{CO}_2[2]} + m_{\text{O}_2 \text{ ar}} * \\&(h_{\text{bar ar O}_2[2]} - h_{\text{o ref O}_2[2]}) + m_{\text{N}_2 \text{ ar}} * (h_{\text{bar ar N}_2[2]} - h_{\text{o ref N}_2[2]}) - \\&(m_{\text{CO}_2 \text{ out}} * (hf_{\text{CO}_2[2]} + (h_{\text{bar CO}_2[2]} - h_{\text{o ref CO}_2[2]})) + m_{\text{H}_2\text{O}} * (hf_{\text{H}_2\text{O}[2]} + \\&(h_{\text{bar H}_2\text{O}[2]} - h_{\text{o ref H}_2\text{O}[2]})) + m_{\text{N}_2 \text{ out}} * (h_{\text{bar N}_2[2]} - h_{\text{o ref N}_2[2]}) + m_{\text{O}_2} \\&* (h_{\text{bar O}_2[2]} - h_{\text{o ref O}_2[2]}) + m_{\text{CO}} * (hf_{\text{CO}[2]} + (h_{\text{bar CO}[2]} - h_{\text{o ref CO}[2]})))\end{aligned}$$

"[E_gases]--> Energia perdida pelos gases de combustão"

$$E_{\text{gases}} = E_{\text{GN}} - A_H$$

"[E_util]--> Energia útil"

$$Cp_{\text{aço}} = 0.6902$$

$$m_{\text{aço}} = 107.307$$

$$E_{\text{util}} = m_{\text{aço}} * cp_{\text{aço}} * \Delta T$$

"[losses]--> Perdas, além das associadas aos gases"

$$\text{losses} = A_H - E_{\text{util}}$$

"Excesso de ar"

$$\text{EXCESSO}_{\text{AR}} = (Z[2] - Z[1]) / Z[1]$$

ANEXO E – REGISTO DOS CONSUMOS DE GÁS NATURAL E PRODUÇÃO DOS FORNOS CONTÍNUOS

Consumos [m³]			
Horário	T/C linha 1	Revenido	T/C linha 2
00:30	197 920	22 751	382 953
08:30	197 947	22 751	383 012
16:30	197 974	22 751	383 077
00:30	198 000	22 751	383 147
08:30	198 034	22 755	383 220
16:30	198 081	22 758	383 286
00:30	198 128	22 761	383 352
08:30	198 156	22 761	383 423
16:30	198 184	22 761	383 490
00:30	198 210	22 761	383 554
08:30	198 243	22 765	383 618
16:30	198 287	22 769	383 682
00:30	198 338	22 773	383 726

Análise energética de uma indústria metalomecânica: balanços detalhados dos fornos de cementação e têmpera

Linha 1										
	Peça	Carga [kg]	Ciclo de carga [seg.]	Início de lote	Fim de lote	tempo de lote	Tempo [seg.]	Produção [kg]	Temperatura T/c [C]	Temperatura revenido [C]
1.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	
2.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	
3.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	
4.00	P	1.50	57.00	0.34	0.35	0.01	900.00		0	
5.00	5	2.50	57.00	0.36	0.41	0.05	4200.00	184.21	855	190
	5	2.50	57.00	0.42	0.46	0.05	3900.00	171.05	855	190
	P	1.50	57.00	0.48	0.49	0.01	900.00			
	7	2.50	70.00	0.53	0.61	0.08	6900.00	246.43	880	225
6.00	7	2.50	70.00	0.61	0.69	0.07	6300.00	225.00	880	225
	7	2.50	70.00	0.69	0.70	0.01	900.00	32.14	880	225
	7	2.50	70.00	0.70	0.78	0.08	6900.00	246.43	880	225
	P	1.50	57.00	0.79	0.80	0.01	1200.00			
	7	2.50	70.00	0.81	0.89	0.08	6900.00	246.43	880	225
	7	2.50	70.00	0.90	0.97	0.08	6600.00	235.71	880	225
7.00	P	1.50	57.00	0.98	1.00	0.01	1200.00			
	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
8.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
9.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
10.00	P	1.50	57.00	0.34	0.35	0.01	1200.00			
11.00	7	2.50	70.00	0.36	0.45	0.09	7800.00	278.57	880	225
	7	2.50	70.00	0.46	0.55	0.09	7500.00	267.86	880	225
	P	1.50	57.00	0.58	0.59	0.01	900.00			
	4	2.50	57.00	0.62	0.69	0.07	5700.00	250.00	855	240
12.00	4	2.50	57.00	0.69	0.69	0.01	600.00	26.32	855	240
	P	1.50	57.00	0.70	0.72	0.01	900.00			
	4	2.50	57.00	0.73	0.78	0.06	5100.00	223.68	855	240
	P	1.50	57.00	0.79	0.80	0.01	900.00			
	5	2.50	57.00	0.81	0.82	0.01	600.00	26.32	855	240
	P	1.50	57.00	0.83	0.84	0.01	900.00			
	1	3.00	57.00	0.84	0.90	0.06	4800.00	252.63	855	240
	1	3.00	57.00	0.90	0.96	0.06	5400.00	284.21	855	240
1	3.00	57.00	0.97	1.02	0.05	4500.00	236.84	855	240	

Anexo E – Registo dos consumos de gás natural e produção dos fornos contínuos

Linha 2								
	peça	carga [kg]	Ciclo de carga [seg.]	Início de lote	Fim de lote	Tempo de lote	Tempo [seg.]	Produção[kg]
1	P	1.5	57	1:15	1:30	0:15	900.00	
	5	2.5	57	3:20	4:25	1:05	3900.00	171.05
	P	1.5	57	4:35	4:50	0:15	900.00	
	5	2.5	57	5:15	6:20	1:05	3900.00	171.05
	P	1.5	57	6:40	6:55	0:15	900.00	
	4	2.5	57	7:40	8:30	0:50	3000.00	131.58
2	4	2.5	57	8:30	9:30	1:00	3600.00	157.89
	4	2.5	57	9:40	11:20	1:40	6000.00	263.16
	P	1.5	57	11:40	11:55	0:15	900.00	
	4	2.5	57	12:15	13:40	1:25	5100.00	223.68
	P	1.5	57	14:05	14:20	0:15	900.00	
	6	3	57	15:25	16:30	1:05	3900.00	205.26
3	6	3	57	16:30	16:40	0:10	600.00	
	6	3	57	17:00	18:20	1:20	4800.00	252.63
	6	3	57	18:25	19:50	1:25	5100.00	268.42
	6	3	57	19:55	21:20	1:25	5100.00	268.42
	P	1.5	57	21:45	22:00	0:15	900.00	
	1	3	57	22:20	23:45	1:25	5100.00	268.42
	1	3	57	23:50	0:30	0:40	2400.00	126.32
4	1	3	57	00:30	1:20	0:50	3000.00	157.89
	1	3	57	01:25	2:50	1:25	5100.00	268.42
	1	3	57	2:55	4:25	1:30	5400.00	284.21
	P	1.5	57	04:40	4:55	0:15	900.00	
	1	3	57	05:10	6:35	1:25	5100.00	268.42
	1	3	57	06:40	8:10	1:30	5400.00	284.21
	1	3	57	08:20	8:30	0:10	600.00	31.58
5	1	3	57	08:30	9:45	1:15	4500.00	236.84
	1	3	57	09:55	11:20	1:25	5100.00	268.42
	1	3	57	11:30	12:50	1:20	4800.00	252.63
	P	1.5	57	13:30	13:45	0:15	900.00	
	6	3	57	14:05	15:35	1:30	5400.00	284.21
	6	3	57	15:40	16:30	0:50	3000.00	157.89
6	6	3	57	16:30	17:10	0:40	2400.00	126.32
	6	3	57	17:25	18:45	1:20	4800.00	252.63
	P	1.5	57	18:55	19:10	0:15	900.00	
	6	3	57	19:20	20:45	1:25	5100.00	268.42
	6	3	57	20:50	22:15	1:25	5100.00	268.42
	P	1.5	57	23:30	23:45	0:15	900.00	
	1	3	57	00:15	0:30	0:15	900.00	47.37
7	1	3	57	00:30	1:40	1:10	4200.00	221.05
	1	3	57	01:45	3:10	1:25	5100.00	268.42
	1	3	57	03:15	4:45	1:30	5400.00	284.21
	P	1.5	57	05:00	5:15	0:15	900.00	
	1	3	57	05:25	6:50	1:25	5100.00	268.42
	1	3	57	06:55	8:25	1:30	5400.00	284.21
8	P	1.5	57	09:00	9:15	0:15	900.00	
	6	3	57	10:00	11:30	1:30	5400.00	284.2105263
	6	3	57	11:40	13:10	1:30	5400.00	284.2105263
	6	3	57	13:20	14:45	1:25	5100.00	268.4210526
	P	1.5	57	15:00	15:15	0:15	900.00	
	6	3	57	15:30	16:30	1:00	3600.00	189.4736842
9	6	3	57	16:30	16:55	0:25	1500.00	78.94736842
	6	3	57	17:00	18:30	1:30	5400.00	284.2105263
	6	3	57	18:35	20:10	1:35	5700.00	300
	P	1.5	57	20:30	20:45	0:15	900.00	
	1	3	57	21:00	21:25	0:25	1500.00	78.94736842
	1	3	57	21:35	22:00	0:25	1500.00	78.94736842
	P	1.5	57	22:10	22:25	0:15	900.00	
	5	2.5	57	22:40	23:45	1:05	3900.00	171.0526316
5	2.5	57	23:50	0:30	0:40	2400.00	105.2631579	
10	5	2.5	57	00:30	0:50	0:20	1200.00	52.63157895
	P	1.5	57	01:05	1:20	0:15	900.00	
	5	2.5	57	01:35	2:20	0:45	2700.00	118.4210526
	P	1.5	57	02:35	2:50	0:15	900.00	
	5	2.5	57	03:05	3:30	0:25	1500.00	65.78947368
	P	1.5	57	03:35	3:50	0:15	900.00	
	5	2.5	57	04:35	5:55	1:20	4800.00	210.5263158
	5	2.5	57	06:00	7:10	1:10	4200.00	184.2105263
P	1.5	57	07:25	7:40	0:15	900.00		
11	7	2.5	70	08:30	10:35	2:05	7500.00	267.8571429
	7	2.5	70	10:40	11:35	0:55	3300.00	117.8571429
	7	2.5	70	12:40	14:45	2:05	7500.00	267.8571429
	P	1.5	57	15:00	15:20	0:20	1200.00	31.57894737
12	0	0	0	0	0	0	0	

ANEXO F – FOTOGRAFIAS OBTIDAS PELA CÂMARA TERMOGRÁFICA





ANEXO G – CÁLCULO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR ATRAVÉS DAS PAREDES

"[1]- temperatura = 50;[2]- temperatura = 63.74; [2]- temperatura = 63.78;[ta]-> temp amb"
E_dot_forno = 266354 [kJ/h]

Ta =25[C]
Tforno = 868.542
T[1] = 50[C]
T[2] =63.78 [C]
T[3] = 70 [C]
DUPLICATE i=1,3
 DELTAT[i] = T[i]-Ta
END
epsilon_forno = 0.60
sigma = 5.6697E-8 [W/m^2*K]
"fator de conversão de W para KJ/h"
fc = 3600/1000
"Dimensões do forno"
c = 4.52
l = 2.18
alt = 2.41
A_lat = l*alt
A_ft = c*alt
A_sup_inf = c*l
A = A_sup_inf*2 +A_ft*2 +A_lat*2

"[h]->Coeficiente de transmissão de calor por convecção ,para cada geometria e temperatura"
"com t = 50 °C"

h_lat[1] = 3.88 [W/m^2*K]
h_sup[1] = 10.16 [W/m^2*K]
h_inf[1] =2.77 [W/m^2*K]

"com t = 63.78 °C"

h_lat[2] = 4.40 [W/m^2*K]
h_sup[2] = 11.73 [W/m^2*K]
h_inf[2] =3.11 [W/m^2*K]

"com t = 70 °C"

h_lat[3] = 4.58 [W/m^2*K]
h_sup[3] = 12.32 [W/m^2*K]
h_inf[3] =3.23 [W/m^2*K]

"Transferencias de calor por convecção em cada parede "

DUPLICATE i=1,3
 Q_dot_SUP[i]=(h_sup[i]* DELTAT[i]*A_sup_inf)*fc
 Q_dot_INF[i]= (h_inf[i]*DELTAT[i]*A_sup_inf)*fc
 Q_dot_ft[i]= (h_lat[i] * DELTAT[i]*A_ft*2)*fc
 Q_dot_lat[i]= (h_lat[i] * DELTAT[i]*A_lat*2)*fc

"Transferencias de calor por convecção total"

 Q_dot_convecção[i]= (Q_dot_SUP[i] +Q_dot_INF[i] +Q_dot_ft[i]+Q_dot_lat[i])

"Transferencias de calor por radiação"

 Q_dot_radiação[i] = (epsilon_forno* sigma * ((T[i]+273)^4 - (ta+273)^4))*A*fc

"Transferencias de calor total"

$$Q_dot_paredes[i] = (Q_dot_convecção[i] + Q_dot_radiação[i])$$

"Percentagem gás natural consumido que é perdido através das paredes"

$$Perc_perdas[i] = (Q_dot_paredes[i]/E_dot_forno)$$

$$CUSTO_ano[i] = Perc_perdas[i] * custo_anual$$

$$Perdas_anuais[i] = Perc_perdas[i] * consumo_anual$$

END

Aplicação de Isolamento térmico

$$L_isol = 25E-3 [m]$$

$$\epsilon_isol = 0.09$$

$$K_isol[1] = 0.034 [W/m^*K]$$

$$K_isol_100 = 0.039 [W/m^*K]$$

$$Custo_anual = 53092.658 [€]$$

$$Consumo_anual = 4390.215 [GJ/ano]$$

DUPLICATE i=2,3

$$(50-100)/(50-T[i]) = (K_isol[1]-K_isol_100)/(K_isol[1] - K_isol[i])$$

END

"Descobrir a temperatura exterior do isolamento [Ti]"

"Q_cond. = Q_conv. + Q_rad."

DUPLICATE i=1,3

$$\Delta T_{isol}[i] = (T[i] - t_a)$$

$$Q_dot_condução_forno[i] = (T_{forno} - T[i]) / (R_cond_forno[i])$$

$$Q_dot_condução_forno[i] = Q_dot_paredes[i]$$

$$R_cond_total[i] = (L_isol / (A * k_isol[i])) + R_cond_forno[i]$$

$$Q_dot_condução_total[i] = (T_{forno} - T[i]) / R_cond_total[i]$$

$$Q_dot_condução_total[i] = Q_dot_paredes_isol[i]$$

$$h_sup_isol[i] = (h_sup[i] * T[i]) / T[i]$$

$$h_inf_isol[i] = (h_inf[i] * T[i]) / T[i]$$

$$h_lat_isol[i] = (h_lat[i] * T[i]) / T[i]$$

$$Q_dot_SUP_isol[i] = (h_sup_isol[i] * \Delta T_{isol}[i] * A_sup_inf) * fc$$

$$Q_dot_INF_isol[i] = (h_inf_isol[i] * \Delta T_{isol}[i] * A_sup_inf) * fc$$

$$Q_dot_ft_isol[i] = (h_lat_isol[i] * \Delta T_{isol}[i] * A_ft^2) * fc$$

$$Q_dot_lat_isol[i] = (h_lat_isol[i] * \Delta T_{isol}[i] * A_lat^2) * fc$$

$$Q_dot_convecção_isol[i] = (Q_dot_SUP_isol[i] + Q_dot_INF_isol[i] + Q_dot_ft_isol[i] + Q_dot_lat_isol[i])$$

$$Q_dot_radiação_isol[i] = ((\epsilon_isol * \sigma * ((T[i] + 273)^4 - (t_a + 273)^4)) * A) * fc$$

$$Q_dot_paredes_isol[i] = Q_dot_radiação_isol[i] + Q_dot_convecção_isol[i]$$

$$Poupança[i] = (Q_dot_paredes[i] - Q_dot_paredes_isol[i]) / Q_dot_paredes[i]$$

END

"Só com isolamento na parte superior e inferior"

DUPLICATE i=1,3

```

    Q_dot_convecção_parcial[i]= ( Q_dot_SUP_isol[i] +Q_dot_INF_isol[i] + (Q_dot_ft_isol[i]/2)
+(Q_dot_ft[i]/2)+Q_dot_lat[i])
    Q_dot_radiação_com[i] = (epsilon_isol * sigma * ((Ti[i]+273)^4 -
(ta+273)^4))*(A_sup_inf*2+A_ft)*fc
    Q_dot_radiação_sem[i]=(epsilon_forno * sigma * ((T[i]+273)^4 - (ta+273)^4))*(A_ft + 2*A_lat)*fc
    Q_dot_radiação_parcial[i]=Q_dot_radiação_sem[i]+Q_dot_radiação_com[i]
    Q_dot_paredes_parcial[i] = Q_dot_radiação_parcial[i] + Q_dot_convecção_parcial[i]
    Poupança_parcial[i] =( Q_dot_paredes[i] - Q_dot_paredes_parcial[i])/Q_dot_paredes[i]
    redução[i] = Q_dot_paredes[i] - Q_dot_paredes_parcial[i]
    Poupança_ano_isol[i] = Poupança_parcial[i]*Perdas_anuais[i]
    Perdas_ano_isol[i] = Perdas_anuais[i]*(1-Poupança_parcial[i])
    Poupança_ano_custo_isol[i]= Poupança_parcial[i]*custo_ano[i]
    novo_custo[i] = custo_ano[i]-Poupança_ano_custo_isol[i]

```

END

ANEXO H – CÁLCULOS RELATIVOS À DIMINUIÇÃO DE EXCESSO DE AR

"Dados Necessários"

$\text{CH}_4[1..4] = [1,4,0,0]$
 $\text{C}_2\text{H}_6[1..4] = [2,6,0,0]$
 $\text{C}_3\text{H}_8[1..4] = [3,8,0,0]$
 $\text{C}_4\text{H}_{10}[1..4] = [4,10,0,0]$
 $\text{C}_5\text{H}_{12}[1..4] = [5,12,0,0]$
 $\text{O}_2[1..4] = [0,0,2,0]$
 $\text{N}_2[1..4] = [0,0,0,2]$
 $\text{CO}_2[1..4] = [1,0,2,0]$
 $\text{CO}[1..4] = [1,0,1,0]$
 $\text{H}_2\text{O}[1..4] = [0,2,1,0]$

"composição do gas natural "

$X_{\text{bar_CH}_4} = 89.34\text{E-}2$
 $X_{\text{bar_C}_2\text{H}_6} = 7.68\text{E-}2$
 $X_{\text{bar_C}_3\text{H}_8} = 9.8\text{E-}3$
 $X_{\text{bar_C}_4\text{H}_{10}} = 2.1\text{E-}3$
 $X_{\text{bar_C}_5\text{H}_{12}} = 2\text{E-}4$
 $X_{\text{bar_N}_2_GN} = 8\text{E-}3$
 $X_{\text{bar_CO}_2_GN} = 9.7\text{E-}3$

$T_{\text{in_ar}} = 26 \text{ [C]}$
 $T_{\text{stack}} = 471.19 \text{ [C]}$
 $T_{\text{ref}} = 25 \text{ [C]}$

$M_{\text{m_GN}} = 17.86 \text{ [kg/kmol]}$

"Entalpia de formação 1 -Kj/kmol "

$hf_{\text{CH}_4} = \text{Enthalpy_formation}(\text{CH}_4)$
 $hf_{\text{C}_2\text{H}_6} = \text{Enthalpy_formation}(\text{C}_2\text{H}_6)$
 $hf_{\text{C}_3\text{H}_8} = \text{Enthalpy_formation}(\text{C}_3\text{H}_8)$
 $hf_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = \text{Enthalpy_formation}(\text{C}_4\text{H}_{10})$
 $hf_{\text{C}_5\text{H}_{12}} = \text{Enthalpy_formation}(\text{C}_5\text{H}_{12})$
 $hf_{\text{CO}_2} = \text{Enthalpy_formation}(\text{CO}_2)$
 $hf_{\text{H}_2\text{O}} = \text{Enthalpy_formation}(\text{H}_2\text{O})$
 $hf_{\text{CO}} = \text{Enthalpy_formation}(\text{CO})$

"Entalpia sensível no estado especificado"

"kj/kmol"

$h_{\text{bar_ar_O}_2} = \text{Enthalpy}(\text{O}_2, T=T_{\text{in_ar}})$
 $h_{\text{bar_ar_N}_2} = \text{Enthalpy}(\text{N}_2, T=T_{\text{in_ar}})$
 $h_{\text{bar_CO}_2} = \text{Enthalpy}(\text{CO}_2, T=T_{\text{stack}})$
 $h_{\text{bar_H}_2\text{O}} = \text{Enthalpy}(\text{H}_2\text{O}, T=T_{\text{stack}})$
 $h_{\text{bar_N}_2} = \text{Enthalpy}(\text{N}_2, T=T_{\text{stack}})$
 $h_{\text{bar_O}_2} = \text{Enthalpy}(\text{O}_2, T=T_{\text{stack}})$
 $h_{\text{bar_CO}} = \text{Enthalpy}(\text{CO}, T=T_{\text{stack}})$

"Entalpia sensível no estado de referencia"

"kJ/kmol"

h|o_ref_O2= Enthalpy(O2,T=T_ref)

h|o_ref_N2= Enthalpy(N2,T=T_ref)

h|o_ref_CO2= Enthalpy(CO2,T=T_ref)

h|o_ref_H2O = Enthalpy(H2O,T=T_ref)

h|o_ref_CO = Enthalpy(CO,T=T_ref)

Z_teorico=2.12

Z_real = 1.15*Z_teorico

DUPLICATE i=1,4

X_bar_CH4*CH4[i] + X_bar_C2H6*C2H6[i] + X_bar_C3H8*C3H8[i] + X_bar_C4H10*C4H10[i] +

X_bar_C5H12*C5H12[i] + X_bar_N2_GN*N2[i] + X_bar_CO2_GN*CO2[i] + Z_real *(O2[i] +

3.76*N2[i]) = X_bar_CO2_out*CO2[i] + X_bar_H2O*H2O[i] + X_bar_N2_out*N2[i] +

X_bar_O2*O2[i]

END

perc_O2 =(X_bar_O2/(X_bar_N2_out + X_bar_CO2_out+X_bar_O2))*100

X_bar_N2_ar = 3.76*Z_real

AH[2] = X_bar_CH4*hf_CH4 + X_bar_C2H6*hf_C2H6+ X_bar_C3H8*hf_C3H8 +

X_bar_C4H10*hf_C4H10 + X_bar_C5H12*hf_C5H12 + X_bar_CO2_GN*hf_CO2 + Z_real *

(h_bar_ar_O2- h|o_ref_O2) + X_bar_N2_ar *(h_bar_ar_N2 - h|o_ref_N2) -

(X_bar_CO2_out*(hf_CO2 + (h_bar_CO2-h|o_ref_CO2))+ X_bar_H2O*(hf_H2O + (h_bar_H2O-

h|o_ref_H2O)) + X_bar_N2_out*(h_bar_N2 - h|o_ref_N2) +X_bar_O2 *(h_bar_O2-h|o_ref_O2))

"-----Poupança-----"

AH[1] = 647071 [Kj/kmol]

Custo_anual[1]= 53092.658[€]

Consumo_anual [1] = 4390.215 [GJ/ano]

poupança=((AH[2]-AH[1])/AH[2])

"Energia"

p_e = Consumo_anual [1]*poupança

Consumo_anual [2] = Consumo_anual [1] - p_e

"Custos"

p_c = Custo_anual[1]*poupança

Custo_anual[2] = Consumo_anual[1] - p_c

ANEXO I – MODELO PREVISIONAL DE CONSUMOS E CUSTOS DE ENERGIA APLICADA AO CASO DE ESTUDO

"[ceee] --> Consumo especifico de energia eletrica"

ceee_1 = 28
ceee_2 = 25
ceee_3 = 0
ceee_4 = 0
ceee_5 = 25
ceee_6 = 5
ceee_7 = 60
ceee_8 = 0
ceee_9 = 0
ceee_10 = 60

"[cec] --> Consumo especifico de combustivel"

cec_1 = 0
cec_2 = 0
cec_3 = 0
cec_4 = 0
cec_5 = 0
cec_6 = 0
cec_7 = 0
cec_8 = 0
cec_9 = 0
cec_10 = 2050

"[cev] --> Consumo especifico de vapor"

cev_1 = 0
cev_2 = 0
cev_3 = 3500
cev_4 = 0
cev_5 = 0
cev_6 = 0
cev_7 = 0
cev_8 = 3000
cev_9 = 0
cev_10 = 0

Prod_anual[1] = 6356
Prod_anual[2] = 6400
Prod_anual[3] = 6385
Prod_anual[4] = 5818
Prod_anual[5] = 6101

eta_gerador = 0.33
eta_rede = 0.40

"Variações do preço unitario 2012/2016 "

"GN - [€/Gj], elec - [€/KWh]"

VP_GN[1..5] = [11.390,11.660,12.095,11.570,11.920]
VP_elec[1..5] = [0.0642,0.0678,0.0701,0.0690,0.0695]

"Preço médio unitario da energia elétrica e gás natural para 2013 [€/GJ]"

P_GN =VP_GN[5]
P_ELEC= VP_elec[5]

"[CEE] -->CONSUMO ESPECIFICO DE ENERGIA [Btu/lbm]"

CEE[1..10,1]=[ceee_1,ceee_2,ceee_3,ceee_4,ceee_5,ceee_6,ceee_7,ceee_8,ceee_9,ceee_10]
CEE[1..10,2]=[cec_1,cec_2,cec_3,cec_4,cec_5,cec_6,cec_7,cec_8,cec_9,cec_10]
CEE[1..10,3]=[cev_1,cev_2,cev_3,cev_4,cev_5,cev_6,cev_7,cev_8,cev_9,cev_10]

"-----CALDEIRA-----"

INPUT_FUEL = 9286*F.C_1
INPUT_COND = 525*F.C_1
OUTPUT_STEAM = 6500*F.C_1
OUTPUT_SPH =450*F.C_1
OUTPUT_STACK = 1978*F.C_1
OUTPUT_LOSS = 883*F.C_1
eta_caldeira = ((OUTPUT_STEAM + OUTPUT_SPH) - INPUT_COND) /INPUT_FUEL

"-----GERADOR-----"

INPUT_FUEL_G = 37*F.C_1
OUTPUT_ELEC = 11*F.C_1

"CONVERSÃO PARA GJ/t"

"F.C_1 = Factor de conversão de Btu/lbm para GJ/t"

F.C_1= (1.055/(0.454))*10E-3

DUPLICATE i =1,10

DUPLICATE j=1,3

CEE_1[i,j] = CEE[i,j]* F.C_1

END

END

" [CME] -->CONSUMO MENSAL DE ENERGIA[GJ/mes]"

"[Perc_mes] = percentagem de produção mensal i=1,12]"

Perc_mes[1..12]=[0.10,0.11,0.11,0.09,0.11,0.08,0.10,0.02,0.06,0.09,0.06,0.07]

DUPLICATE i = 1,12

Prod_mes[i] =Prod_anual[1]*Perc_mes[i]

END

DUPLICATE i=1,12

DUPLICATE j=1,3

CME[i,j] = (T_energia_1[1,j] * Prod_mes[i])

END

END

"[EEPG] --- >ENERGIA ELÉCTRICA PRODUZIDA PELO GERADOR,POR MES[GJ/mes]"

"PG --> Percentagem da energia consumida que é produzida pelo gerador"

PG =OUTPUT_ELEC /T_energia_1[1,1]

DUPLICATE i = 1,12

EEPG[i] = CME[i,1] * PG

"[EEC] -->ENERGIA ELÉCTRICA COMPRADA POR MES [GJ/mes] "

EEC[i] = CME[i,1] - EEPG[i]

END

" [CCG]--> CONSUMO DE COMBUSTIVEL NO GERADOR POR MES[GJ/ano]"

DUPLICATE i =1,12

CCG[i] = (INPUT_FUEL_G * EEPG[i]) /OUTPUT_ELEC

END

"[CCC] --> CONSUMO DE COMBUSTIVEL NA CADEIRA, PARA PRODUZIR O VAPOR NECESSÁRIO EM CADA MES[GJ/MES]"

DUPLICATE i= 1,12
 $CCC[i] = (INPUT_FUEL * CME[i,3]) / OUTPUT_STEAM$
 END

"[CCT] --> COMSUMO TOTAL DE COMBUSTIVEL PARA CADA MES[GJ/mes];
 (Combustivel usado directamente+necessario pa produzir vapor+necessario para o gerador)"

DUPLICATE i=1,12
 $CCT[i] = CME[i,2]+ CCC[i]+ CCG[i]$
 END

" [EP] --> ENERGIA PRIMÁRIA [TEP/mes] "

DUPLICATE i=1,12
 $EP[i] = ((EEPG[i]/eta_gerador)+ (EEC[i]/eta_rede) +CME[i,2]+ CCC[i])/41.868$
 END

"CUSTO DE ELECTRICIDADE E GN"

DUPLICATE i=1,12
 $CUSTO_elec[i] = (EEC[i]/0.0036)*P_ELEC$
 $CUSTO_GN[i] = CCT[i]*P_GN$

END

"VARIAÇÃO DO CUSTO TOTAL COM O PREÇO UNITARIO"

"Variações nos custos totais nos 5 anos €/gj"
 "1-2012,2-2013....5-2016"

"CET - CONSUMO DE ENERGIA ELEC TOTAL COMPRADA EM KWH"

DUPLICATE i=2,5
 $CCT_anual[i] = CECCT_anual * Prod_anual[i]$
 $CET_anual[i] = (CEELEC_anual * Prod_anual[i])/0.0036$
 END

DUPLICATE i=1,5
 $VCUSTOS_GN[i] = CCT_anual[i]*VP_GN[i]$
 $VCUSTOS_elec[i] = CET_anual[i]*(VP_elec[i])$
 $VCUSTOS_total[i] = VCUSTOS_elec[i] + VCUSTOS_GN[i]$

END
 $CCT_anual[1] = TOTAL_CCT$
 $CET_anual[1] = (TOTAL_EEC)/0.0036$

"VARIAÇÃO DO CUSTO TOTAL E CONSUMO COM ALTERAÇÃO DE EFICIENCIA"
 "aumento da eficiencia - [A_ef]"

A_ef = 0.03

DUPLICATE i= 1,12
 $CCC_novo[i] = CCC[i] - (CCC[i] * A_ef)$
 $CCT_novo[i] = CME[i,2] + CCC_novo[i]+ CCG[i]$
 $CME_TOT_novo[i] = CCT_novo[i] + EEC[i] + EEPG[i]$

```
CUSTO_GN_novo[i] = CCT_novo[i]*P_GN
CUSTO_TOTAL_mes_novo[i] = CUSTO_elec[i] + CUSTO_GN_novo[i]
END

CONSUMO_TOTAL_NOVO = SUM(CME_TOT_novo[1..12])
CUSTO_TOTAL_NOVO = SUM(CUSTO_TOTAL_mes_novo[1..12] )
"-----TOTAIS-----"
"[T_energia] -->CONSUMOS ESPECIFICOS TOTAIS POR TIPO DE ENERGIA"

DUPLICATE j =1,3
  T_energia[1,j]=SUM(CEE[1..10,j])
  T_energia_1[1,j]=SUM(CEE_1[1..10,j])
END
"TOTAIS POR MES"
"CME_TOT-->CONSUMO TOTAL DE ENERGIA POR MES"

DUPLICATE i=1,12
  CME_TOT[i] = CCT[i] + EEC[i] + EEPG[i]
  CUSTO_TOTAL_mes[i] = CUSTO_elec[i]+CUSTO_GN[i]
END

"[TOTAL] -->CONSUMO TOTAL DE ENERGIA-ANO"

TOTAL = SUM(T_energia[1,1..3])
CEE_anual= SUM(T_energia_1[1,1..3])
TOTAL_EEPG =SUM(EEPG[1..12])
TOTAL_EEC = SUM(EEC[1..12])
TOTAL_CCG = SUM(CCG[1..12])
TOTAL_CCC = SUM(CCC[1..12])
TOTAL_CCT = SUM(CCT[1..12])
TOTAL_EP = SUM(EP[1..12])
CONSUMO_TOTAL= SUM(CME_TOT[1..12])
CUSTO_elec_ANUAL = SUM(CUSTO_elec[1..12])
CUSTO_GN_ANUAL = SUM(CUSTO_GN [1..12])
CUSTO_TOTAL = CUSTO_elec_ANUAL + CUSTO_GN_ANUAL
PERC_consumo_cald = TOTAL_CCC/CONSUMO_TOTAL
"consumo especifico de combustivel anual"
CECCT_anual = TOTAL_CCT / Prod_anual[1]
"consumo esp de energia electrica comprada"
CEELEC_anual = ( TOTAL_EEC ) / Prod_anual[1]
```