



**Lea Cármen Nogueira  
Lima**

**Estudo do consumo energético associado ao  
processo de cozedura na Indústria Cerâmica**



**Lea Cármen Nogueira  
Lima**

**Estudo do consumo energético associado ao  
processo de cozedura na Indústria Cerâmica**

Relatório de Estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica do Doutor Fernando Neto do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e do Doutor Joaquim Borges Gouveia do Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial da Universidade de Aveiro.



## **o júri**

presidente

Professora Doutora Myriam Alexandra dos Santos Batalha Dias Nunes Lopes,  
Professora Auxiliar, Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Professor Doutor José Paulo Oliveira Santos,  
Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Fernando José Neto da Silva,  
Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

Agradeço à Galp Energia, à Sanindusa e à Universidade de Aveiro pela oportunidade de desenvolver este projeto.

Agradeço também à Eng<sup>a</sup> Patrícia Almeida, Eng<sup>o</sup> Luís Ferreira, Prof. Fernando Neto e Prof. Borges Gouveia por todo o acompanhamento prestado.

Por último, agradeço a todos os meus familiares e amigos que me ajudaram nesta caminhada nomeadamente aos meus pais e: Luís Magalhães, Vítor Mesquita, Inês Soares, Irene Teixeira, Susana Garcia, Tiago Couchinho, Emanuel Delgado e André Santiago.

**palavras-chave**

Eficiência Energética, Gás Natural, Indústria Cerâmica

**resumo**

O presente trabalho realizou-se no âmbito do Projeto Galp 20-2020 implementado na empresa Sanindusa, em parceria com a Universidade de Aveiro.

Como principal objetivo pretendia-se estudar o consumo de energia durante o processo de cozedura das peças cerâmicas com o intuito de avaliar a viabilidade da substituição do refratário existente na empresa. Uma vez que esta medida implicaria um tempo de retorno do investimento demasiado elevado, optou-se por estudar o consumo de energia associado a uma placa horizontal, de massa unitária, de qualquer tipo de material refratário. Para tal, foi desenvolvido um Modelo Teórico capaz de calcular o calor absorvido por uma placa de refratário ao longo de todo o percurso dentro do Forno Túnel 2, existente na empresa e utilizado no processo de produção das peças cerâmicas.

Através deste estudo foi possível concluir que o Modelo Teórico é bastante útil na medida em que permite a criação de vários cenários, através da alteração de diversas variáveis, permitindo conhecer qual o impacto de cada uma no consumo de energia neste equipamento.

Como trabalho futuro propõe-se o desenvolvimento do Modelo Teórico apresentado para o estudo da transferência de calor bidimensional. Esta melhoria permitiria analisar o consumo de energia associado a diferentes formas de material refratário utilizado no processo de cozedura de peças cerâmicas (o que não é possível quando se aplica o conceito de transferência de calor unidimensional).

**keywords**

Energy Efficiency , Natural Gas , Ceramic Industry.

**abstract**

This work was performed under the Project Galp 20-2020 implemented in a company called Sanindusa, in partnership with the University of Aveiro.

The main objective of this project was to study the energy consumption during the cooking process of ceramic pieces in order to assess the feasibility of replacing the existing refractory in the company. Since this would mean a payback time too long, it has been decided to study the energy consumption for a horizontal plate with unitary weight of any refractory material. To this end, it was developed a theoretical model that allows to calculate the heat absorbed by a refractory plate along the entire journey in the Tunnel Kiln 2, the oven currently used in the production process of ceramic goods.

Through this study it has been concluded that the theoretical model is very useful because it allows the simulation of multiple scenarios by changing the different variables, allowing to know what is the impact of each one in the energy consumption in this equipment.

With regard to future work it is proposed the development of the theoretical model in order to find a model that allows the heat transfer study with a two-dimension approach. This improvement would allow to analyse the energy consumption of different shapes of refractory material in the cooking process (which is not possible when the unidirectional concept of heat transfer is used).

## NOMENCLATURA

$h_{sup}$  – Coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície da placa e a parte superior do Forno Túnel 2  $\left[\frac{W}{m^2.K}\right]$ ;

$T_{sup}$  – Curva de temperatura da parte superior do Forno Túnel 2 [K];

$T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$  – Temperatura dos nós no instante  $i$  [K];

$\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzmann  $\left[\frac{kcal}{h.m^2.K^4}\right]$

$k_{ref}$  – Condutividade Térmica do material refratário  $\left[\frac{W}{m.K}\right]$

$\Delta y$  – Distância entre os diversos nós [m]

$\rho$  – Densidade do material refratário  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$c_p$  – calor específico  $\left[\frac{J}{kg.K}\right]$

$t$  – Tempo [s]

$T_{1P}, T_{2P}, T_{3P}, T_{4P}, T_{5P}, T_{6P}$  - Temperatura dos nós no instante  $i-1$  [K];

$h_{inf}$  - Coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície da placa e a parte inferior do Forno Túnel 2  $\left[\frac{W}{m^2.K}\right]$ ;

$T_{inf}$  - Curva de temperatura da parte inferior do Forno Túnel 2 [K];



## ÍNDICE

1. Introdução e Objetivo .....	1
1.1 Objetivo .....	2
2. Apresentação da empresa .....	3
2.1 Processo Produtivo .....	5
2.2 Caracterização Energética da empresa .....	7
3. Metodologia .....	13
4. Modelação .....	17
4.1 Validação do Modelo Teórico.....	23
5. Resultados Obtidos.....	27
5.1 Indicadores relacionados com o refratário .....	27
5.2 Modelo Teórico .....	28
6. Conclusões.....	33
7. Bibliografia.....	35
Anexo I.....	37



# 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO

Em tempos em que o aquecimento global e as mudanças climáticas são motivo de preocupação no mundo, a melhoria da Eficiência Energética é a solução mais econômica, eficaz e rápida para minimizar impactos ambientais acarretados pela utilização da energia e reduzir emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). [1] Além disso, a aplicação deste conceito contribui para a melhoria do desempenho econômico das empresas na medida em que permite:

- Poupar recursos naturais, como o petróleo e o gás;
- Diminuir custos de produção, o que possibilita a produção de bens cada vez mais baratos e competitivos;
- Reduzir a necessidade de investir em infraestrutura e energia, pois é mais barato conservar do que gerar energia;
- Assegurar o retorno do investimento realizado, já que o montante é recuperado ao longo da vida útil de equipamentos, por conta da economia de energia associada.

Os consumos energéticos na indústria cerâmica representam uma fatia muito importante dos custos totais necessários para a obtenção do produto final. E com o panorama econômico atual, de grande instabilidade nos mercados mundiais de energia, com constantes subidas nos preços do combustível, a sua relevância assume ainda maior preponderância. [2]

No ano de 2010 a Indústria Cerâmica consumiu cerca de 433.628 toneladas equivalentes de petróleo (tep). A maior parte desse consumo (64.9%) refere-se ao gás natural utilizado nas caldeiras, fornos e secadores, seguindo-se a energia elétrica (28.8%) utilizada na iluminação, sistemas de ar comprimido e força motriz. Por fim, existem ainda outras fontes de energia (6.3%) que podem ser consumidas neste setor, como é o caso do GPL, fuelóleo e biomassa. [3]

Tendo em conta o papel que os custos energéticos representam na atividade das empresas da Indústria Cerâmica, torna-se imperativo que estas implementem o conceito eficiência energética nos seus processos na tentativa de reduzirem custos financeiros e paralelamente aumentarem os seus níveis de competitividade ao mesmo tempo que reduzem a sua pegada ecológica.

## 1.1 OBJETIVO

A empresa em estudo já se encontrava em processo de auditoria aquando do início do presente estágio e, como tal, algumas das medidas propostas pelo PReN já tinham sido implementadas.

Uma das medidas que ainda não tinha sido implementada está relacionada com a substituição do refratário existente na empresa em estudo. Uma vez que a substituição deste material implicava um investimento muito elevado, o principal objetivo deste projeto relaciona-se com o desenvolvimento de um Modelo Teórico capaz de analisar o consumo energético associado a uma placa de material refratário aquando da sua passagem pelo Forno Túnel 2 (um dos equipamentos consumidores intensivos de energia existentes na empresa). Este Modelo permitirá criar diversos cenários através da análise de vários tipos de material refratário e perceber qual o impacto das suas características no consumo de energia durante o processo de cozedura das peças cerâmicas.

Esta solução constitui uma alternativa viável para o estudo das características do material refratário antes de ser realizado qualquer investimento.

## 2. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

O grupo **Sanindusa**, considerado um dos quatro gigantes nacionais, é constituído por quatro empresas distintas: Sanindusa, Grau, Sanindusa2 e Unisan, esta última sediada em Espanha. A Grau é a única empresa do grupo direcionada para o fabrico de torneiras e acessórios, sendo as restantes empresas responsáveis pela produção de material sanitário e banheiras.

Fundada em 1993, a Sanindusa é uma empresa vocacionada para a conceção e desenvolvimento de artigos de sala de banho, nomeadamente, louça sanitária, banheiras, colunas e cabines de hidromassagem. No mercado, os seus produtos são reconhecidos pelo seu Design, Qualidade e excelente Imagem de Marca. A empresa, com capitais 100% portugueses, tem, apesar da crise, investido todos os anos entre 1,5 milhões a 2 milhões de euros em investigação e desenvolvimento. A estratégia passa por conseguir produzir em larga escala para assim afirmar a política de internacionalização com presença em mais de 80 países.



Figura 1: Sanindusa – Fábrica localizada em Aveiro

Aos mercados tradicionais europeus, a Sanindusa somou outras conquistas: países da ex-União Soviética, do Norte de África, Médio e Extremo Oriente e da América Latina, onde, aliás, pretende continuar a reforçar a sua presença. Outra aposta definida pela empresa passa por consolidar a marca no segmento da hotelaria. Hoje, os hotéis Vila Galé Lagos (Algarve) e o Pestana Chelsea Bridge Hotel & Spa, em Londres, são alguns dos que elegeram os sanitários da Sanindusa para se equiparem.

Durante o ano de 2009, a Sanindusa consumiu nas suas instalações cerca de 3.586 toneladas equivalentes de petróleo (tep). A Sanindusa apresentou em 2009 um consumo superior a 500 tep estando por isso abrangida pelo regulamento do SGCIE (Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia) de acordo com o decreto-lei 71/2008 de 15 de Abril. Como o consumo anual da Sanindusa é superior a 1.000 tep, de acordo com o SGCIE, deve ser elaborado de seis em seis anos um Plano de

Racionalização do Consumo de Energia (PREn) com base no relatório de Auditoria Energética, iniciando-se o primeiro Plano (PREn) com base no ano 2009.

O PREn que se encontra em desenvolvimento atualmente na empresa deverá estar concluído em 2015, faltando apenas implementar duas das medidas propostas aquando da realização do primeiro relatório em Novembro de 2010.

Tal como mencionado anteriormente o objetivo deste trabalho está relacionado com o desenvolvimento de um Modelo Teórico capaz de estudar o consumo de energia associado ao consumo de energia de uma placa de material refratário durante o processo de cozedura de peças cerâmicas.

O desenvolvimento deste Modelo é de extrema importância uma vez que permite avaliar a viabilidade da substituição do material refratário sem que seja necessário qualquer investimento. A substituição do material refratário sem que seja confirmada a sua viabilidade pode constituir um custo insustentável para a empresa dado que o *payback* associado é de, aproximadamente, 30 anos (algo pouco aceitável nos dias de hoje).

O gás natural é o vetor energético mais utilizado nas instalações da Sanindusa Aveiro e, como tal, qualquer intervenção capaz de reduzir o seu consumo contribuirá para uma redução considerável dos custos de produção contribuindo, conseqüentemente, para o aumento da competitividade da empresa.

O desenvolvimento deste projeto permitiu incutir na empresa uma preocupação acrescida relativamente à importância da gestão dos consumos de energia. Além disso, através dos estudos realizados será possível compreender melhor os processos de transferência de calor que ocorrem ao longo do Forno Túnel 2 e qual o seu impacto no consumo de gás natural deste equipamento.

## 2.1 PROCESSO PRODUTIVO

A Sanindusa é uma empresa responsável pela produção de louça sanitária e para melhor compreender a atividade desta organização importa conhecer o processo produtivo utilizado para a obtenção do produto final (PF). Assim sendo, a produção de louça sanitária segue os seguintes passos:

### 1. Preparação da pasta

As diversas matérias-primas utilizadas no processo produtivo são rececionadas, inspecionadas, classificadas e armazenadas em tulhas. Posteriormente, estas matérias-primas são transferidas para tremonhas (silos) com o auxílio de uma máquina carregadora, a partir das quais se procede ao seu doseamento por pesagem. A preparação dos "inertes" é feita em moinhos cilíndricos rotativos com carga moente de bolas de alumina enquanto, paralelamente, as matérias-primas plásticas são preparadas em turbodiluidores. A dosagem das diversas matérias-primas é efetuada em contínuo e com pesagem automática.

Após a sua preparação, os "inertes" e "plásticos" introduzem-se em tanques distintos. Posteriormente, estes dois componentes são conduzidos para tanques doseadores (elevados), a partir dos quais se obtém a mistura final de trabalho. Antes de ser enviada para a moldagem, a barbotina para enchimento é mantida em tanques de agitação lenta.

### 2. Moldagem (Olaria)

A moldagem das peças pode ser efetuada por enchimento manual clássico, enchimento de baixa, média e alta pressão, distinguindo-se as últimas pelo seu elevado ritmo de produção. Após a abertura dos moldes, as peças são retiradas, permanecendo ainda na olaria em condições de temperatura e humidade controladas, antes de serem enviadas para a secagem. Este período permite uma primeira secagem das peças, conferindo-lhes a resistência mecânica necessária para o seu manuseamento na fase de acabamento. As condições de temperatura e humidade ambiente da olaria são permanentemente controladas e mantidas dentro de parâmetros limite. Para o efeito são utilizadas unidades de climatização, alimentadas a gás natural com ou sem permutador e com recirculação de ar de admissão.

### 3. Secagem e Vidragem

A secagem dos produtos processa-se normalmente em secadores de câmaras estáticas, com carga e descarga manual, os secadores utilizam frequentemente ar quente recuperado do arrefecimento dos produtos dos fornos sendo a regulação mais fina de

temperatura efetuada por um queimador de gás. Após um ciclo de secagem que pode variar entre 7 a 16 horas, as peças são retiradas do secador para lhes ser aplicada uma camada de vidro. A vidragem efetua-se em cabines, que podem ser automatizadas.

#### 4. Cozedura

Os produtos vidrados são carregados em vagonas, que são introduzidas num forno túnel com impulsos que podem oscilar entre 20 e 50 minutos. Esta é a fase do processo com maior consumo de energia, cuja temperatura máxima pode oscilar entre os 1100 e os 1300°C.

#### 5. Escolha, embalagem e armazenagem

Após a cozedura, efetua-se a descarga, escolha e embalagem. Para a recuperação de peças que necessitem de ser retocadas, normalmente as empresas dispõem de fornos intermitentes. Nestes fornos são cozidas as peças retocadas e/ou com efeitos de decoração especiais num ciclo que pode oscilar entre 18 a 20 horas (requeima). Posteriormente, procede-se ao embalamento e armazenagem dos produtos finais.

Na Figura 2 apresenta-se um diagrama esquemático do processo produção de louça sanitária.

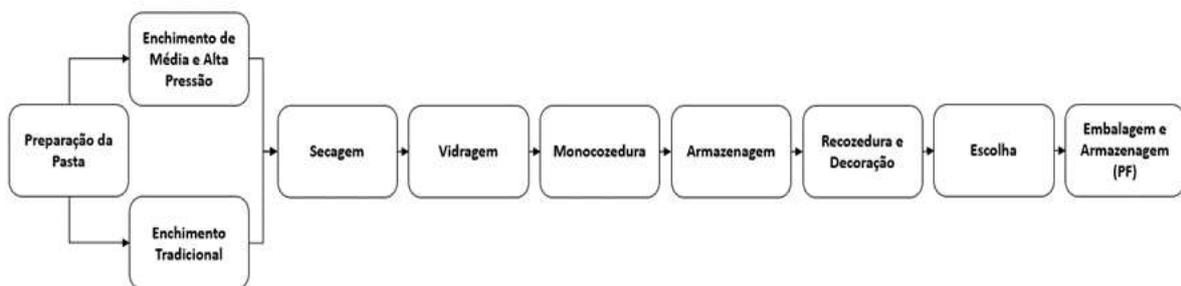


Figura 2: Diagrama esquemático do processo de produção de louça sanitária (adaptado de [3])

O conhecimento do processo produtivo é de extrema importância para a realização do diagnóstico energético geral de uma empresa. Esta análise permite determinar os fluxos de produto e energia dentro da empresa, identificando os possíveis pontos de atuação e melhoria, do ponto de vista da redução de consumos e eficiência energética.

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DA EMPRESA

Tal como referido anteriormente, a Sanindusa (constituída por três unidades fabris: C1, C2 e ACR) é considerada uma empresa consumidora intensiva de energia na medida em que consome mais do que 1.000 tep/ano. Como tal, antes de apresentar as ferramentas desenvolvidas ao longo do projeto, é importante proceder-se à caracterização energética da empresa. Para tal, será realizada uma comparação entre os valores dos consumos de 2009 com os verificados em 2013 na tentativa de perceber a sua evolução.

No ano de 2009 os consumos de energia excederam os 3.500 tep e a produção ultrapassou as 7.900 toneladas. Na Figura 3 apresenta-se a evolução mensal dos parâmetros mencionados.

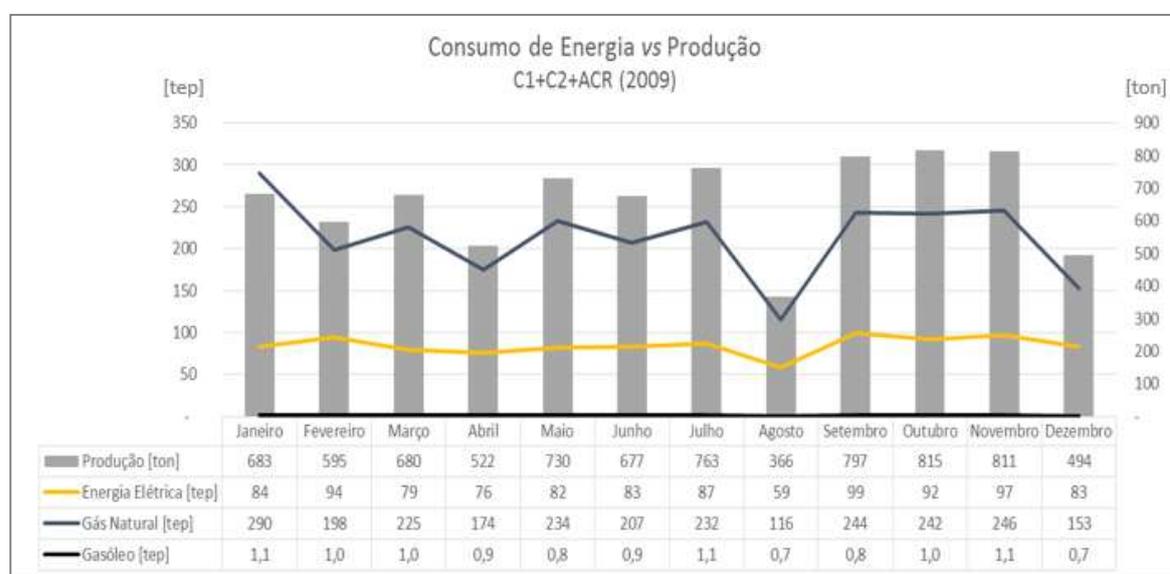


Figura 3: Evolução mensal dos consumos energéticos e da produção (2009)

Pela análise da Figura 3 verifica-se que o gás natural é o vetor energético mais utilizado, seguindo-se a energia elétrica e por fim o gásóleo (utilizado nos empilhadores existentes no armazém).

Já no ano 2013, verificou-se um ligeiro aumento dos consumos energéticos, ultrapassando os 3.700 tep anuais e uma redução da quantidade produzida (pouco mais do que 7.800 toneladas) (ver Figura 4).

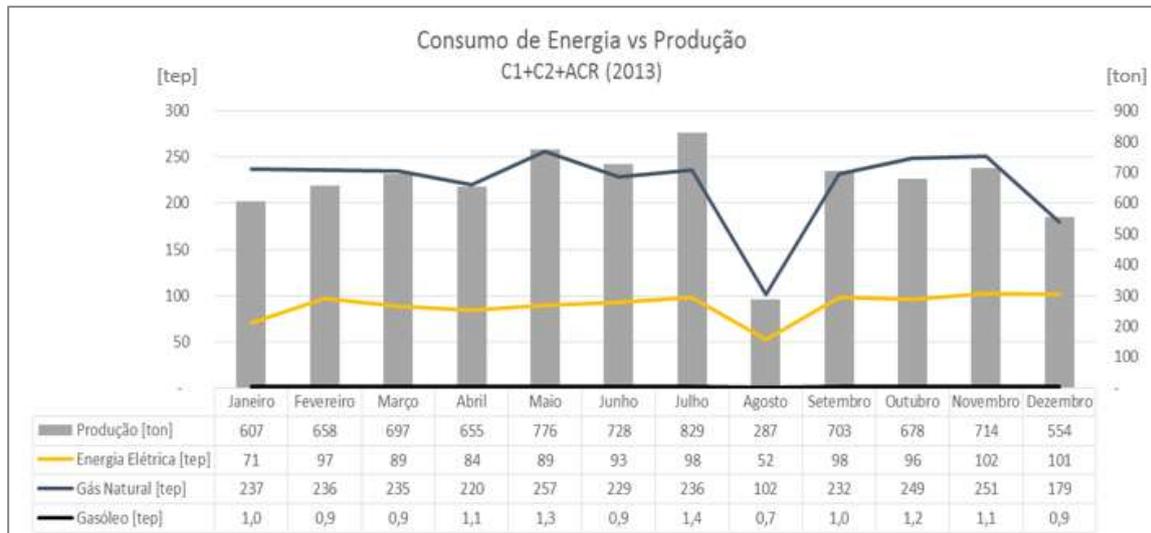


Figura 4: Evolução mensal dos consumos energéticos e da produção (2013)

Em ambos os casos verifica-se uma redução acentuada da produção no mês de agosto (devido à paragem de pelo menos 2 semanas para manutenção e férias de verão) e no mês de dezembro devido à paragem de 1 ou 2 semanas para férias de Natal.

Em qualquer um dos anos analisados, o consumo da Sanindusa excede as 3.500 toneladas equivalentes de petróleo (tep). A maior parte desse consumo (70%) refere-se ao gás natural utilizado nas caldeiras, fornos e secadores, seguindo-se a energia elétrica (29%) utilizada na iluminação, sistemas de ar comprimido e força motriz, e o gásóleo (1%) utilizado nos empilhadores existentes na unidade fabril.

Existe uma explicação para o facto dos consumos de 2013 serem mais elevados do que os de 2009 apesar da produção ter sido inferior. As necessidades do mercado obrigaram a recorrer a produções mais pequenas e a uma grande diversidade de produtos. Este facto leva a que os equipamentos produtivos sofram constantemente paragens e arranques, prejudicando o seu rendimento nominal o que origina menores eficiências energéticas.

A alteração do *mix* de produção, para satisfazer as exigências do mercado, provocou o aumento do peso médio das peças. Este aumento de dimensões obrigou a utilização de suportes de refratário mais robustos o que contribuiu para o agravamento do consumo específico durante o processo de cozedura (ver Tabela 1).

Para finalizar esta comparação resta avaliar os resultados dos indicadores energéticos avaliados em qualquer Plano de Racionalização do Consumo de Energia.

O Plano de Racionalização do Consumo de Energia (PREn) é elaborado com base nos relatórios das auditorias energéticas obrigatórias, devendo prever a implementação, nos

primeiros três anos, de todas as medidas identificadas com um período de retorno do investimento (PRI) inferior ou igual a cinco anos, no caso das instalações com consumo de energia igual ou superior a 1000 tep/ano, ou com um PRI inferior ou igual a três anos no caso das restantes instalações. [4]

O PReN deve ainda estabelecer metas relativas às Intensidades Energética e Carbónica e ao Consumo Específico de Energia, sempre que aplicável, com base nas medidas previstas no número anterior, tendo em conta os seguintes indicadores [4]:

1. Intensidade Energética, medida pelo quociente entre o consumo total de energia (considerando apenas 50% da energia resultante de resíduos endógenos e de outros combustíveis renováveis) e o Valor Acrescentado Bruto (VAB) das actividades empresariais directamente ligadas a essas instalações industriais;
2. Intensidade Carbónica, medida pelo quociente entre o valor das emissões de gases de efeito de estufa resultantes da utilização das várias formas de energia no processo produtivo e o respectivo consumo total de energia;
3. Consumo Específico de Energia, medido pelo quociente entre o consumo total de energia (considerando apenas 50% da energia resultante de resíduos endógenos e de outros combustíveis renováveis) e o volume de produção.

As metas referidas no número anterior estão sujeitas aos seguintes valores [4]:

- a) No mínimo, uma melhoria de 6% dos indicadores referidos no ponto 1 e 3 anteriores, em seis anos, quando se trate de instalações com consumo intensivo de energia igual ou superior a 1000 tep/ano, ou melhoria de 4% em oito anos para as restantes instalações;
- b) No mínimo, a manutenção dos valores históricos de intensidade carbónica.

Os valores dos indicadores mencionados são calculados através das fórmulas apresentadas na Figura 5.



Figura 5: Indicadores Energéticos [4]

Na Tabela 1 apresentam-se os resultados obtidos para os seguintes **Indicadores Energéticos**: Intensidade Energética (IE), Consumo Específico (CE) e Intensidade Carbónica (IC).

Tabela 1: Indicadores Energéticos Sanindusa (C1+C2+ACR) 2009 vs 2013

Indicadores Energéticos	Valores de 2009	Valores de 2013	Evolução
IE [kgep/€]	0.2805	0.2694	-3.96%
CE [kgep/ton]	452.04	475.1	+5.10%
IC [tonCO <sub>2</sub> eq/tep]	2.54	2.54	0%

Analisando os resultados da Tabela 1 verifica-se que a empresa apresenta uma evolução positiva no que respeita aos objetivos do PReN, excetuando o indicador CE pelos motivos já mencionados (*mix* produtivo).

Após conhecer o processo produtivo e os consumos energéticos associados, importa apresentar os equipamentos consumidores intensivos de energia devido à sua importância ao longo do processo produtivo.

Tal como verificado anteriormente, os consumos mais significativos na Sanindusa são os de energia elétrica e gás natural. No que toca aos equipamentos, os principais consumidores intensivos de energia ao serviço são:

- Seis caldeiras de água quente, estando três caldeiras afetas ao aquecimento da água tecnológica e aquecimento de barbotina; uma caldeira para a secagem dos moldes; uma caldeira para as máquinas de alta pressão e uma caldeira para a manutenção da temperatura da resina;
- Cinco secadores de câmaras estáticas para a secagem dos produtos;

- Dois fornos túnel, o forno 1 que se encontra desativado e o forno 2, atualmente em funcionamento. No forno 2 é recuperado ar quente da zona de arrefecimento dos produtos para os secadores de produtos 1 e 2 e para o secador de moldes. No forno 2 também se recupera calor para uma zona de olaria. Uma parte do ar de arrefecimento é ainda diluído como ar de combustão e outra parte é injetada na zona inicial do forno (pré-homogeneização);
- Quatro fornos intermitentes, utilizados no processo de requieima.

Uma vez que este projeto incide sobre o Forno Túnel 2 (ver Figura 6) apenas será feita uma análise mais detalhada a este equipamento.

### **Forno Túnel 2 (HEIMSOTH):**



Figura 6: Forno Túnel 2

O Forno Túnel 2, representado na Figura 5, foi desenvolvido pela empresa alemã HEIMSOTH, e foi construído em 1994. As suas dimensões são: 72 metros de comprimento, 2 metros de largura e 1,6 metros de altura útil. A temperatura máxima de cozedura é de 1198 °C.

Este equipamento é alimentado a gás natural, sendo o controlo de temperatura do tipo ligado/desligado, via sistema de alimentação dos queimadores. O arrefecimento dos produtos é feito por via direta, com o ar de contrapressão. Por forma a otimizar o consumo energético, o forno recupera uma fração do ar de arrefecimento dos produtos, utilizando-o como ar de combustão e ar de pré-homogeneização. Outra parte é

recuperada para os secadores 1 e 2, e também para a climatização 5. A restante parte é enviada para o pré-forno.

Os gases de exaustão são expelidos, para o exterior da fábrica, por uma conduta, situada à entrada do forno. O forno tem capacidade para 48 vagonas, cujo empurro, no período em análise, rondou os 13 minutos por vagona. À data da Auditoria (Novembro 2010), o empurro era de cerca de 25 minutos por vagona.

No ano de 2013, o consumo médio diário de gás natural neste equipamento rondou os 2.200 Nm<sup>3</sup>. Tal como se pode observar na Figura 7, no ano de 2013 houve três paragens de produção: Páscoa, férias de verão e férias de Natal. Os consumos excessivos que se verificam na figura, como por exemplo para o dia 1 de junho de 2013, representam erros de leitura ou de registo dos valores lidos.

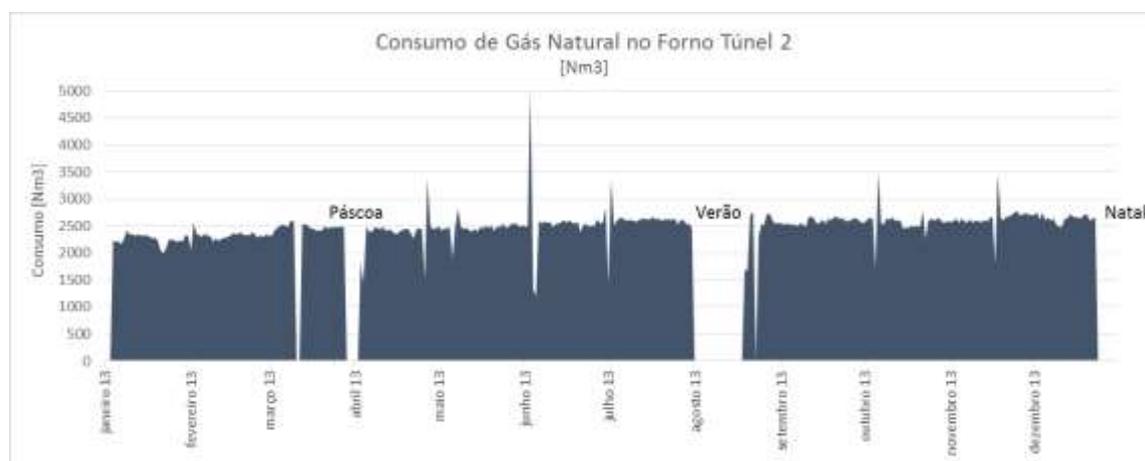


Figura 7: Consumo de Gás Natural no Forno Túnel 2 (2013)

Tendo em conta que a produção na unidade C1 (onde está localizado o forno túnel) foi de 5.260 toneladas em 2013 e que o consumo total de gás natural no Forno Túnel 2 foi de 820.927 Nm<sup>3</sup> (743 tep), o consumo específico verificado neste equipamento foi de aproximadamente 156 Nm<sup>3</sup>/ton, ou seja, 141 kgep/ton. Importa referir que a análise destes valores foi possível devido à existência de um contador de gás natural no próprio forno em estudo.

Em 2013, o consumo anual de energia na unidade C1 fez um total de 2.480 tep, dos quais 1.682 correspondem ao consumo de gás natural. Tendo em conta o consumo deste vetor energético verificado no Forno Túnel 2 pode-se concluir que este equipamento é responsável por 44% do consumo total de gás natural e por 30% do consumo total de energia desta unidade produtiva. Desta forma, qualquer medida capaz de reduzir o consumo de gás natural no Forno Túnel 2 terá um impacto significativo na redução dos custos energéticos globais.

### 3. METODOLOGIA

Tal como mencionado anteriormente, a empresa em estudo já se encontrava em processo de Auditoria Energética antes de se iniciar o presente projeto. Após uma análise do PReN, verificou-se que a maioria das medidas propostas já tinha sido implementada, no entanto, existiam ainda duas medidas que ainda não tinham sido estudadas na empresa, sendo elas:

- Plano de monitorização para caldeiras;
- Otimizar a estrutura do refratário das vagonas;

Assim sendo, o principal objetivo deste projeto foi estudar e desenvolver ferramentas que permitissem avaliar a viabilidade das medidas mencionadas, mais concretamente, da medida relacionada com o material refratário.

Uma vez que o *payback* associado à medida **Otimizar a estrutura do refratário das vagonas** era demasiado elevado (superior a 30 anos), optou-se por desenvolver um Modelo Teórico que permitisse estudar o consumo de energia associado a uma placa horizontal de material refratário de massa unitária (ao longo do Forno Túnel 2). A principal vantagem desta ferramenta está relacionada com a possibilidade de criar vários cenários tendo em conta os diversos materiais refratários (com características e preços distintos) existentes no mercado e averiguar qual a poupança energética associada a cada um deles.

Para que seja possível desenvolver um Modelo Teórico o mais realista possível é necessário perceber a dinâmica associada à utilização do Forno Túnel 2 durante o processo de cozedura do material cerâmico.

As peças provenientes da vidragem são colocadas nas vagonas em determinadas estruturas de apoio e seguem para o pré-forno onde são aquecidas, ao longo de aproximadamente 4 horas. Seguidamente são encaminhadas para o Forno Túnel 2 onde serão cozidas durante um ciclo de 10 horas (dependente do empurro das vagonas que no período em análise era de, aproximadamente, 13 minutos). Após saírem do Forno Túnel 2 as vagonas são conduzidas para uma zona de arrefecimento para que depois seja possível proceder à Escolha manual das peças. Após a Escolha as peças têm três destinos possíveis:

- **Armazém de produto final** para posteriormente serem embaladas;
- **Fornos intermitentes**, caso seja necessário retocar ou acrescentar algum pormenor decorativo;
- **Caco**, no caso de não ser possível corrigir os defeitos existentes nas peças.

Nem todas as peças cozidas podem ser transportadas diretamente no lastro das vagonas. Nesta situação, é necessário utilizar “móvel refratária” que suporte a peça, de modo a que esta não apresente deformações no final do processo de cozedura.

Na Figura 8, para melhor compreender a enforna das peças, apresenta-se uma fotografia onde se identificam as peças cozidas diretamente no lastro e as que requerem a utilização de móvel refratária.



Figura 8: Peças enforadas colocadas na vagona

Devido à elevada diversidade do *mix* produtivo que a empresa apresenta, surgiu a necessidade de criar um ficheiro de normalização do material refratário por tipo de peça. Nesse sentido, a parte inicial deste projeto consistiu no levantamento (pesagem e medição) de todas as estruturas de material refratário associadas a cada tipo de peça cerâmica e na criação de um ficheiro em *excel* com a compilação de toda a informação recolhida.

O ficheiro de normalização do refratário por peça cerâmica (disponível em anexo e designado por “Refratário por peça\_VFinal”) permite aceder à informação referida na Figura 9.

Código
Peso [kg]
Utiliza refratário [Sim/Não]
Placas e Acrescentos
Material Auxiliar
Estrutura de Apoio
Refratário associado à peça
Refratário associado à vagona
Refratário Total

Figura 9: Requisitos necessários para a normalização de refratário

A construção deste ficheiro contribuirá para o aumento da normalização da informação relacionada com o processo produtivo que por sua vez permitirá estudar o impacto que o material refratário representa no processo de cozedura através da criação de alguns indicadores e análise da sua evolução.

Os indicadores propostos apresentam-se na Tabela 2.

Tabela 2: Indicadores relacionados com o material refratário

Indicador	Designação	Fórmula de Cálculo	Unidades
CP	Consumo por Peça	$\frac{\text{Consumo GN}}{\text{Peças}}$	kcal/kg
CPR	Consumo por Peça+Refratário M	$\frac{\text{Consumo GN}}{\text{Peças} + \text{Refratário M}}$	kcal/kg
CPRL	Consumo por Peça+Refratário M+L	$\frac{\text{Consumo GN}}{\text{Peças} + \text{Refratário M} + \text{L}}$	kcal/kg
RV	Refratário M+L por Vagona	$\frac{\text{Refratário M} + \text{L}}{\text{Vagona}}$	kcal/vag
PV	Peças por Vagona	$\frac{\text{Peças}}{\text{Vagona}}$	peça/vag
PRV	Peça+Refratário M+L / Vagona	$\frac{\text{Peças} + \text{Refratário M} + \text{L}}{\text{Vagona}}$	kg/vag

**Nota:** Refratário M = Refratário associado à mobília (estrutura de apoio); Refratário M+L = Refratário associado à mobília e ao lastro.

O cálculo e a análise detalhada dos indicadores apresentados serão realizados na secção 4.1.

Ao longo do processo de criação/construção do ficheiro de normalização do material refratário verificou-se que na empresa existiam diferentes tipos de material refratário com características bastante distintas. Esta variabilidade de materiais interfere diretamente com o consumo energético dos equipamentos utilizados no processo produtivo. Como tal, tornou-se necessário desenvolver uma ferramenta, designada por Modelo Teórico, que fosse capaz de estudar o impacto das diferentes características do material refratário no consumo de energia dos equipamentos, mais concretamente, do Forno Túnel 2.

Através da utilização do Modelo Teórico foi possível concluir que existe realmente uma relação entre as características do material refratário e o consumo energético. Torna-se por isso importante simular vários cenários com o intuito de perceber qual o material que garanta uma melhor relação de qualidade, consumo e custo.

## 4. MODELAÇÃO

Nesta secção será apresentado, de forma mais detalhada, o Modelo Teórico desenvolvido.

Tal como mencionado anteriormente, o Modelo Teórico permite determinar o consumo de energia associado a uma placa de refratário, ao longo do Forno Túnel 2 (por motivos de simplificação de cálculo, foi assumido que a placa em estudo é horizontal e de massa unitária). A utilização deste Modelo é vantajosa na medida em que permite estimar o consumo energético associado a qualquer material refratário que se pretenda estudar.

Para melhor compreender a importância do modelo mencionado, importa conhecer a metodologia utilizada na sua criação. Tal como ilustrado na Figura 10 o Forno Túnel 2 é bastante comprido e devido à variabilidade das peças e das mobílias refratárias que nele passam é realista concluir que o escoamento do ar interior é um escoamento turbulento.



Figura 10: Vista lateral do Forno Túnel 2

Para calcular o calor absorvido pela placa horizontal de material refratário foi necessário assumir alguns pressupostos:

- Transferência de calor manifesta-se de forma unidimensional (na vertical);
- Transferência de calor apresenta três componentes:
  - Condução;
  - Convecção;
  - Radiação;

Para a realização deste estudo foi utilizado o Método das Diferenças Finitas o qual permite a resolução de equações diferenciais através da aproximação de derivadas por diferenças finitas.

O estudo realizado utiliza uma placa horizontal cuja espessura é distribuída em 6 nós para os quais é calculado o valor da temperatura ao longo do percurso dentro do Forno Túnel 2. Ou seja, para cada instante é necessário resolver um sistema de 6 equações a 6 incógnitas que permite determinar o valor das 6 temperaturas em análise. Importa referir que estas equações resultam da formulação de um balanço energético para o volume associado a cada um dos nós considerados no sentido de determinar a quantidade de energia térmica transferida.

Energia térmica é a fração da energia interna de um corpo que pode ser transferida devido a uma diferença de temperaturas. Esta fração é composta pelas formas de energia microscópicas energia sensível e energia latente. Por exemplo, um corpo colocado num meio a uma temperatura diferente da que possui, recebe ou perde energia, aumentando ou diminuindo a sua energia térmica (ou interna, armazenada). Esta energia térmica transferida “para o” ou “do” corpo é vulgarmente designada por “Calor” e o processo é designado por Transferência de Calor. Não ocorrendo mudança de estado físico, a variação de energia interna sofrida por um corpo, de massa  $m$ , é igual ao calor transferido ( $Q$ ) e pode ser estimada pela variação de temperatura ocorrida ( $\Delta T$ ), conhecido o seu calor específico,  $C_p$ , como transcrito de uma forma simplista pela Eq. 1.

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad \text{Eq. 1}$$

Para melhor compreender o sistema de equações apresentado de seguida importa perceber como se calcula as várias formas de transferências de calor, nomeadamente Condução, Convecção e Radiação.

Segundo a definição do cientista francês J.B.L Fourier, em 1882, a quantidade de calor transmitida por condução segue a seguinte lei:

$$q_k = -kA \frac{dT}{dy} \quad \text{Eq. 2}$$

Na formulação acima,  $k$  representa a condutividade térmica do material,  $A$  representa a área da secção através da qual o calor foi por condução (medida perpendicularmente à direção do fluxo), e  $dT/dy$  representa o gradiente de temperatura na secção. Nesta formulação, toma-se como convecção a direção de aumento na coordenada  $y$  e como fluxo positivo de calor. Sabendo-se que, pela segunda lei da termodinâmica, o calor flui da região de maior temperatura para a região de menor temperatura, deve-se adotar o sinal negativo para o produto acima, conforme mostra a Eq. 2. [5]

A convecção é o processo de transporte de energia pela ação combinada da condução de calor, armazenamento de energia e movimento da mistura. A convecção é importante principalmente como mecanismo de transferência de energia entre uma

superfície sólida e um líquido ou gás. O calor por unidade de tempo transmitido de uma superfície sólida para um fluido, por convecção, pode ser calculado da seguinte forma [5]:

$$q_c = h_c \cdot A \cdot \Delta T \quad \text{Eq.3}$$

Na Eq. 3,  $h_c$  representa o coeficiente médio de transmissão de calor por convecção, o qual depende da geometria da superfície, da velocidade do fluido e das propriedades físicas do fluido, incluindo a sua temperatura. Em geral,  $h_c$  é medido em  $\frac{kcal}{h \cdot cm^2}$ . A grandeza  $A$  representa a área de transmissão de calor, em  $m^2$ , e  $\Delta T$  é a diferença de temperatura entre a superfície  $T_s$  e a do fluido num local especificado  $T_y$  [5].

Todos os corpos que possuem temperatura absoluta diferente de zero emitem calor radiante, porém, dependendo da composição do corpo e de outros requisitos, esta quantidade pode ser maior ou menor. Para os corpos chamados irradiadores perfeitos, ou corpos negros, esta quantidade de calor emitida por irradiação por unidade de tempo pode ser escrita como:  $q_k = \sigma \cdot A \cdot T^4$ . Nesta equação,  $\sigma$  é chamada de constante de Stefan-Boltzmann, tendo o valor experimental de  $\sigma = 4.88 \times 10^{-8} \frac{kcal}{h \cdot m^2 \cdot K^4}$ ,  $A$  é a área total da superfície em metros quadrados, e  $T$  é a temperatura absoluta do corpo, medida em Kelvin. [5]

Tendo em conta esta formulação, nota-se que a quantidade de calor emitida por um corpo negro não depende das condições dos arredores do corpo. Porém, para os casos práticos, é interessante conhecer a troca de calor entre dois corpos. Portanto, a energia que um corpo negro emite para um outro corpo que o envolve completamente pode ser dada pela formulação seguinte:

$$q_k = \sigma \cdot A_1 \cdot T_1^4 - T_2^4 \quad \text{Eq. 4}$$

Na Eq.4, o termo  $T_2$  representa a temperatura do corpo que está posicionado externamente, ou seja, que envolve, enquanto o termo  $T_1$  representa a temperatura do corpo que está posicionado internamente, ou seja, que é envolvido.

Tendo em conta a placa em análise, verifica-se que nas superfícies (superior e inferior) o calor posto em jogo contempla as três componentes: convecção (entre o ar e a superfície da placa), radiação (entre o interior do forno e a superfície da placa) e condução (no interior da placa) (ver Eq. 5 e Eq.10). No interior da placa apenas se verifica transferência de calor por condução entre os respectivos nós. (ver Eq.6, Eq.7, Eq.8 e Eq.9).

O sistema de equações utilizado foi o seguinte:

$$h_{sup} \times (T_{sup} - T_1) + e_{ref} \times \sigma \times (T_{sup}^4 - T_1^4) + \frac{k_{ref}}{\Delta y} \times (T_2 - T_1) = \frac{\Delta y}{2} \times \rho \times c_p \times \frac{T_1 - T_{1P}}{t} \quad (5)$$

$$\frac{k_{ref}}{\Delta y} \times (T_1 - T_2) + \frac{k_{ref}}{\Delta y} \times (T_3 - T_2) = \Delta y \times \rho \times c_p \times \frac{T_2 - T_{2P}}{t} \quad (6)$$

$$\frac{k_{ref}}{\Delta y} \times (T_2 - T_3) + \frac{k_{ref}}{\Delta y} \times (T_4 - T_2) = \Delta y \times \rho \times c_p \times \frac{T_3 - T_{3P}}{t} \quad (7)$$

$$\frac{k_{ref}}{\Delta y} \times (T_3 - T_4) + \frac{k_{ref}}{\Delta y} \times (T_5 - T_3) = \Delta y \times \rho \times c_p \times \frac{T_4 - T_{4P}}{t} \quad (8)$$

$$\frac{k_{ref}}{\Delta y} \times (T_4 - T_5) + \frac{k_{ref}}{\Delta y} \times (T_6 - T_5) = \Delta y \times \rho \times c_p \times \frac{T_5 - T_{5P}}{t} \quad (9)$$

$$h_{inf} \times (T_{inf} - T_6) + e_{ref} \times \sigma \times (T_{inf}^4 - T_6^4) + \frac{k_{ref}}{\Delta y} \times (T_5 - T_6) = \frac{\Delta y}{2} \times \rho \times c_p \times \frac{T_6 - T_{6P}}{t} \quad (10)$$

O sistema em causa contempla duas curvas de temperatura no forno: curva de temperatura superior ( $T_{sup}$ ) e curva de temperatura inferior ( $T_{inf}$ ). No momento da análise apenas existia uma curva de temperatura global, no entanto, caso a realidade se altere o Modelo Teórico pode ainda ser utilizado. O mesmo acontece com o coeficiente de transferência de calor por convecção ( $h_{sup}$  e  $h_{inf}$ ) que de momento é considerado igual na parte superior e inferior do forno, mas no futuro esse valor pode ser alterado. As restantes variáveis pertencem às equações das várias formas de transferência de calor (condução, convecção e radiação). Resta apenas salientar que as variáveis  $T_{1P}$ ,  $T_{2P}$ ,  $T_{3P}$ ,  $T_{4P}$ ,  $T_{5P}$  e  $T_{6P}$  referem-se aos valores das temperaturas no instante  $i-1$ .

Importa ainda referir que o critério de convergência de temperatura para a resolução do sistema de equações (pelo método iterativo) é de 0.01°C. Para melhor compreender os conceitos mencionados apresenta-se a Figura 11.

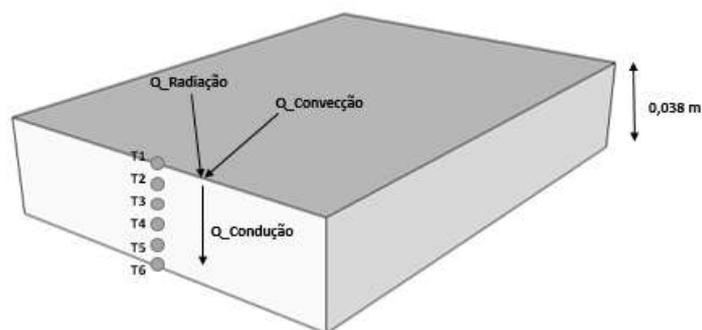


Figura 11: Transferência de calor associado a uma placa horizontal de material refratário

O calor posto em jogo ao longo de todo o percurso não é mais do que o somatório de todas as transferências de calor ocorridas em cada instante.

Através do Modelo Teórico é possível analisar vários tipos de material refratário e, conseqüentemente, criar diferentes cenários de consumo energético. Através da análise dos diferentes cenários é possível avaliar a viabilidade da substituição dos materiais refratários ou, pelo menos, perceber qual o impacto de cada um nos custos de energia associado à cozedura das peças cerâmicas.

Para que seja possível utilizar esta ferramenta é necessário dar alguns *inputs* ao programa tais como:

- Curva de temperatura do Forno Túnel 2
- Temperatura da placa à entrada do Forno Túnel 2
- Empurro das vagonas
- Características do ar no interior do Forno Túnel 2 (caso se pretenda calcular o coeficiente de transferência de calor por convecção):
  - Densidade
  - Condutividade Térmica
  - Velocidade
  - Viscosidade Dinâmica
  - Número de Prantl

É importante salientar que qualquer um dos *inputs* mencionados são passíveis de serem alterados caso seja necessário. A partir do momento em que seja possível aceder a uma curva de temperatura do forno mais atual basta substituir as células referentes na folha de *excel* designada por “Curva de Temperatura” e o programa correrá normalmente considerando a nova informação.

De seguida é apenas necessário preencher os campos referentes ao refratário que se pretende analisar. Nas Figuras 12 e 13 apresenta-se a interface do Modelo Teórico.

De salientar que na introdução dos parâmetros iniciais é possível introduzir manualmente um valor para o coeficiente de transferência de calor por convecção mas, caso o utilizador assim o pretenda, é também possível proceder ao seu cálculo.

**Modelo Teórico**

1. Parâmetros Iniciais | 2. Refratário

**Forno Túnel 2**

Temperatura da placa à entrada do Forno Túnel 2 [°C]: 60

Empurro [min/vagona]: 20

Comprimento do Forno [m]: 72

**Coefficiente de transferência de calor por convecção (h) no interior do Forno Túnel 2:**  
Caso não pretenda calcular basta introduzir o valor pretendido.

Calcular h superior 50 [W/m<sup>2</sup>.K]:

Calcular h inferior 50 [W/m<sup>2</sup>.K]:

Figura 12: Interface do Modelo Teórico – Inputs dos parâmetros iniciais

**Modelo Teórico**

1. Parâmetros Iniciais | 2. Refratário

Designação: Cordierite

Densidade [kg/m<sup>3</sup>]: 2050

Calor Específico [J/kg.K]: 1000

Conductividade Térmica [W/m.K]: 1

Emissividade [-]: 0.9

Espessura da Placa [m]: 0.038

**Calor absorvido pela placa de refratário [kcal/kg\_ref]:**

Refratário	Forno Túnel 2
Cordierite	135.4

Calcular Q<sub>abs</sub> [kcal/kg<sub>ref</sub>]

Adicionar Refratário

Limpar Lista

**Notas:**  
Valores pedidos nas unidades do Sistemas Internacional (SI).  
Considerando 1 kcal = 4180 J  
Critério de convergência de temperatura para resolução do sistema de equações = 0.01 °C

Figura 13: Interface do Modelo Teórico – Inputs do refratário a analisar

É ainda possível fazer uma análise comparativa a diferentes tipos de material refratário bastando clicar na opção “Adicionar Refratário” e preencher os respetivos campos. Além disso, pode-se criar diferentes cenários e averiguar o impacto no consumo energético como por exemplo mantendo o mesmo tipo de refratário mas alterando o empurro ou as características do ar no interior do equipamento. Cabe ao utilizador simular diferentes cenários tendo em conta os aspetos que pretende analisar.

O Modelo Teórico está disponível em anexo, num ficheiro *excel* designado por “2014.07.23\_Modelo Teórico\_Refratário\_vFINAL”.

Para o desenvolvimento deste modelo utilizou-se o *Visual Basic for Applications* (VBA) que é uma implementação do Visual Basic da Microsoft incorporado em todos os programas do Microsoft Office, nomeadamente no Excel. A utilização do VBA permite que este modelo seja utilizado na empresa mesmo após o término do projeto, o que não seria possível caso se utilizasse outro tipo de ferramentas (como o *Matlab*, por exemplo) uma vez que não existem na empresa em estudo.

#### 4.1 VALIDAÇÃO DO MODELO TEÓRICO

No sentido de validar o Modelo desenvolvido foram tiradas algumas fotografias termográficas para tentar perceber qual a variação da temperatura do material refratário à entrada e à saída do Forno Túnel 2.

Utilizando o Modelo Teórico para uma placa de temperatura inicial (à entrada do Forno Túnel 2) de 60°C e de emissividade 0.85, chegou-se à conclusão que a temperatura dos nós em análise à saída do Forno Túnel 2 varia entre 120°C a 180°C.

Pela análise das Figuras 14 e 15 verifica-se que o Modelo Teórico não se afasta muito da realidade verificada através das fotografias termográficas.

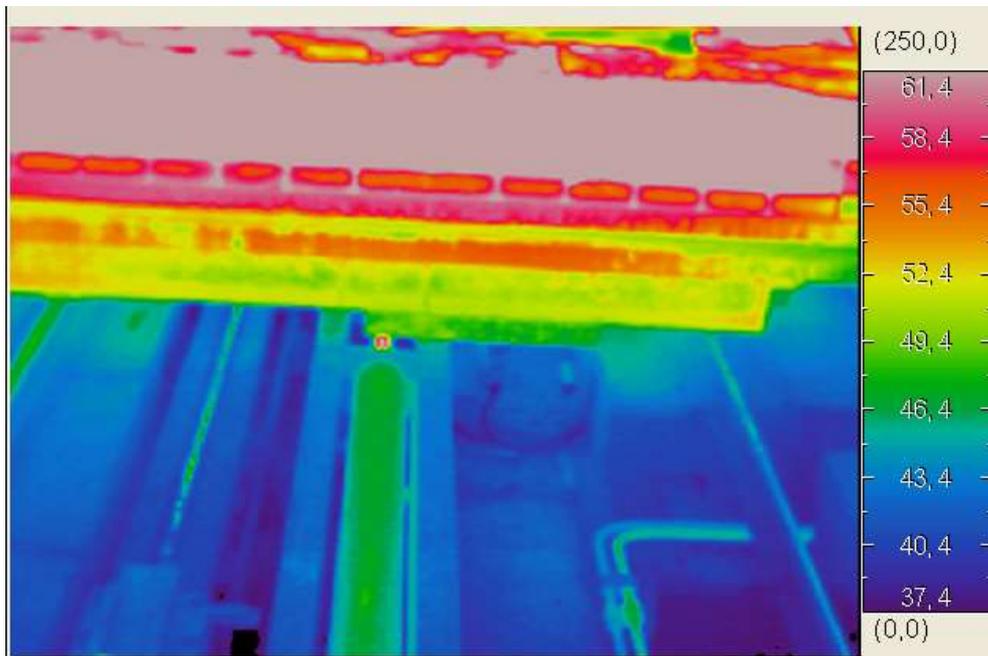


Figura 14: Material refratário à entrada do Forno Túnel 2

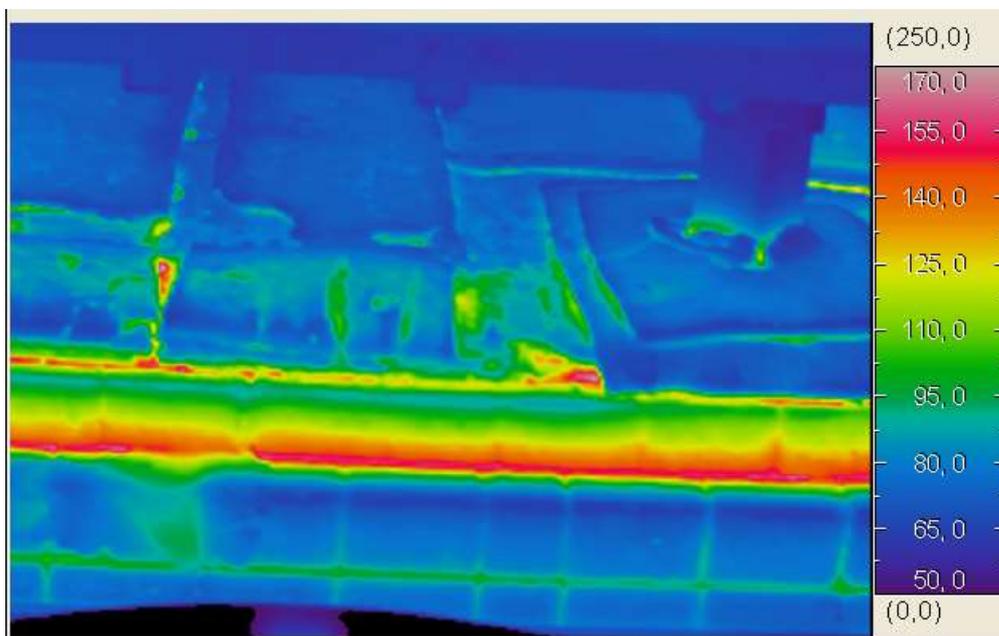


Figura 15: Material refratário à saída do Forno Túnel 2

Analisando as Figuras 14 e 15 verifica-se que as temperaturas mais elevadas associadas ao material refratário à entrada do Forno Túnel 2 rondam os 61°C e à saída os 170°C. Estas temperaturas pertencem à mesma ordem de grandeza das calculadas através do

Modelo Teórico e, como tal, assume-se que este Modelo é válido e que pode ser utilizado no estudo de processos de cozedura deste tipo.



## 5. RESULTADOS OBTIDOS

Nesta secção serão apresentados os resultados obtidos quer para os Indicadores quer para o Modelo Teórico. Serão também discutidas as vantagens e as oportunidades de melhoria das ferramentas desenvolvidas.

### 5.1 INDICADORES RELACIONADOS COM O REFROTÁRIO

Tendo em conta a informação disponibilizada no ficheiro “Refratário por peça\_VFinal” é possível calcular a quantidade de material cerâmico e refratário utilizada numa determinada produção. Com esta informação e, tendo acesso aos consumos diários de gás natural no Forno Túnel 2, é possível realizar todo o tipo de cálculos que se pretenda, nomeadamente as razões entre consumos de energia e material utilizado.

Na Tabela 3 apresentam-se os valores obtidos para o primeiro trimestre de 2014 para os indicadores mencionados na secção anterior.

Tabela 3: Valores dos indicadores para o 1º trimestre de 2014

Indicador	Designação	Valor			Unidades
		Global	Cordierite	Carboneto de Silício	
CP	Consumo por Peça	1095,14	-	-	kcal/kg
CPR	Consumo por Peça+Refratário M	1072,42	1076,98	1090,42	kcal/kg
CPRL	Consumo por Peça+Refratário M+L	1031,81	1044,72	1080,96	kcal/kg
RV	Refratário M+L por Vagona	13,32	10,47	2,85	kcal/vag
PV	Peças por Vagona	13	-	-	-
PRV	Peça+Refratário M+L / Vagona	230,33	227,48	219,85	kg/vag

A análise e acompanhamento da evolução destes indicadores permite que a empresa perceba o impacto de quaisquer alterações nos consumos de energia no Forno Túnel 2. A alteração do tipo de refratário e/ou a redução da quantidade utilizada terá certamente impacto no valor dos indicadores mencionados o que poderá ajudar a gestão na tomada de decisão relativamente ao material e quantidades utilizadas no processo de cozedura.

É importante salientar que apesar desta análise estar feita para o primeiro trimestre de 2014 é possível exportá-la para períodos distintos na medida em que o conhecimento da quantidade de material refratário associado a cada tipo de peça cerâmica permite

realizar o estudo para qualquer intervalo temporal desejado. Os ficheiros disponibilizados em anexo que podem ser utilizados para a realização deste estudo são:

- Refratário por peça\_VFinal
- 21.07.2014\_Indicadores\_Produção 1TRIM2014

## 5.2 MODELO TEÓRICO

A melhor forma de apresentar as potencialidades desta ferramenta é através da execução de um caso prático. Nesse sentido, serão comparados dois tipos de material refratário CarSIK-NG vs CarSIK-UP. Ambos disponíveis na empresa Schunk e pertencentes à classe do carboneto de silício.

Inicialmente é necessário inserir os parâmetros iniciais tais como a temperatura da placa à entrada do Forno Túnel 2, o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção e o empurro da vagona. De notar que nesta situação utiliza-se um empurro de 20 minutos uma vez que é para este valor que estão disponíveis as curvas de temperatura do equipamento. Apesar de ser possível alterar o valor do empurro (através da previsão da curva de temperatura para o novo valor) é aconselhável não o fazer caso não se possua a curva de temperatura associada.

Após a introdução dos parâmetros iniciais é necessário inserir as características do refratário que se pretende analisar e proceder ao cálculo do calor absorvido pela placa horizontal de massa unitária. De notar que os valores são expressos em quilocalorias por quilograma de refratário (kcal/kg\_ref) uma vez que são as unidades mais utilizadas pela empresa em estudo.

Figura 16: Comparação entre o refratário CarSIK-NG e o CarSIK-UP

Tal como se pode verificar na Figura 16 esta ferramenta permite analisar vários tipos de materiais e comparar os diferentes resultados em termos de consumos de energia.

Na Tabela 4 apresenta-se o resumo dos resultados obtidos. Tal como é possível verificar (para o mesmo valor de  $h = 50 \text{ W/m}^2.\text{K}$ ), o refratário CarSIK-UP consome menos do que o CarSIK-NG. Isto acontece porque o CarSIK-UP apresenta melhores características para este tipo de processo e conseqüentemente o seu preço é superior. Cabe ao gestor de energia averiguar qual o balanço mais vantajoso para a empresa e optar pelo material mais adequado ao seu processo produtivo.

Tabela 4: Comparação refratários CarSIK-NG e CarSIK-UP

Características	CarSIK-NG	CarSIK-UP
Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	2850	3020
Calor Específico [J/kg.K]	750	600
Condutividade Térmica [W/m.K]	12	25
Emissividade [-]	0.95	0.95
Calor Absorvido [kcal/kg_refratário]	<b>66.39</b>	<b>38.46</b>

A principal vantagem desta ferramenta é a possibilidade de calcular o calor absorvido por uma placa de qualquer material refratário em menos de 2 minutos. Este facto permite criar diferentes cenários de uma forma intuitiva, rápida e gratuita.

Uma outra análise interessante que pode ser feita é o Estudo Paramétrico do coeficiente de transferência de calor por convecção. Para cada um dos materiais referidos é possível fazer variar o valor de  $h$  e determinar qual o impacto no calor consumido. Na Tabela 5 apresentam-se os vários valores de consumo de energia para cada valor do coeficiente de transferência de calor por convecção, mantendo as características dos materiais refratários apresentadas na Tabela 4 (e considerando empurro = 20 min/vag).

Tabela 5: Estudo paramétrico do coeficiente de transferência de calor por convecção

<b>Q_abs [kcal/kg_ref]</b>	<b>h = 20 W/m2.K</b>	<b>h = 40 W/m2.K</b>	<b>h = 60 W/m2.K</b>	<b>h = 80 W/m2.K</b>	<b>h = 100 W/m2.K</b>
<b>CarSIK_NG</b>	131.95	83.85	52.25	31.47	17.63
<b>CarSIK_UP</b>	88.74	51.36	28.36	14.14	5.49

Tal como verificado na Tabela 5, o refratário CarSIK\_UP apresenta valores de consumos inferiores à medida que o valor de  $h$  aumenta. Além disso, em todos os casos analisados, o calor absorvido pela placa é sempre inferior comparativamente com o da placa de CarSIK\_NG.

Para além do já demonstrado é ainda possível conhecer as curvas de temperatura referentes aos vários nós da placa de refratário. A análise dessas curvas permite saber em que posições é absorvido mais ou menos calor no seio do refratário, aspeto que pode ser relevante na escolha do material mais adequado. Na Figura 17 é possível ver um exemplo das curvas de temperatura que é possível analisar.

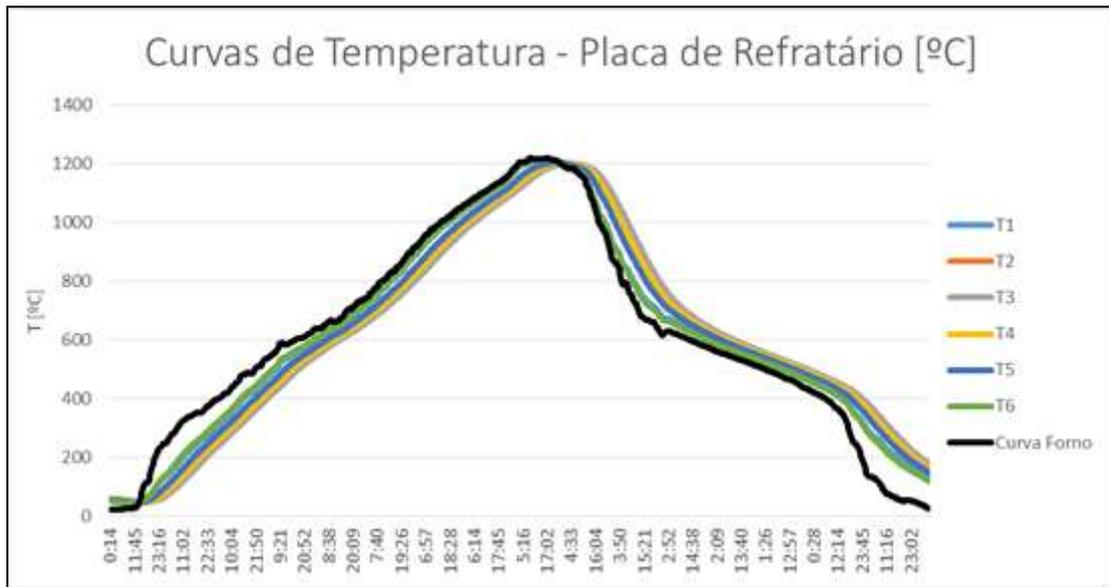


Figura 17: Curvas de temperatura dos vários nós analisados

Pela análise da Figura 17, verifica-se que as temperaturas dos nós das extremidades da placa (T1 e T6) no início do processo são superiores às dos restantes nós, mas à medida que o tempo vai decorrendo esta situação inverte-se. No final do processo, as temperaturas dos nós interiores são superiores às dos nós das extremidades e às da curva de temperatura do próprio forno. Tal deve-se ao facto do material refratário ser capaz de armazenar grandes quantidades de energia e da sua condutividade térmica ser relativamente reduzida.

Apesar das vantagens já mencionadas, o Modelo Teórico apresenta ainda algumas limitações nomeadamente na utilização de uma placa horizontal de massa unitária. Tal como ilustrado na Figura 7 existem diversas tipologias de material refratário e como tal o consumo de energia manifesta-se de forma diferente em cada uma delas. Para que o Modelo fosse realista seria necessário desenvolver um algoritmo para cada tipo de refratário utilizado no processo de cozedura (dimensões, configuração e peso). Para tal seria necessário considerar a transferência de calor bidimensional, ao invés da unidimensional (utilizada neste projeto).

Nesse sentido, como trabalho futuro propõe-se o desenvolvimento do presente Modelo com o intuito de colmatar as limitações mencionadas e aproxima-lo ainda mais da realidade em análise.

Tendo em conta o balanço entre as vantagens e as limitações desta ferramenta, acredita-se que o Modelo desenvolvido é de extrema importância na medida em que permite criar diferentes cenários através da alteração dos valores das variáveis e perceber qual o impacto de cada alteração no consumo de energia no Forno Túnel 2,

associado ao material refratário utilizado. Além disso, como é uma ferramenta desenvolvida em *excel*, qualquer *bug* ou necessidade que seja detetada pode ser adicionada desde que na empresa exista alguém com conhecimentos em programação e linguagem VBA.

## 6. CONCLUSÕES

O presente trabalho surgiu no âmbito do Projeto Galp 20-2020 realizado, em parceria com a Universidade de Aveiro, numa das empresas clientes da Galp, neste caso na Sanindusa. A Sanindusa é uma empresa do setor da indústria cerâmica que se dedica à produção de louça sanitária e banheiras.

Tal como as restantes empresas deste setor, a Sanindusa é considerada uma empresa consumidora intensiva de energia e, como tal, é imperativo implementar medidas de eficiência energética capazes de reduzir a sua pegada ecológica bem como os custos de produção. Uma vez que os custos energéticos têm um impacto significativo nos custos de produção, a redução dos primeiros permite tornar as empresas mais competitivas no mercado.

Após uma análise do perfil energético da empresa foi possível constatar que o Gás Natural é o vetor energético mais utilizado e que o Forno Túnel 2 é um dos equipamentos considerados consumidores intensivos de energia. Como tal, tornou-se necessário desenvolver uma ferramenta capaz de estudar o processo de cozedura tendo em conta a quantidade e tipo de material refratário utilizado. Esta ferramenta vai de encontro à medida proposta pelo PReN e que ainda não foi implementada devido essencialmente ao elevado tempo de *payback* (aproximadamente 30 anos). A medida referida visa otimizar a estrutura do refratário das vagonas.

Uma vez que a substituição do material ou a alteração da constituição das vagonas é um processo moroso e de custos muito elevados optou-se por desenvolver um Modelo Teórico em *excel* que permite estudar o consumo de energia de uma placa horizontal de massa unitária de qualquer tipo de material refratário. O estudo do seu comportamento ao longo do forno permite determinar qual o material e as características mais adequadas ao processo em análise.

No início do projeto constatou-se a necessidade de criar um ficheiro onde estivesse contemplada toda a informação relativa ao tipo de refratário e estrutura associada a cada peça cerâmica com o objeto de normalizar e disponibilizar a informação a qualquer colaborador que necessite. Este ficheiro permitiu criar uma base de dados com toda a informação necessária ao processo de cozedura de qualquer peça cerâmica existente na fábrica de Aveiro. Esta informação é de extrema importância para a análise das várias produções e consumos energéticos associados.

Finalmente, propõe-se como trabalhos futuros o desenvolvimento do presente Modelo no sentido de colmatar as limitações atuais e de o aproximar ainda mais da realidade em análise.



## 7. BIBLIOGRAFIA

1. PETROBRAS. *Petrobras Magazine*. 2009 [cited 2009 julho]; Disponível em: <http://www.hotsitespetrobras.com.br/petrobrasmagazine/edicoes/edicao55/pt/eficienciaenergetica/eficienciaenergetica.html>.
2. Martins, A.M.D.M., *Caracterização de Ferramentas de Apoio à Gestão de Energia na Indústria*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2012, Universidade de Coimbra: Universidade de Coimbra.
3. CTCV, C.T.d.C.e.d.V.-. *Plano setorial de melhoria da eficiência energética em PME - Setor da Cerâmica e do Vidro*. 2012, Efinerg Energia Competitiva.
4. ADENE, *SGCIE – METAS*; Disponível em: <http://www2.adene.pt/pt-pt/SubPortais/SGCIE/SGCIE/Metas/Paginas/welcome.aspx>; Consultado em junho,2014.
5. DeWitt, Bergman, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6ª edição, Wiley.



# ANEXO I

## Consumo Gás Natural Forno Túnel 2

Condições de Funcionamento:

- Temperatura = 32°C
- Pressão = 0,07 bar = 70 mbar
- Fator de conversão: 0,96
- Consumo Total em 2013 [m<sup>3</sup>] = 855.132
- Consumo Total em 2013 [Nm<sup>3</sup>] = 855.132 \* 0,96 = 820.927
- Consumo Total em 2013 [tep] = 743

**FOLHA PARA CÁLCULO DOS FACTORES DE CONVERSÃO**

Conversão do volume lido no contador para condições normais de pressão, temperatura e compressibilidade:  $V_0 = V \times (P/P_0) \times (T_0/T) \times (Z_0/Z)$

FÓRMULA DE CONVERSÃO	
$V_0 = V \times \frac{P \times T_0 \times Z_0}{P_0 \times T \times Z}$	$= V \times C$

V <sub>0</sub>	volume corrigido ( normal )	Nm <sup>3</sup> /h
V	volume lido no contador	m <sup>3</sup> /h
P	pressão de serviço ( absoluta )	bar
P <sub>0</sub>	pressão atmosférica (normal = 1,01325)	bar
T	temperatura de serviço	K
T <sub>0</sub>	temperatura condições normais ( 0°C = 273,15 K )	K
Z	factor de compressão de serviço	
Z <sub>0</sub>	factor de compressão em condições normais	
C	factor de conversão	

**CÁLCULO**

inputs:

pressão de serviço ( relativa - mbar ) **70** mbar

temperatura de serviço ( °C - nº inteiro ) **32** °C

Z<sub>0</sub> / Z (quatro casas decimais)

**FACTOR DE CONVERSÃO (duas casas decimais)** **0,96**

Para (pressupostos)

Z<sub>0</sub> / Z = **1,0000** CONSTANTE

Temp. serviço (T - 0° C) = **32** CONSTANTE

PRESSÃO SERVIÇO	T	Z <sub>0</sub> /Z	FACTOR CONVERSÃO C	SIMULAÇÃO	
mbar				V	V <sub>0</sub>
21	15	1,000	0,97	1 000	968
100	15	1,000	1,04	1 000	1 041
150	15	1,000	1,09	1 000	1 088
170	15	1,000	1,11	1 000	1 107
200	15	1,000	1,14	1 000	1 135
300	15	1,000	1,23	1 000	1 229
1000	15	1,000	1,88	1 000	1 883
3000	15	1,000	3,75	1 000	3 755



## Algumas equivalências

Energia Eléctrica	1000 tep/ano	4.451.163 kWh
	500 tep/ano	2.225.581 kWh
Fossíveis	1000 tep/ano	1.016 t
	500 tep/ano	508 t
Gás Natural	1000 tep/ano	928,5 t 1.104.837 Nm <sup>3</sup>
	500 tep/ano	464,25 t 552.419 Nm <sup>3</sup>
Gás de Petróleo Ligeiro	1000 tep/ano	893 t
	500 tep/ano	442,5 t