INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

RAMO OPTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA QUÍMICA

Optimização energética da olaria de uma cerâmica

José Nuno Gomes Barbosa
Outubro de 2011

Orientação Empresa: Engenheiro Henrique Barros
Orientação ISEP: Doutora Simone Barreira
Doutora Anabela Guedes

POLITÉCNICO
DO PORTO

Valadares

Agradecimentos

Em primeiro lugar, como não poderia deixar de o ser, gostaria de agradecer especialmente ao Engenheiro Henrique Barros, por todo o apoio, disponibilidade, atenção, orientação, e confiança depositada em mim ao longo desta dissertação.

Um agradecimento especial às minhas orientadoras, Doutora Simone Barreira e Doutora Anabela Guedes por todo apoio e atenção dados ao longo do trabalho e também por fazerem com que fosse possível o estágio na Fábrica Cerâmica de Valadares, S.A.

À Fabrica Cerâmica de Valadares, S.A e a todos os seus colaboradores que me ajudaram ao longo do trabalho, agradeço a sua disponibilidade.

Aos meus pais e irmão, por todo o apoio e encorajamento incondicional que me têm dado ao longo da vida, os meus sinceros agradecimentos. À minha namorada Maria João, deixo aqui um agradecimento especial, pela sua atenção, pela sua especial preocupação e por estar sempre ao meu lado.

Resumo

Na indústria cerâmica o consumo de energia é elevado, fazendo com que este custo represente uma parte significativa dos custos totais de produção das peças. De forma a diminuir esta dependência, a energia deve ser gerida de forma contínua e eficazmente. O presente trabalho consistiu na análise da situação energética e na elaboração de propostas de optimização da etapa de conformação que ocorre na Olaria número quatro da Fábrica Cerâmica de Valadares, S.A.

Determinou-se o rendimento efectivo da Olaria, tendo-se obtido um valor de 24,7%. As perdas térmicas ocorrem na Olaria, a nível da envolvente, da ventilação, da exaustão de gases e da inércia térmica, representando, respectivamente, 18122 MJ, 50222 MJ, 39228 MJ e 4338 MJ por semana de trabalho.

Numa última fase sugeriram-se algumas medidas de optimização energética.

A primeira medida visa uma melhoria na manutenção dos geradores, um aumento na gama de temperaturas de funcionamento dos geradores e uma minimização dos tempos de abertura dos portões.

Na segunda medida propõe-se a diminuição da percentagem de excesso de ar para 10%, equivalendo a uma poupança de 8839 €/ano.

Na terceira medida avaliou-se a possibilidade da aplicação de um permutador de calor de modo a aproveitar os gases de combustão. Esta permitiria uma poupança de 119 €/ano, no entanto, devido ao elevado tempo de retorno do investimento (12,6 anos) considerou-se que esta medida não era viável.

A quarta proposta relaciona-se com a optimização da ventilação da Olaria por aumento do ciclo de renovação de ar para 5 h, promovendo uma poupança de 8583 € anuais.

Como última sugestão de optimização, aconselhou-se a diminuição do volume da olaria em 6935 m^3. Com esta proposta é possível obter uma poupança de 4993 €/ano. Esta medida envolve um investimento de 12000 €, sendo o tempo de retorno do investimento de 2,4 anos.

Das cinco propostas estudadas concluiu-se que quatro são viáveis permitindo uma melhoria do funcionamento da Olaria e uma poupança significativa na factura energética.

Palavras-chave: Indústria cerâmica, Olaria, optimização energética.

Abstract

In the ceramic industry, the energy consumption is high contributing significantly to the global production costs. Consequently, the energy must be managed continuously and effectively. The main goals of this work were to perform an energetic audit to the forming step of one of the pottery section (number four) of Fábrica Cerâmica de Valadares, S.A, and to propose optimization measures.

The real yield of the pottery was determined being only 24.7%. The thermal losses that occur in the pottery section concern the surroundings, ventilation, the exhaust gases and the thermal inertia, representing, respectively, 18122 MJ, 50222 MJ, 39228 MJ and 4338 MJ per working week.

Several measures of optimization were suggested.

The first proposal is related with an improvement of the maintenance of the generators, an increase in the temperature range of operation of generators and a minimization of the opening time of the gates..

The second measure concerns the decrease of the percentage of excess air to 10%, which can promote savings up to € 8839/year.

The third studied suggestion evaluated the application of a heat exchanger in order to take advantage of the flue gas allowing a saving of € 119 per year. However, this measure was found not to be viable due to the high payback time (12.6 years).

The fourth measure proposed is associated with the optimization of the ventilation in the pottery section increasing the air cycle renewal to 5 h. Its application can allow savings up to 8583 €/year.

The last optimization proposal regards the reduction of the volume of the pottery section in 6935 m^3. Its field application may originate savings up to 4993 €/year and involves an investment of 12000 € with a payback period of 2.4 years.

Globally, four of the five proposed measures were considered viable and can promote a better functioning of the Pottery section promoting significant savings in energy.

Keywords: Ceramic industry, pottery section, energy optimization

Índice geral

Capítulo 1

1. Introdução 1

1.1. Objectivos do trabalho 1

1.2. A Fábrica Cerâmica de Valadares 1

1.3. A cerâmica e sua classificação 2

1.4. Louça sanitária 4

1.4.1. Materiais 4

1.4.2 Processo de fabrico 5

1.5. Energia no sector cerâmico 9

1.6. Alvo de estudo – A etapa de conformação 9

1.7. A Psicrometria 12

1.8. Produção de ar quente 14

1.8.1. Combustão 16

1.9. Perdas de Calor 17

Capítulo 2

2. Parte experimental 19

2.1. Descrição da olaria 19

2.2. Especificações dos Equipamentos 25

2.3. Procedimento 25

Capítulo 3

3. Resultados e Discussão 27

3.1. Determinação do rendimento efectivo da etapa de conformação 27

3.2. Perdas térmicas da etapa de conformação 28

3.2.1. Perdas térmicas pela envolvente 28

3.2.1.1. Estudo das condições ambientais da olaria 28

3.2.1.2. Simulação 29

3.2.2. Perdas térmicas pela exaustão dos gases de combustão 32

3.2.2.1. Análise dos Geradores 32

3.2.3. Perdas térmicas pela ventilação....34
3.2.4. Perdas térmicas pela inércia dos equipamentos....34
3.3. Optimização energética da etapa de conformação....34
3.3.1. Medidas simples de manutenção e melhoria do funcionamento da Olaria....34
3.3.2. Optimização da queima dos geradores....35
3.3.3. Aproveitamento dos gases de combustão....36
3.3.4. Diminuição da ventilação....36
3.3.5. Diminuição do volume da Olaria....37
Capítulo 4
4. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros....39
Anexos
A. Condições climáticas....44
A1. Condições climáticas da olaria....44
A2. Condições climáticas do exterior da olaria....50
B. Cálculo das perdas térmicas pela envolvente....54
B1. Realização da folha de cálculo ou simulação....54
B2. Fundamentação da folha de cálculo realizada....61
C. Estudo dos geradores....74
C1. Determinação da eficiência pelo método directo....74
C2. Análise da combustão....78
C3. Determinação da eficiência de combustão....82
D. Ventilação....84
E. Consumos de gás natural....87
F. Balanços efectuados....88
F1. Balanço de massa....88
F2. Balanço energético....88
G. Cálculos das medidas de optimização propostas....93
G1. Optimização da queima dos geradores....93

G2. Aproveitamento dos gases de combustão.....94
G3. Diminuição da ventilação 97
G4. Diminuição do volume da Olaria.....98

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Etapas da produção de louça sanitária. 6
Figura 1.2 - Etapas do processo de enchimento. 9
Figura 2.1 - Planta da Olaria 20
Figura 2.2 - Esquema representativo do circuito da barbotina.....21
Figura 2.3 - Esquema representativo da Olaria do ponto de vista da climatização....23
Figura 3.1 - Perdas térmicas mensais ocorridas pela envolvente da Olaria, diferenciadas pela altura do dia. 30
Figura 3.2 - Perdas térmicas médias anuais ocorridas por zona. 30
Figura 3.3 - Perdas térmicas ocorridas mensalmente, especificadas por zona 31

Figura A.1 - Representação das medições realizadas no 1º ensaio das condições ambientais da Olaria. 45
Figura A.2 - Representação das medições realizadas no 2º ensaio das condições ambientais da Olaria. 46
Figura A.3 - Representação das medições realizadas no 3º ensaio das condições ambientais da Olaria. 47
Figura A.4 - Representação da média das medições realizadas, das condições ambientais da Olaria. 48
Figura A.5 - Representação da divisão da Olaria por zonas.....49
Figura A.6 - Comparação das temperaturas do lado Norte e da Olaria. 50
Figura A.7 - Comparação das temperaturas do lado Oeste e da Olaria. 51

Figura B.1 - Posições das medições realizadas na parede do lado Norte na parte interna.....62
Figura B.2 - Posições das medições realizadas na parede do lado Norte na parte externa.....63
Figura B.3 - Ilustração representativa da parede.....65
Figura B.4 - Posições das medições realizadas na parede do lado Oeste na parte interna.....67
Figura B.5 - Posições das medições realizadas na parede do lado Oeste na parte externa.....68
Figura B. 6 - Posições das medições realizadas na parede do lado Este na parte interna.....70
Figura B. 7 - Posições das medições realizadas na parede do lado Este na parte externa.....71

Figura C.1 - Representação dos pontos onde se realizaram os ensaios. 76

Figura G.1 – Esquema representativo do permutador de calor. 94

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Características dos equipamentos. 25
Tabela 3.1 - Valores médios de temperatura (T) e humidade relativa (HR). 28
Tabela 3.2 - Fluxo térmico perdido por zona, com base na simulação e nas medições efectuadas. 31
Tabela 3.3 – Rendimento dos geradores calculados pelo método directo. 32
Tabela 3.4 - Dados relativos à eficiência de combustão e excesso de ar dos geradores.....33
Tabela 3.5 - Eficiência dos geradores após optimização. 35
Tabela 3.6 - Poupança obtida pela optimização da eficiência de combustão 36

Tabela A.1 - Valores de temperatura e humidade das diferentes zonas.....49
Tabela A.2 - Valores da temperatura exterior retirados do Instituto de Meteorologia.52
Tabela A.3 - Valores calculados de temperaturas e humidades ao longo do ano do lado Norte. 52
Tabela A.4 - Valores calculados de temperaturas e humidades ao longo do ano do lado Oeste. 53

Tabela B.1 - Dados para o cálculo das propriedades dos componentes do ar. 56
Tabela B.2 - Valores das temperaturas medidas no lado interno da parede a Norte. 62
Tabela B.3 - Valores das temperaturas medidas no lado externo da parede a Norte. 63
Tabela B.4 - Valores das diferenças de temperatura para a parede a Norte. 64
Tabela B.5 - Valores de resistência térmica dos materiais da parede a Norte. 65
Tabela B.6 - Valores do fluxo térmico para a parede a Norte. 66
Tabela B.7 - Valores das temperaturas medidas no lado interno da parede a Oeste. 67
Tabela B.8 - Valores das temperaturas medidas no lado externo da parede a Oeste. 68
Tabela B. 9 - Valores das diferenças de temperatura para a parede a Oeste. 69
Tabela B. 10 - Valores de resistência térmica dos materiais da parede a Oeste. 69
Tabela B. 11 - Valores do fluxo térmico para a parede a Oeste. 69
Tabela B. 12. Valores das temperaturas medidas no lado interno da parede a Este. 70
Tabela B. 13 - Valores das temperaturas medidas no lado externo da parede a Este. 71
Tabela B. 14 - Valores das diferenças de temperatura para a parede a Este. 72

Tabela B. 15 - Valores de resistência dos materiais da parede a Este. 72
Tabela B. 16 - Valores do fluxo térmico para a parede a Este. 72
Tabela B. 17 - Comparação dos fluxos térmicos com base na simulação e na medição experimental. 73

Tabela C.1 - Dados dos ensaios realizados para determinar o caudal de gás natural. 74
Tabela C.2 - Dados dos ensaios realizados para determinar o caudal de ar aquecido. 75
Tabela C. 3 - Dados usados no cálculo da energia associada ao ar aquecido. 76
Tabela C.4 - Propriedades do gás natural alimentado aos geradores. 77
Tabela C.5 - Resultados do cálculo da energia associada ao gás natural. 77
Tabela C.6 - Valores da eficiência directa dos geradores. 77
Tabela C.7 - Dados da composição do gás natural. 78
Tabela C.8 - Tabela de combustão. 79
Tabela C.9 - Propriedades do ar de combustão. 80
Tabela C.10 - Propriedades dos compostos do gás natural. 80
Tabela C.11 - Poder calorífico do gás natural. 80
Tabela C.12 - Dados experimentais e calculados dos ensaios realizados na análise dos gases de combustão. 81
Tabela C. 13 - Dados relativos à quantidade de gases de combustão de cada gerador. 82
Tabela C. 14 - Dados da eficiência de combustão dos geradores. 83

Índice de Abreviaturas e símbolos

A – Área (m^2)

$A_{ex.}$ – Área de exaustão de ar da Olaria (m^2)

$cp_{ar\ comb.}$ - Calor especifico do ar de combustão (J/(kg.K))

$cp_{ar\ húmido}$ – Calor específico do ar húmido (J/(kg.K))

$cp_{ar\ seco}$ - Calor específico do ar seco (J/(kg.K))

$cp_{combustível}$ - Calor especifico do combustível (J/(kg.K))

cp_{Gases} – Calor especifico dos gases de combustão (kJ/(kg.K))

$cp_{vapor\ de\ água}$ - Calor específico do vapor de água (J/(kg.K))

E_{ar} - Potência térmica do ar (kW)

E_{gases} – Potência térmica dos gases de combustão (kW)

$E_{gás\ natural}$ – Potência térmica do gás natural (kW)

$E_{envolvente}$ - Potência térmica associada às perdas pela envolvente (kW)

g - Aceleração da gravidade (m/s^2)

g_r – Factor solar do vão envidraçado

G_{sul} - Potência solar ($kW.h/mês.m^2$)

H – Entalpia (kW)

HA – Humidade absoluta ($mol_{água}/mol_{ar\ seco}$)

$h_{conv.int.}$ - Coeficiente de transferência de calor por convecção interno ($W/(m^2.K)$)

$h_{conv.ext.}$ - Coeficiente de transferência de calor por convecção externo ($W/(m^2.K)$)

HR – Humidade relativa (%)

HV - Humidade absoluta em base mássica ($kg_{água}/kg_{ar\ seco}$)

k - Condutividade térmica (W/(m.K))

$k_{ar\ húmido}$ – Condutividade do ar húmido (W/(m.K))

L – Altura (m)

M - Meses do ano (meses)

$\dot{m}_{ar}$ - Caudal mássico de ar (kg/s)

m_{ar} - Massa de ar (kg)

$\dot{m}_{água\ evaporada}$ – Caudal mássico de água evaporada (kg/semana)

$m_{ar\ comb.}$ - Massa de ar de combustão (kg)

$\dot{m}_{ar\ comb.}$ – Caudal mássico de ar de combustão

$\dot{m}_{ar\ seco}$ - Caudal mássico de ar seco (kg/s)

$\dot{m_{ar}}_{vent.}$ – Caudal mássico de ar ventilado (kg/s)

$\dot{m}_{barbotina\ seca}$ - Caudal mássico de barbotina seca (kg/semana)

$m_{combustível}$ - Massa de combustível (kg)

$\dot{m}_{Combustível}$ - Caudal mássico de combustível (kg/s)

m_{Gases} - Massa de gases de combustão (kg)

$\dot{m}_{Gases}$ – Caudal mássico dos gases de combustão (kg/s)

$m_{gás\ natural}$ – Massa de gás natural (kg)

$\dot{m}_{gás\ natural}$ – Caudal mássico de gás natural (m^3/s)

$MM_{ar\ húmido}$ – Massa molecular do ar húmido (g/mol)

$MM_{ar\ seco}$ – Massa molecular do ar seco (g/mol)

$\dot{m}_{peças\ secas}$ – Caudal mássico de peças secas (kg/semana)

$\dot{m}_{resíduos}$ – Caudal mássico de resíduos (kg/semana)

$\dot{m}_{vapor\ de\ água}$ - Caudal mássico de vapor de água (kg/s)

Nu – Número de Nusselt

P – Pressão atmosférica (kPa)

PCI – Poder calorífico inferior (MJ/kg)

PCS – Poder calorífico superior (MJ/kg)

$P_{iluminação}\ (W)$ - Potência de Iluminação

Pr – Número de Prantdl

P_v – Pressão de vapor (kPa)

P_{vs} - Pressão de vapor saturado (kPa)

$\dot{Q}$ – Fluxo térmico (W/m^2)

Q_{Ar} - Calor do ar (kJ)

$Q_{Ar\ comb.}$ – Calor sensível do ar de combustão (kJ)

$Q_{combustível.}$ - Calor associado ao combustível (kJ)

$\dot{Q}_{condução}$ - Fluxo térmico por condução (W/m^2)

$Q_{condução}$ - Calor transferido por condução (kJ)

$\dot{Q}_{conv.ext.}$ - Fluxo térmico por convecção exterior (W/m^2)

$\dot{Q}_{conv.int.}$ – Fluxo térmico por convecção interior (W/m^2)

$Q_{envolvente}$ - Calor associado à envolvente (MJ)

$Q_{gás\ natural}$ – Calor associado ao gás natural (MJ)

$Q_{gases\ de\ combustão}$ - Calor associado aos gases de combustão (MJ)

$Q_{Iluminação}$ - Calor associado à iluminação (MJ)

$Q_{inércia\ térmica}$ - Calor associado à inércia térmica (MJ)

$\dot{Q}_{rad.ext.}$ - Fluxo térmico por radiação (W/m^2)

$Q_{rad.\ solar}$ - Calor associado à radiação solar (MJ)

$Q_{S.Combustível}$ – Calor sensível do combustível (kJ)

$Q_{ventilação}$ - Calor associado à ventilação (MJ)

R - Constante dos gases perfeitos ((atm.L)/(K.mol))

$R_{condução}$ – Resistência térmica à condução ((K.m^2)/W)

Re – Número de Reynolds

$\mathrm{Ra_L}$ – Número de Rayleigh

t - Tempo (h)

T – Temperatura (K)

$T_{Ar\ comb.}$ – Temperatura do ar de combustão

$T_{Comb.}$ – Temperatura do combustível (K)

T_{Gases} – Temperatura dos gases de combustão (K)

$T_{envolvente}$ – Temperatura da envolvente (K)

$T_{Ref.}$ – Temperatura de referência (K)

$\mathrm{T_s}$ – Temperatura da superfície (K)

v – Velocidade (m/s)

$\dot{V_{ar}}$ – Caudal volúmico e ar (m^3/s)

$V_{gás\ natural}$ – Volume de gás natural (m^3)

$\dot{V}_{gás\ natural}$ - Caudal volúmico e gás natural (m^3/s)

$Vn_{gás\ natural}$ - Volume de gás nas condições PTN (Nm^3)

X – Factor de orientação

Y – Humidade da barbotina ($kg_{água}/kg_{sólido\ seco}$)

β - Coeficiente de expansão do ar húmido (K^{-1})

ε – Emissividade

$\eta_{Combustão}$ - Eficiência de Combustão (%)

$\eta_{directo}$ – Eficiência pelo método directo (%)

η_{Perdas} – Eficiência pelo método das perdas (%)

σ – Constante de Stefan-Boltzmann (W/(m^2.K$^{4)}$)

λ - Calor latente de vaporização da água (kJ/kg)

$\mu_{ar\ húmido}$ – Viscosidade do ar húmido (Pa.s)

$\mu_{cinemática}$ - Viscosidade cinemática (m^2/s)

ρ – Massa volúmica (kg/m^3)

$\Delta \mathrm{x}$ – Espessura (m)

ΔT - Diferença de temperaturas (K)

$\%Q_{gases}$ - Percentagem das perdas térmicas dos gases de combustão (%)

Capítulo 1

1. Introdução

O consumo de energia tem nos dias de hoje uma grande importância no sector industrial, embora que em muitos casos este seja negligenciado. O peso que este tem nos custos de exploração, é habitualmente baixo quando comparado com o peso de outros factores como a mão-de-obra ou a matéria-prima (Gaspar, 2004).

Na indústria cerâmica, em particular, o consumo de energia não é esquecido, pois o processamento dos produtos cerâmicos envolve unidades de tratamento térmico, o que conduz a um elevado consumo de energia fazendo com que este factor represente uma parte significativa dos custos de produção das peças. De forma a diminuir esta dependência, a energia deve ser gerida de forma contínua e eficaz.

A crescente pressão ambiental em torno das indústrias veio reforçar a necessidade de utilizar eficientemente a energia, seja por imposição legal, por uma questão de competitividade ou por outros requisitos. A optimização energética e a sua gestão, em certa forma, dissocia o aumento de produção com o aumento de energia, pois esta consiste em manter ou aumentar o nível de produção diminuindo os consumos energéticos.

1.1. Objectivos do trabalho

A elaboração desta dissertação resulta da necessidade que a indústria hoje em dia tem, em diminuir o consumo energético e consequentemente os custos da factura energética, de forma, a que esta se torne mais competitiva, tanto a nível produtivo como a nível ambiental.

No âmbito da dissertação para a obtenção do grau de mestre no ramo de Optimização Energética na Indústria Química, foi desenvolvido um estágio na Fábrica Cerâmica de Valadares, a fim de efectuar a optimização energética num dos sectores da empresa. Este trabalho consistiu essencialmente na análise da situação energética da olaria número quatro e consequentemente, na elaboração de medidas que promovam uma maior eficiência, e a sua devida fundamentação e viabilidade económica.

1.2. A Fábrica Cerâmica de Valadares

A Fábrica Cerâmica de Valadares, S.A. (FCV), foi fundada em 25 de Abril de 1921 e está localizada na vila de Valadares, no concelho de Vila Nova de Gaia. Ocupa uma área total de 176.000 m^2, sendo 72.000 m^2 de construção, empregando actualmente cerca de 421 pessoas.

A FCV iniciou a sua actividade com o fabrico de tijolo e telha, passando mais tarde a fabricar louça decorativa, azulejos, mosaico, louça sanitária e acessórios cerâmicos para quarto de banho. Na década de 90, em resultado das mudanças verificadas no mercado, a FCV decidiu centralizar-se na produção exclusiva de louça sanitária de elevada qualidade e de acessórios cerâmicos para quartos de banho. De forma a reforçar este empenho está certificada e possui um Sistema de Gestão Integrada de Qualidade e Ambiente.

Dado o crescente interesse do mercado por produtos inovadores e diferentes, a FCV decidiu investir parte do seu "know-how" no desenvolvimento de produtos de design em grés. Desta forma surgiu uma nova pasta (Gresanit) com características únicas do ponto de vista da qualidade e fiabilidade que permitiu abrir novos mercados e fundamentalmente disponibilizar uma alternativa simultaneamente segura do ponto de vista de utilização do produto e com o tão procurado design (Fábrica Cerâmica de Valadares).

1.3. A cerâmica e sua classificação

A cerâmica é uma actividade ou arte de produção de artefactos baseada na propriedade que a argila possui, fácil moldagem no estado de barro e dureza elevada posteriormente à sua secagem e cozedura. A cerâmica compreende todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos geralmente após tratamento térmico a temperaturas elevadas (Smith, 2000).

A cerâmica é uma das mais antigas artes, encontrando-se louça de barro cozida datadas cerca de 15.000 a.C. A fácil moldagem da argila quando misturada com água e a capacidade de endurecer após queima, permitiu que esta inicialmente fosse utilizada como armazenamento de grão e de líquidos, tendo a sua utilização evoluído ao longo do tempo para artigos mais elaborados.

Com o rápido desenvolvimento da indústria cerâmica, novas tecnologias, matérias-primas, formatos e design foram desenvolvidos, o que proporcionou uma vasta gama de produtos cerâmicos para variadíssimas aplicações (R. Norris & Brink Jr., 1997). Devido à existência de uma vasta gama de produtos no sector cerâmico há a necessidade de o dividir em vários segmentos. A classificação habitualmente adoptada é feita com base na sua aplicação:

- Cerâmica Vermelha

Inclui todos os materiais de coloração avermelhada utilizados na construção civil e de uso doméstico (tijolos, blocos, telhas, entre outros).

❖ Materiais de Revestimento

Abrange os materiais na forma de placas usados na construção civil para revestimentos (azulejo, pastilha, porcelanato, entre outros).

❖ Cerâmica Branca

Compreende os materiais constituídos por um corpo branco e em geral revestidos por uma camada vítrea. Com o aparecimento dos vidrados opacos, muitos dos produtos enquadrados neste grupo passaram a ser fabricados com matérias-primas com um certo grau de impurezas, responsáveis pela coloração. Sendo este um grupo bastante diversificado poder-se-á subdividi-lo em função da sua utilização: louça sanitária, louça de mesa, isolantes eléctricos para alta e baixa tensão, cerâmica artística (decorativa e utilitária) e cerâmica técnica (químico, eléctrico, térmico e mecânico).

❖ Materiais Refractários

Inclui os produtos que têm como finalidade suportar temperaturas elevadas em condições específicas.

❖ Isolantes Térmicos

Os produtos deste grupo são classificados em, refractários isolantes, isolantes térmicos não refractários e fibras ou lãs cerâmicas.

❖ Fritas e Corantes

Frita ou vidro moído é aplicado na superfície do corpo cerâmico que, após a queima, adquire aspecto vítreo. Corantes são adicionados aos vidrados ou aos corpos cerâmicos para conferir-lhes coloração.

❖ Abrasivos

Por utilizarem matérias-primas e processos semelhantes aos da cerâmica, constituem-se num segmento cerâmico (óxido de alumínio fundido electronicamente e o carbeto de silício).

❖ Vidro, Cimento e Cal

São três importantes segmentos cerâmicos e que, pelas suas particularidades, são muitas vezes considerados à parte da cerâmica.

❖ Cerâmica de Alta Tecnologia/Cerâmica Avançada

O desenvolvimento de novas tecnologias nas mais diferentes áreas passou a exigir materiais com qualidade excepcionalmente elevada. Tais materiais passaram a ser

desenvolvidos a partir de matérias-primas sintéticas de altíssima pureza e por meio de processos rigorosamente controlados (Oliveira & Maganha Bérnils, 2008).

1.4. Louça sanitária

Tendo em conta que a Fábrica Cerâmica de Valadares, S.A. se centra exclusivamente na concepção de artigos sanitários, nesta secção é feita uma descrição detalhada dos materiais e do processo de produção de louça.

1.4.1. Materiais

Na concepção de artigos sanitários normalmente recorre-se a três tipos de materiais ao grés, à porcelana sanitária e ao grés fino. Seguidamente é feita a descrição de cada um destes tipos de materiais.

- Grés

O grés (*Fire Clay*) é feito a partir da mistura de argila refractária e quartzo criando um material que depois de vidrado e cozido dá origem a um corpo com uma taxa de absorção de água entre os 11 e os 13%, mas com baixa deformação e adequado ao fabrico de artigos de grande dimensão. A sua resistência mecânica e química é baixa, limitando a sua utilização.

- Porcelana Sanitária

A Porcelana Sanitária (*Vitreous China*) é uma mistura de argila, caulino, quartzo e feldspato que forma uma massa cerâmica, que depois de vidrado e cozido fica com uma taxa de absorção de água que não excede os 0,5% em massa, conferindo ao material grande resistência mecânica, química e bacteriológica. Porém apresenta um nível de contracção elevado (11%) entre a conformação e o produto cozido, o que limita o seu uso em artigos de grande dimensão.

- Grés Fino

O grés fino (*Fine Fire Clay*) é uma mistura de grés ou caulino, chamote, argilas magras, quartzo e material sinterizado que forma uma pasta, em que esta é vidrada antes da cozedura, dando origem a um corpo com uma taxa de absorção de água da ordem dos 9%, mas com menor deformação e contracção (8%) do que a porcelana sanitária, mas também com menor resistência mecânica e química. (Cerâmica, 2002)

Na Fabrica Cerâmica de Valadares a louça sanitária é produzida em porcelana sanitária e em Gresanit. As características da pasta Gresanit colocam-na entre a porcelana sanitária e o grés fino. É um material criado a partir de argilas, chamote e inertes em que

este é vidrado e depois cozido. O material resultante apresenta uma resistência mecânica e química próxima da porcelana sanitária e com uma absorção de água de cerca de 4%, sendo adequado para o fabrico de artigos sanitários de grande dimensão.

1.4.2 Processo de fabrico

Considerando a necessidade de se conhecer o processo produtivo para posteriormente propor melhorias energéticas e consequentemente ambientais, para o sector da cerâmica sanitária, esta secção aborda as principais características e etapas de fabricação de louça sanitária.

Os processos de fabrico utilizados pelos diversos sectores cerâmicos assemelham-se entre si parcial ou totalmente, podendo diferir de acordo com o tipo de peça ou material desejado. De um modo geral, compreendem as seguintes etapas:

1. Preparação da matéria-prima e da massa;
2. Formação das peças;
3. Tratamento térmico;
4. Acabamento.

Na fabricação de muitos produtos, como no caso da maior parte da louça sanitária, existe ainda a etapa de vidragem.

No processo de fabricação de louça sanitária as peças mais produzidas são as bacias (sanitas), lavatórios, bidés, bases de chuveiro, tanques e colunas.

Na Figura 1.1 está apresentado um fluxograma específico das etapas de produção de louça sanitária. A primeira etapa do processo de produção é a preparação da massa cerâmica. Esta é uma das etapas mais importantes do processo, pois a dosagem de matérias-primas e aditivos deve seguir com rigor as formulações de massas previamente estabelecidas, devendo ser bem misturadas e homogeneizadas, de modo a conseguir a uniformidade física e química da massa. A garantia da homogeneidade da massa depende do peso seco de cada matéria-prima envolvida, sendo necessário um rigoroso controlo da humidade.

Na Fábrica Cerâmica de Valadares para produzir a pasta sanitária de porcelana são normalmente utilizados os seguintes materiais: caulino, argila, feldspato e quartzo. A quantidade e tipo de argila e caulino a ser usado quando se está a formular um corpo, dependem das características pretendidas para a pasta, tais como: viscosidade, tempo de formação de espessura, tempo de arrefecimento, plasticidade da pasta endurecida, resistência mecânica do corpo cru e encolhimento do corpo cru.

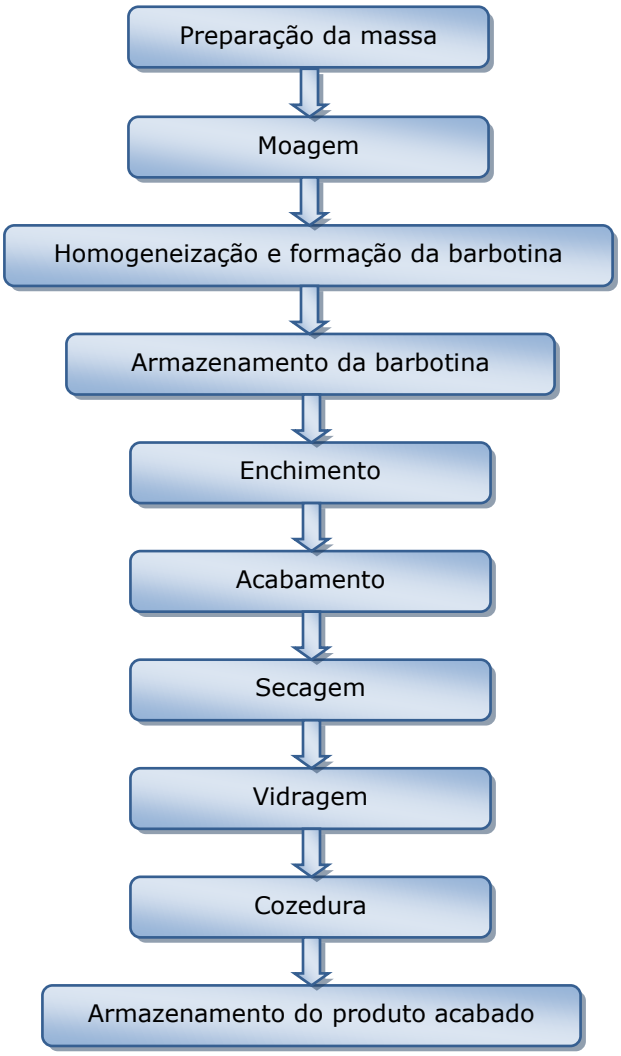


Figura 1.1 - Etapas da produção de louça sanitária.

De acordo com a técnica a ser empregue para dar forma às peças, existem diferentes tipos de massa, que são classificadas em suspensão ou barbotina (pasta de argila para obtenção de peças em moldes de gesso ou resinas porosas), massas secas ou semi-secas (obtenção de peças por prensagem) e massas plásticas (constituída de um sólido maleável, para obtenção de peças por extrusão).

Após a preparação da massa cerâmica esta, passa pelo processo de moagem, de forma a diminuir a granolumetria das partículas. Neste processo é adicionada água e é formada a pasta cerâmica que irá ser usada para a obtenção das peças, dando-se pelo nome de barbotina, visto que na FCV as peças são obtidas por moldes em gesso ou resinas porosas.

A concepção destes moldes é uma operação complexa e delicada, visto que esta etapa obriga a um completo domínio do processo industrial e das variáveis tecnológicas

envolvidas, e o sucesso de fabrico depende das opções técnicas tomadas durante a concepção do modelo.

Numa fase inicial da preparação do molde há o desenvolvimento de desenhos, procedendo-se de seguida à produção do modelo, tendo em consideração os níveis de deformação e retracção mecânica dos artigos. Uma vez obtido o modelo é feito o primeiro molde, também chamado de molde original. Este é usado para produzir várias peças que são testadas, e se responderem positivamente aos requisitos técnicos e funcionais, passa-se à construção da madre. Contrariamente há que realizar as mudanças necessárias até obter o resultado pretendido. Através das madres são produzidos os moldes, nos quais se efectua o enchimento das peças. Normalmente os moldes são feitos de gesso, mas com o desenvolvimento de novas técnicas de enchimento de média alta pressão, estes podem ser feitos de resinas. Na Fabrica Cerâmica de Valadares, existem ambos os tipos de moldes.

Na etapa de enchimento existem diversos processos para dar forma às peças cerâmicas, e a selecção de cada um deles depende fundamentalmente das características do produto, tais como, geometria, dimensões, propriedades das matérias-primas e outros.

O processo utilizado para a produção de louça sanitária é a fundição em molde, que é usado quando se tem produtos feitos à base de barbotina. Esta técnica consiste no enchimento de um molde de gesso com barbotina, onde permanece durante um determinado tempo. Numa primeira parte há a formação de espessura, ou seja, a água contida na suspensão é absorvida pelo gesso do molde e as partículas sólidas acomodam-se na sua superfície, formando o que será posteriormente a parede da peça. Posteriormente terá de haver uma eliminação contínua de água até que o corpo atinja uma consistência que permita a sua extracção do molde e o seu manuseamento. O produto, assim formado, apresentará uma configuração externa que reproduz a forma interna do molde de gesso.

Posteriormente à etapa de formação, as peças ainda contém grande quantidade de água proveniente da preparação da massa. De forma a evitar tensões e, consequentemente, defeitos nas peças, é necessário eliminar essa água de forma lenta e gradual, até um teor suficientemente baixo, cerca de 0,8% a 1,5% de humidade residual. O fluido de aquecimento usado na secagem é o ar. Normalmente a secagem na indústria sanitária é realizada em duas fases sendo a primeira designada por secagem verde, em que a peça extraída do molde é sujeita a uma secagem inicial, que a torna mais consistente e mais manuseável para o acabamento, seguida da secagem branca em que os produtos semi-processados são secos até uma humidade residual de cerca de 1%.

É de salientar que para a redução do consumo energético, a etapa de secagem deverá se rápida, eficiente e de baixo desperdício, controlando as taxas de aquecimento, circulação de ar, temperatura e humidade.

O processo posterior à secagem é o acabamento. Esta etapa consiste em corrigir algumas imperfeições que possam existir na peça. O acabamento pode ser feito depois da secagem a branco ou a verde ou depois da cozedura, embora se tente minimizar as peças que necessitam desta etapa depois da queima, pois este é mais dispendioso quando comparado se o mesmo for realizado numa fase em que a peça está em cru.

Em seguida os produtos recebem uma camada fina e contínua de um material denominado esmalte ou vidrado, que após queima adquire aspecto vítreo. Esta camada contribui para o aspecto estético, higiénico e melhora algumas das propriedades físicas, principalmente as resistências mecânica e eléctrica.

A composição dos vidrados é bastante variada, e sua formulação depende das características do corpo cerâmico, das características finais do vidrado e da temperatura de queima. A sua preparação ocorre na forma de uma suspensão aquosa, cuja viscosidade é ajustada para cada tipo de aplicação. Normalmente os vidros usados na concepção de louça sanitária de porcelana são brancos, podendo ocasionalmente serem de vidro colorido.

A aplicação dos vidrados no corpo cerâmico pode ser realizada de diferentes modos. A sua escolha depende da forma, tamanho, quantidade e estrutura das peças, incluindo também o efeito que se deseja obter na superfície esmaltada. No caso da FCV a aplicação do vidrado é feita por pulverização.

Antes das peças serem armazenadas, estas são sujeitas à operação de queima ou cozedura correspondente à etapa final do processo. Nesta etapa, os produtos adquirem as suas propriedades finais. Nesta unidade de processamento as peças são encaminhadas para fornos contínuos ou descontínuos e submetidas a um tratamento térmico entre 800 ºC e 1.700 ºC. Durante esta ocorre uma série de transformações em função dos componentes da massa, tais como: perda de massa, desenvolvimento de novas fases cristalinas, formação de fase vítrea e a soldagem dos grãos. O desenvolvimento das propriedades finais dos produtos, as quais incluem o seu brilho, cor, porosidade, estabilidade dimensional, resistência à flexão, a altas temperaturas, à água, ao ataque de agentes químicos entre outros, dependem da eficiência desta etapa. Em função desta importância, é fundamental que a instalação dos fornos esteja correctamente dimensionada, de modo a garantir uma combustão eficiente. Desta forma, em função do tratamento térmico e das características das diferentes matérias-primas, são obtidos produtos para as mais diversas aplicações (Oliveira & Maganha Bérnils, 2008).

1.5. Energia no sector cerâmico

De acordo com os dados fornecidos pelo Instituto Nacional de estatística, no ano de 2009 foram produzidas 3.695.533 peças para uso sanitário, das quais 3.929.811 foram vendidas gerando um valor de 89.549.829 €. Em termos energéticos, este sector apresenta um grande consumo de energia, representando cerca de 15% da energia consumida no sector da indústria transformadora. A energia gasta representa 10 a 25% dos custos de produção. Como tal, é crucial a optimização energética de forma a diminuir os custos inerentes (INE, 2011).

No processo de produção de louça sanitária as etapas mais relevantes quanto ao consumo de energia são: a cozedura, a secagem, a moagem e o enchimento. Deste conjunto o processo de cozedura é o que envolve maior consumo energético. No entanto, os outros não devem ser desprezados, pois a sua optimização pode diminuir de forma significativa o consumo de energia e consequente diminuição dos custos.

O consumo de energia deve ser gerido continuamente e eficazmente, pois este permite uma maior competitividade e permite também cumprir e superar os requisitos ambientais estabelecidos.

1.6. Alvo de estudo – A etapa de conformação

A etapa de fabrico de louça sanitária abordada neste trabalho é a etapa de conformação. Esta etapa envolve a preparação, o enchimento, a desmoldagem e a secagem primária. O espaço onde esta etapa normalmente decorre é designado por olaria, pois é onde a barbotina adquire a sua forma. Este trabalho diz respeito ao consumo de energia para secagem de moldes e peças na secção da Olaria.

Na etapa de conformação, o processo de enchimento segue geralmente os passos apresentados na Figura 1.2.

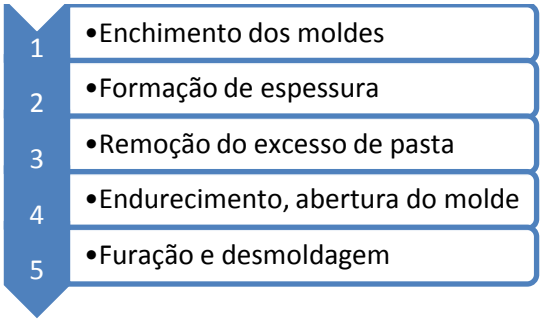


Figura 1.2 - Etapas do processo de enchimento.

Destes passos, os mais relevantes são a formação de espessura e o endurecimento da pasta, pois são os que mais condicionam o resultado final. Ambos os passos baseiam-se na remoção da água contida na barbotina. A água é absorvida pelo gesso e ao mesmo

tempo evaporada pelo ar da olaria. De maneira a que processo de enchimento ocorra mais rapidamente e de forma regular, o ar da olaria encontra-se a uma temperatura superior à do ar ambiente, tendo necessariamente de haver um controlo da temperatura e humidade de modo a não ocorrer condensação.

Além de haver a evaporação da água contida nos moldes, há também uma primeira fase de secagem, já referida anteriormente como secagem a verde.

Tendo estes factores em consideração a energia térmica consumida na climatização da olaria tem quatro objectivos principais:

- Remover a humidade dos moldes de gesso e promover o aquecimento ligeiro antes do enchimento;
- Acelerar a formação de espessura no molde por aumento da temperatura do meio;
- Promover a secagem ligeira, ou seja a ligeira contracção da peça ainda no molde;
- Promover a secagem primária da peça para melhoria da sua resistência mecânica.

Com base no que é referido anteriormente é necessário abordar alguns aspectos gerais de secagem e psicrometria.

A secagem é uma operação que envolve fenómenos de transferência de massa e calor, ou seja, a transferência de um líquido volátil de um sólido para um gás não saturado. A secagem tem como principais objectivos a redução de massa ou volume de um produto para posterior processamento, manuseamento ou transporte, preservação de um produto ou recuperação de solventes economicamente valiosos. Esta operação pode ser realizada de duas formas, mecânica ou termicamente, envolvendo ambas um elevado consumo de energia. No entanto, a secagem térmica envolve sempre um maior consumo de energia que a secagem por técnicas de separação mecânicas, sendo por sua vez mais eficiente (Coulson & Richardson, 1989).

A etapa de secagem é condicionada por diversos factores, entre eles, os mais importantes são:

- ❖ A quantidade de calor fornecido, pois está relacionada com as condições climáticas do local onde é realizada a secagem, nomeadamente a temperatura do ambiente, a humidade relativa do ar e a ventilação.
- ❖ Área do sólido, pois quanto maior for a área exposta, maior será a quantidade de água removida.

- ❖ Comportamento da humidade no sólido e no gás, pois a velocidade de secagem pode ser afectada pelas propriedades dos materiais envolvidos.

A secagem no processo de fabrico de cerâmica é uma etapa bastante delicada e complexa, pois é comum nesta etapa ocorrerem defeitos nas peças devido às contracções de volume. Em alguns casos, uma pequena contracção do corpo cerâmico é desejável, por permitir, por exemplo, uma fácil separação dos moldes de gesso. No entanto, uma contracção excessiva, pode originar o desenvolvimento de fendas. Desta forma, um melhor conhecimento dos mecanismos envolvidos na etapa de secagem possibilita a compreensão das causas do aparecimento de defeitos, permitindo evitá-los.

A água utilizada para a formação da pasta cerâmica denomina-se de água de conformação, em que esta pode adquirir a designação de água intersticial e de água livre ou água de plasticidade. A água intersticial está relacionada com a água necessária para preencher os poros das partículas, e a água livre ou água de plasticidade está relacionada com o espaço entre as partículas argilosas, separando-as e facilitando o processo de formação da peça, e é responsável pela contracção das peças (Fontes Vieira, Feitosa, & Monteiro, 2000).

A primeira fase da secagem é a mais problemática, pois é nesta fase que ocorre a eliminação da água que está entre as partículas e que é acompanhada pela retracção do corpo cerâmico. A água situada nas superfícies externas da peça evapora-se, e ao mesmo tempo, esta é substituída por água vinda do interior do corpo. À medida que a água que envolve as partículas de argila se vai evaporando, estas vão-se rearranjando de forma a estabelecer melhores contactos. A partir de determinada altura não se verifica mais contracção embora permaneça água nos poros ou em vazios entre as partículas, devido às superfícies das partículas terem estabelecido bons contactos entre si. No prosseguimento da secagem a restante água acaba por se eliminada mas sem haver qualquer contracção. O valor do teor de água a partir do qual não ocorre mais contracção é denominado de teor crítico de água (TCA); uma secagem rápida com corpos cerâmicos com um teor de água superior ao TCA pode provocar uma contracção brusca e consequente risco de fendilhamento e distorção, por isso a secagem deve ser efectuada lentamente. A velocidade de perda de água é constante para teores superiores ao TCA. Sob condições constantes, uma vez que envolve a evaporação da água envolvente das partículas, a partir do TCA como houve o desaparecimento da água à volta das partículas, a água que preenche os poros das partículas difunde-se por capilaridade para a superfície, e consequentemente a velocidade de remoção de água diminui com a redução do teor de água abaixo do TCA. A secagem abaixo do TCA pode ser feita mais rapidamente visto que não há contracção do

corpo cerâmico. A velocidade de secagem também vai depender da forma do corpo cerâmico (Gomes, 1988).

Na etapa de enchimento é também necessário haver uma secagem dos moldes visto que estes absorvem água na formação da peça.

O gesso é utilizado na fabricação de moldes devido à sua capacidade de absorção de água. Esta propriedade está relacionada com a sua porosidade e com a sua correcta distribuição na estrutura do molde. Uma boa capacidade de absorção de água promove um enchimento mais rápido e facilita a desmoldagem da peça. A esta característica deve estar associada uma boa permeabilidade ao ar, de forma a permitir uma rápida e eficaz secagem dos moldes entre a produção de duas peças (Freire, 2003).

Habitualmente a secagem é efectuada através da utilização de ar quente de modo a reduzir a humidade contida num sólido, estando implícito ser necessário o cálculo/determinação das propriedades do ar húmido. Deste modo, na secção seguinte serão abordados alguns aspectos relevantes sobre a psicrometria.

1.7. A Psicrometria

A Psicrometria é o estudo das misturas de ar e vapor de água. O ar seco consiste de uma mistura de gases, sendo os seus principais constituintes, o oxigénio e o nitrogénio. Além dos gases do ar seco, o ar húmido contém uma quantidade variável de vapor de água. Embora a fracção de vapor de água em peso no ar, em condições normais, seja sempre menor do que um décimo, ainda sim a presença das moléculas de água no ar, tem um efeito significativo nos processos evaporativos, uma vez que são estas moléculas as responsáveis pelo estabelecimento dos gradientes de humidade.

Os princípios da psicrometria são aplicados directamente em assuntos relacionados com a secagem. No estudo do processo de secagem, é necessário conhecer as propriedades psicrométricas, que na maioria dos casos são obtidas através das cartas psicrométricas. No entanto, o uso de equações matemáticas simplifica significativamente o seu uso, extinguindo os erros de leitura e possibilitando ao usuário executar várias leituras consecutivas (Oliveira L. S.).

As propriedades psicrométricas mais utilizadas para descrever a quantidade de vapor de água no ar são: a pressão de vapor, a humidade relativa, e a humidade absoluta. A pressão de vapor é a pressão parcial exercida pelo vapor de água no ar húmido. Quando esta água é vaporizada para um espaço confinado, obtém-se um equilíbrio dinâmico entre as taxas de evaporação e de condensação sobre a fase densa. Nesta condição de equilíbrio, o ar encontra-se completamente saturado com vapor de água, e a pressão de vapor é denominada pressão de vapor saturado (P_{vs} (kPa); equação 1.1).

$$ln(P_{vs}) = -\frac{7511{,}52}{T} + 89{,}63121 + 0{,}02399897 \times T - 1{,}1654551 \times 10^{-5} \times T^2 - 1{,}2810336 \times 10^{-8} \times T^3 + 2{,}0998405 \times 10^{-11} \times T^4 - 12{,}150799 \times ln(T) \quad (1.1)$$

Esta equação é válida para $273{,}16 \leq T\ (K) \leq 393{,}16$ (Jesus & Silva, 2002).

A humidade relativa (HR(%)) é a razão entre a fracção molar (ou pressão de vapor,P_v(kPa)) do vapor de água no ar e a fracção molar (ou pressão de vapor saturado) do vapor de água no ar saturado à mesma temperatura e pressão atmosférica, tal como mostra a equação 1.2.

$$HR = \frac{P_v}{P_{vs}} \times 100 \quad (1.2)$$

A humidade absoluta (HA($mol_{água}/mol_{ar\ seco}$)) é definida como as moles de vapor de água por unidade de moles de ar seco, em que P é a pressão de trabalho, de acordo com a equação1.3.

$$HA = \left(\frac{P_v}{(P - P_v)}\right) \quad (1.3)$$

Outra propriedade relevante e frequentemente utilizada relacionada com o ar húmido é a entalpia (H (kJ)), em que esta é calculada pela equação1.4.

$$H = \dot{m}_{ar\ seco} \times cp_{ar\ seco} \times \Delta T + \dot{m}_{vapor\ de\ água} \times cp_{vapor\ de\ água} \times \Delta T + \dot{m}_{vapor\ de\ água} \times \lambda_{Tr}$$

1.4

Em que $\dot{m}_{ar\ seco}$ (kg/s), $cp_{ar\ seco}$ (kJ/(kg.K)), $\dot{m}_{vapor\ de\ água}$ (kg/s), $cp_{vapor\ de\ água}$ (kJ/(kg.K)), ΔT (K) e λ (kJ/kg) são respectivamente, o caudal de ar seco, o calor específico do ar seco, o caudal de vapor de água, o calor especifico do vapor de água, a diferença entre a temperatura do ar e a temperatura de referência e o calor latente de vaporização da água à temperatura de referência (Jesus & Silva, 2002).

Como já referido, o estudo focalizou-se na etapa de conformação, incidindo na optimização energética, de modo a produzir uma melhor eficiência energética da referida etapa. De forma a suprimir este objectivo, é necessário determinar a finalidade e quanta energia é perdida. Deste modo torna-se essencial ter em conta as condições de funcionamento da olaria. Assim sendo é de fundamental importância abordar aspectos inerentes à transferência de calor através da envolvente, a geradores de calor e aos processos de combustão.

1.8. Produção de ar quente

Os geradores de calor são um dos equipamentos mais utilizados na indústria para a produção de ar quente e climatização. Este é definido como um equipamento em que os gases quentes provenientes da combustão de um combustível, fornecem calor a um fluido a aquecer (fluido frio). Trata-se assim de um permutador de calor em que a produção do fluído quente está intimamente ligada ao próprio aparelho. No gerador existe um local destinado à combustão, designado de câmara de combustão e outro local destinado à transferência de calor. De modo a optimizar energeticamente este tipo de equipamento é necessário determinar o seu rendimento. Os geradores da olaria da Fábrica Cerâmica de Valadares são utilizados de forma a aquecer o ar ambiente, através da combustão de gás natural.

Há diferentes métodos de calcular a eficiência em geradores. Embora isso possa levar a alguma confusão, métodos diferentes são usados para transmitir informações diferentes, portanto é importante saber o que está implícito numa medida de eficiência.

Existem dois métodos principais para determinar a eficiência de um gerador de calor. O primeiro é o método directo e o segundo, o método das perdas. Ambos os métodos, são normalmente referidos como eficiências térmicas brutas pois incluem todas as correntes associadas ao gerador. Neste trabalho foi usado o método directo pois este reproduz valores mais fiáveis (Doty & Turner, 2009).

O método das perdas baseia-se na quantificação das perdas do gerador, estas normalmente são perdas pelos gases de combustão, perdas pelas paredes do gerador, perdas por fugas entre outras. A eficiência pelo método das perdas é traduzida pela equação1.5.

$$\eta_{Perdas} = 100 - \sum \%Perdas \tag{1.5}$$

Outro termo normalmente usado para a eficiência de geradores e outros sistemas combustão é a eficiência de combustão. A eficiência de combustão é semelhante ao método das perdas, mas apenas são contabilizadas as perdas de calor devido aos gases de combustão, tal como é demonstrado nas equações 1.6 e 1.7.

$$\eta_{Combustão} = 100 - \%Q_{gases} \tag{1.6}$$

Em que:

$$\%Q_{gases} = \frac{Q_{Gases\ Combustão}}{Q_{combustível.}} \times 100 \tag{1.7}$$

A energia associada aos gases de combustão pode ser calculada pela equação 1.8.

$$Q_{Gases\ Combustão} = m_{Gases} \times cp_{Gases} \times \left(T_{Gases} - T_{Ref.}\right) \quad (1.8)$$

O método directo consiste em avaliar a energia que entra no sistema (gerador) e a energia que abandona o sistema. A eficiência pode então ser calculada pela razão entre a quantidade de calor absorvido pelo ar e o calor total que entra no sistema, tal como é evidenciado pela equação 1.9.

$$\eta_{directo} = \frac{Calor\ útil}{Calor\ total\ à\ entrada} \times 100 \quad (1.9)$$

A energia que entra no sistema pode ser calculada através do calor de combustão, calor sensível do combustível, calor sensível do ar de combustão e o calor sensível do ar de alimentação. Embora a parcela relativa aos calores sensíveis pode ser desprezada, pois esta quando comparada com o calor de combustão é muito inferior.

O calor de combustão é a energia libertada na queima do combustível ($Q_{Combustível}$) e pode ser calculado, recorrendo à equação 1.10, sendo necessário conhecer a massa de combustível ($m_{Combustível}$) a queimar e o poder calorífico inferior (PCI (MJ/kg)):

$$Q_{Combustível} = m_{combustível} \times PCI \quad (1.10)$$

O calor sensível do combustível ($Q_{S.Combustível}$) é a energia resultante do combustível entrar a uma temperatura superior à temperatura de referência e pode ser determinado recorrendo à equação 1.11.

$$Q_{S.Combustível} = m_{combustível} \times cp_{combustível} \times \left(T_{Comb.} - T_{Ref.}\right) \quad (1.11)$$

Onde $cp_{Combustível}$, $T_{Comb.}$ e $T_{Ref.}$ são respectivamente, o calor específico do combustível, a temperatura do combustível e a temperatura de referência.

Pela equação 1.12 é possível determinar o calor sensível do ar de combustão ($Q_{Ar\ comb.}$) a entrar a uma temperatura superior à temperatura de referência, em que $cp_{ar\ comb.}$ e $T_{Ar\ comb.}$ são o calor específico e a temperatura do ar de combustão.

$$Q_{Ar\ \ comb.} = m_{ar\ comb.} \times cp_{ar\ comb.} \times \left(T_{Ar\ comb.} - T_{Ref.}\right) \quad (1.12)$$

O calor do ar de alimentação que é aquecido (Q_{ar}) é calculado pela equação 1.13, em que é necessário saber a massa (m_{ar}), o calor específico (cp_{ar}) e as temperaturas de entrada ($T_{Ar\ ent.}$) e saída ($T_{Ar\ saída}$) do ar que é aquecido no gerador. Neste cálculo e no anterior é necessário ter em consideração a humidade do ar.

$$Q_{Ar} = m_{ar} \times cp_{ar} \times (T_{Ar\ ent.} - T_{Ar\ saída.}) \quad (1.13)$$

As saídas de energia estão relacionadas com o calor do ar aquecido, com o calor perdido nos gases de combustão e com o calor perdido pelas paredes do gerador.

Assim o rendimento térmico pelo método directo é determinado pela equação 1.14.

$$\eta_{directo} = \frac{Q_{Ar}}{Q_{Ar\ comb.} + Q_{S.Combustível} + Q_{Combustível}} \times 100 \quad (1.14)$$

No geral, o calor sensível do combustível e a energia contida no ar de combustão, podem ser desprezadas quando comparadas com a energia libertada na queima do combustível. Assim a determinação da eficiência pode ser resumida à equação 1.15 (Gaspar, 2004).

$$\eta_{directo} = \frac{Q_{Ar\ alim.}}{Q_{Combustível}} \times 100 \quad (1.15)$$

1.8.1. Combustão

A combustão pode definir-se como a ciência das reacções químicas exotérmicas em escoamentos com transmissão de calor e massa. Esta desempenha um papel fundamental na produção e no tratamento térmico de materiais cerâmicos. A energia requerida para estes processos pode ser fornecida através da queima de combustíveis. O combustível habitualmente utilizado é o gás natural.

O combustível é normalmente um hidrocarboneto cuja fórmula é C_xH_y, e o oxidante mais utilizado é o ar. Uma mistura de combustível e oxidante designa-se por estequiométrica, quando a quantidade de oxidante é a teoricamente necessária e suficiente para queimar completamente todo o combustível num processo de combustão ideal. No processo de combustão ideal há a formação de espécies químicas completamente oxidadas nos produtos de combustão. No caso da combustão de um hidrocarboneto em ar, os produtos são o CO_2 e H_2O. A reacção estequiométrica pode ser descrita da seguinte forma:

$$C_xH_y + \left(x + \frac{y}{4}\right)(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow xCO_2 + \frac{y}{2}H_2O + 3.76\left(x + \frac{y}{4}\right)N_2$$

No processo de combustão o número de átomos de cada elemento permanece constante.

O conhecimento das necessidades de ar para combustão, bem como da composição e volume dos produtos de combustão é fundamental para o projecto e controle de equipamentos de combustão. A estequiometria química fornece-nos os principais dados necessários aos cálculos de combustão (Coelho & Costa, 2007).

O excesso de ar é factor determinante da eficiência da combustão, pois controla o volume, temperatura e entalpia dos produtos da combustão. Um grande excesso de ar é indesejável, porque diminui a temperatura da chama, e aumenta as perdas de calor devido à energia dissipada com os gases de combustão, reduzindo a eficiência térmica. Lembrar que o azoto representa 79% da composição do ar, tendo portanto um papel decisivo na dissipação de calor em gases de combustão. Por outro lado, um baixo excesso de ar pode resultar em uma combustão incompleta e na formação de CO, fuligem e fumaça, além de possibilitar a acumulação de combustível não queimado, causando risco de explosão (Pinheiro & Valle, 1995).

1.9. Perdas de Calor

Como a olaria se encontra a uma temperatura superior à temperatura ambiente é necessário calcular as perdas de calor pela envolvente. As perdas térmicas pelas paredes, vidros e portões da olaria dão-se através de três fenómenos: condução, radiação e convecção.

A transferência de calor por condução ($Q_{cond.}$) pode ser expressa pela lei de Fourier equação1.16.

$$Q_{condução} = -k \times A \times \frac{dT}{dx} \tag{1.16}$$

Onde k é a condutividade térmica, A a área, T a temperatura e x é a direcção.

Na maior parte dos casos de transferência de calor por condução, o objectivo é saber qual a quantidade de calor transferida sob condições constantes (estado estacionário). Resolvendo a equação anterior de acordo com estes pressupostos, obtém-se a equação 1.17.

$$Q_{condução} = A \times k \times \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{\Delta T}{R} \tag{1.17}$$

A equação de condução pode ser rearranjada de forma a integrar o conceito de resistências térmicas, sendo a resistência térmica à condução pela parede expressa pela equação 1.18.

$$R = \frac{\Delta x}{A \times k} \tag{1.18}$$

A transferência de calor por convecção ($Q_{conv.}$) depende do escoamento do fluido sobre uma superfície sólida. Junto a essa superfície é formada um filme onde ocorrem as transferências de calor (equação 1.19 e 1.20).

$$Q_{conv.} = h \times A \times \Delta T = \frac{\Delta T}{R_{conv.}} \quad (1.19)$$

Em que

$$R_{conv.} = \frac{1}{h \times A} \quad (1.20)$$

O coeficiente de transferência de calor por convecção (h), depende do tipo de escoamento, da temperatura, do regime de trabalho entre outros. No caso de estudo a transferência de calor por convecção ocorre de duas formas: por convecção natural e por convecção forçada.

O coeficiente de transferência de calor por convecção é calculado pela equação 1.21.

$$h = \frac{Nu \times k}{L} \quad (1.21)$$

O cálculo do Nusselt (Nu) varia consoante o regime de trabalho e de acordo com o tipo de convecção. As equações posteriormente apresentadas, equação 1.22 e equação 1.23, correspondem ao cálculo do coeficiente de transferência de calor no caso de convecção forçada sobre uma placa (Çengel, 2003):

$$Se\ Re < 5 \times 10^5\ o\ regime\ é\ laminar\colon\ Nu = \frac{h \times L}{k} = 0{,}664 \times Re^{0{,}5} \times Pr^{\frac{1}{3}} \quad (1.22)$$

$$Se\ Re \geq 5 \times 10^5\ o\ regime\ é\ turbulento\colon\ Nu = \frac{h \times L}{k} = 0{,}037 \times Re^{0{,}8} \times Pr^{\frac{1}{3}} \quad (1.23)$$

O cálculo do Nu depende do número Reynolds (Re) e do Prandtl (Pr). No caso de transferência de calor por convecção natural numa placa vertical, o Nusselt é dado pela equação 1.24 (Çengel, 2003).

$$Nu = \left(0{,}825 + \frac{0{,}387 \times Ra_L^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0{,}492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 \quad (1.24)$$

A dimensão característica, L, varia consoante a geometria da superfície sendo neste caso a altura.

O calor transferido por radiação entre a superfície com uma certa emissividade e as superfícies envolventes pode ser descrito pela equação 1.25.

$$Q_{rad.} = \sigma \times \varepsilon \times A \times \left(T_s^4 - T_{envol.}^4\right) \quad (1.25)$$

Em que σ é a constante de Stefan Boltzmann, ε a emissividade, T_s a temperatura da superfície e $T_{envol.}$ a temperatura da envolvente (Çengel, 2003).

Capítulo 2

2. Parte experimental

Este capítulo centrar-se-á na explicação e na representação do processo que foi alvo de estudo na Fábrica Cerâmica de Valadares. A etapa de conformação realiza-se numa determinada parte da fábrica a qual se designa de olaria, pois é onde ocorre a formação do corpo cerâmico. A olaria em estudo foi a olaria número quatro.

2.1. Descrição da olaria

A olaria número quatro da fábrica Cerâmica de Valadares tem uma área de 5074 m^2 e um volume de 27222,9 m^3. O ar ambiente da olaria encontra-se climatizado a uma temperatura de cerca de 30 ºC com uma humidade relativa cerca de 40%.

Na figura 2.1 está representada a planta da olaria onde é possível identificar a existência de seis entradas, das quais, quatro são portões e as restantes são portas. Dos portões, três deles estão localizados na parede Este, ocupando uma área de 9,45, 15 e 15 m^2 e o outro está localizado na parede Norte. Este último faz ligação a outra área da fábrica, tendo respectivamente uma área de 9 m^2. Os portões a Este são os que têm ligação ao exterior, contudo apenas um está em funcionamento, realizando-se quando necessário carga ou descarga de material de grandes dimensões. A parede virada para o exterior tem ainda janelas de vidro fosco ocupando uma área de 8,7 m^2. As duas portas têm áreas de 5,12 e 1,72 m^2, respectivamente.

Relativamente ao material os portões acima referenciados são em chapa e as portas têm cortinas em tiras de PVC flexível.

A altura do tecto varia entre os quatro e os sete metros, pois este tem o formato de W.

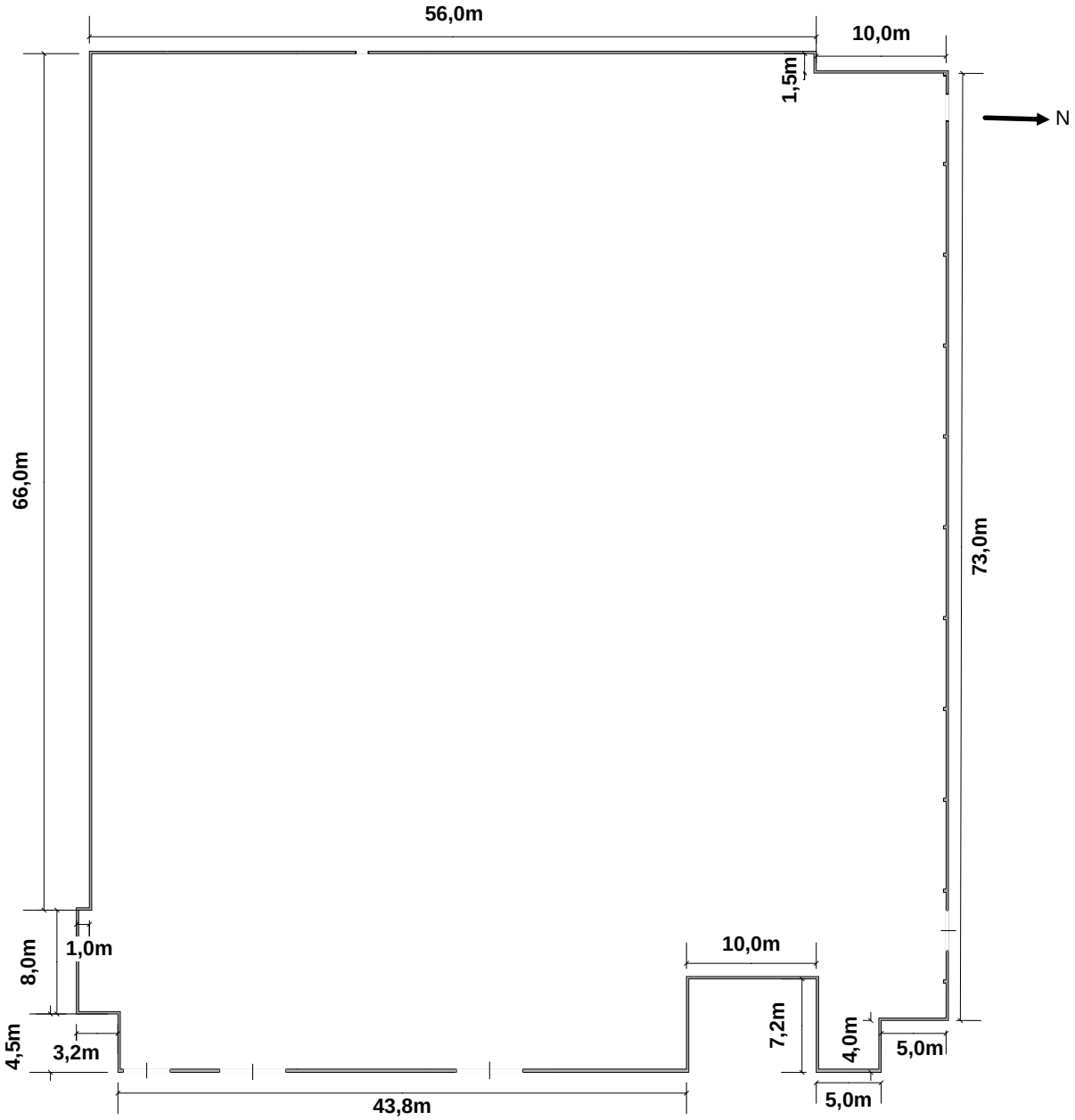


Figura 2.1 - Planta da Olaria

Em seguida é apresentado um esquema que representa o funcionamento da olaria do ponto de vista da formação da peça, desde o abandono da barbotina do tanque, até se transformar em peça cerâmica (figura 2.2).

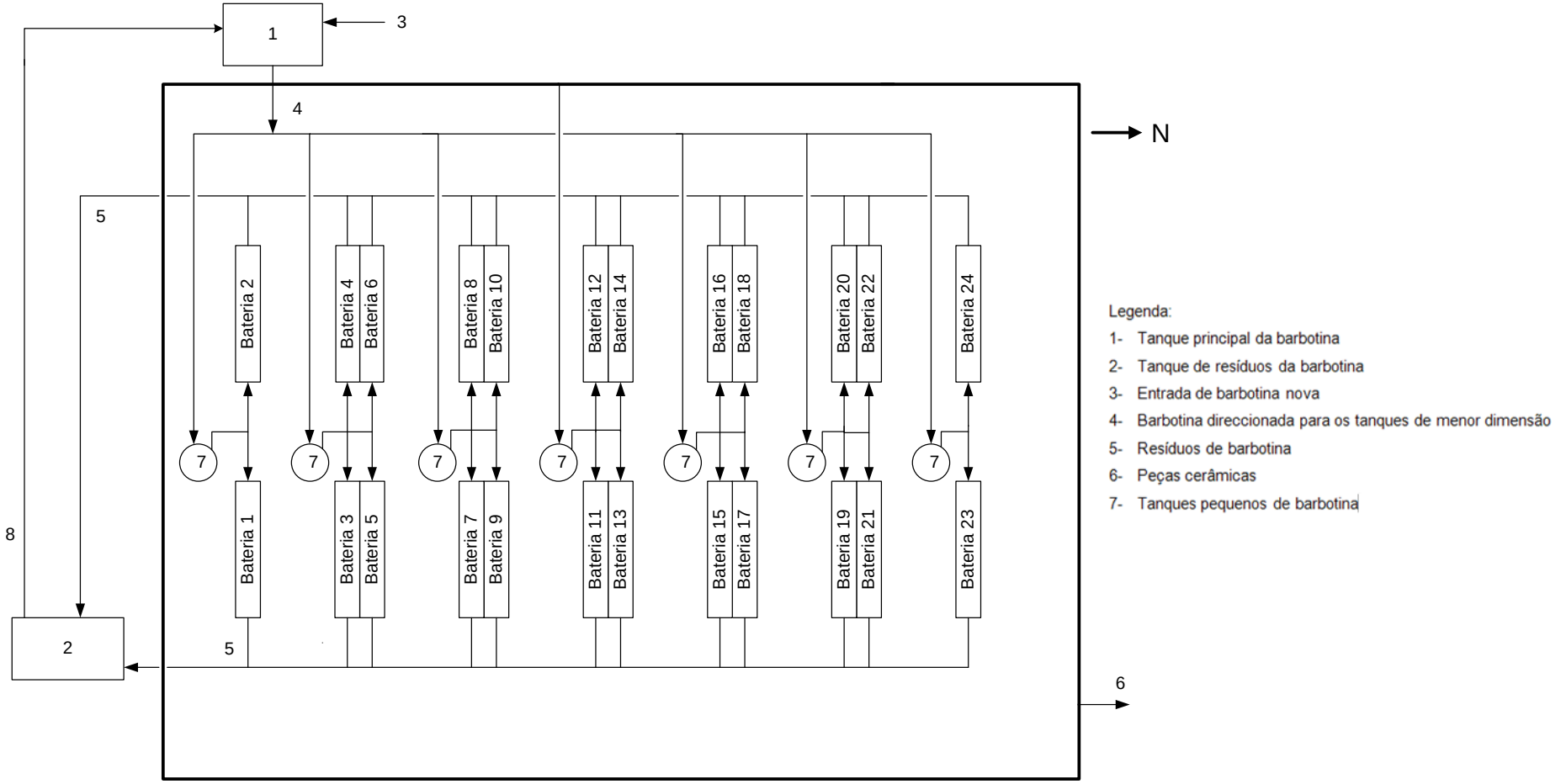


Figura 2.2 - Esquema representativo do circuito da barbotina.

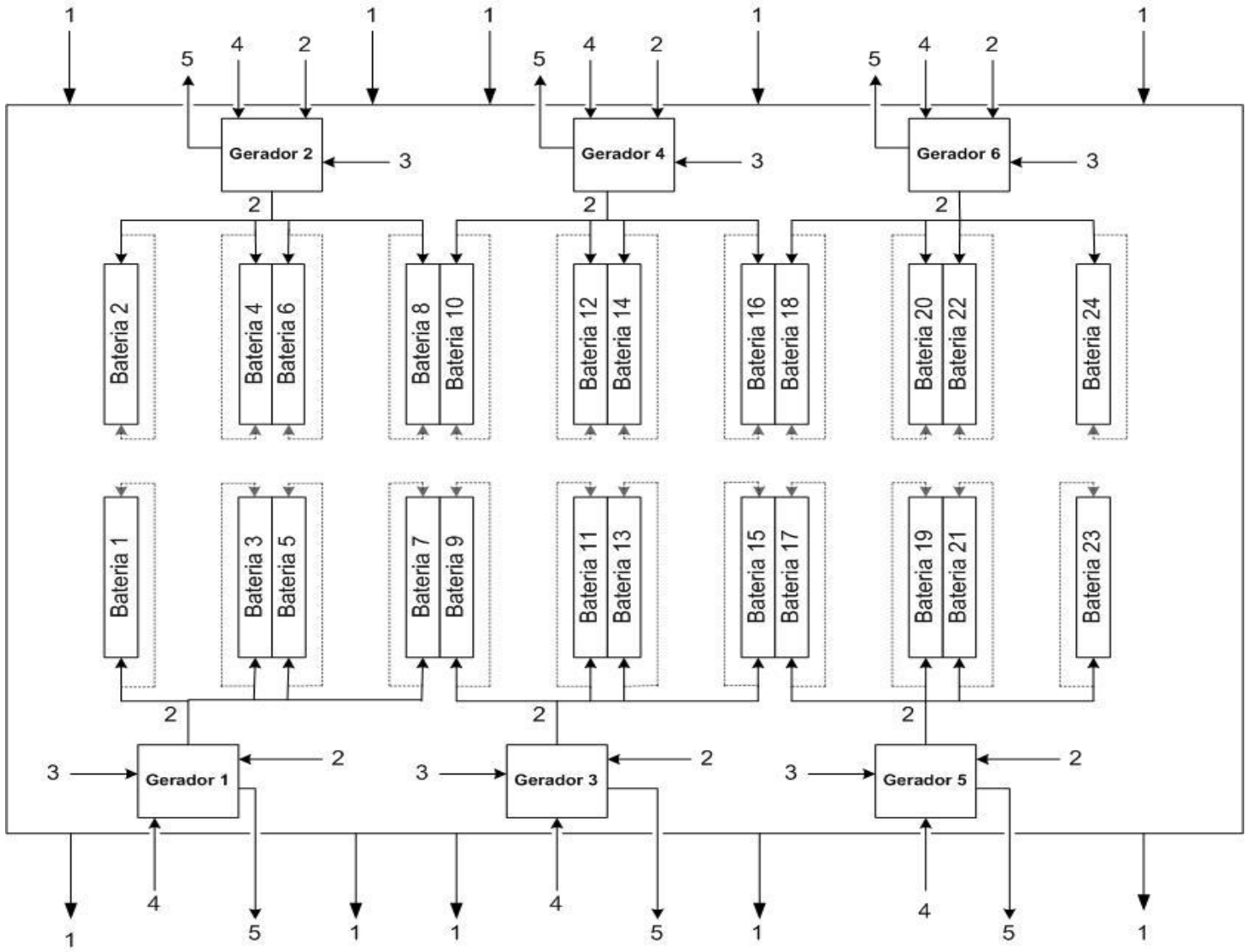
A barbotina encontra-se inicialmente armazenada no exterior da olaria do lado Oeste, sendo depois bombeada para tanques mais pequenos dentro da olaria. De seguida é bombeada para os moldes localizados nas baterias. A bateria é o equipamento onde se encontra um conjunto de moldes podendo estes ter diferentes formas, por isso, e porque diferentes peças têm diferentes tamanhos de molde, a quantidade de moldes por bateria pode variar.

A barbotina depois de estar dentro do molde terá de ganhar espessura, isto é, diminuir a sua humidade até que a peça cerâmica seja manuseável. Consecutivamente os resíduos encontrados nas tubagens são encaminhados para o tanque dos resíduos. De forma a minimizar o desperdício, a barbotina que se encontra no tanque dos resíduos é bombeada para o tanque principal de modo a ser reutilizada, misturando-se com barbotina nova.

A Olaria sob alvo deste estudo, é constituída por 24 baterias de enchimento, contendo ao todo cerca de 1000 moldes instalados. Estes produzem semanalmente cerca de 5000 peças cerâmicas.

A barbotina entra na olaria com uma humidade de 0,32 $kg_{água}/kg_{sólido}$ e as peças cerâmicas saem com uma humidade de 0,08 $kg_{água}/kg_{sólido}$.

Para uma descrição mais detalhada do processo do ponto de vista da climatização, é apresentada a figura 2.3.



Legenda:

1 - Ar ventilado

2 - Ar de alimentação às baterias

3 - Ar de combustão

4 - Gás Natural

5 - Gases de Combustão

Figura 2.3 - Esquema representativo da Olaria do ponto de vista da climatização

A climatização na olaria é realizada através de seis geradores de calor, nos quais o ar ambiente é aquecido e é transportado por condutas de ar até ás maquinas de enchimento onde é forçado a passar pelos moldes existentes nas baterias. Nos geradores de número ímpar (lado Oeste) o ar aquecido é o ar ambiente da olaria, enquanto que nos restantes é o ar proveniente do exterior da olaria.

Cada gerador está ligado a quatro baterias, sendo o ar quente fornecido a uma temperatura de cerca de 60 ºC. O funcionamento dos geradores, é controlado pela temperatura de saída do ar, ou seja, quando o ar atinge os 60ºC o gerador desliga-se e quando este atinge a temperatura mínima volta a ligar-se automaticamente.

O ar quente entra pela parte inferior da bateria pelos seus dois extremos. O ar circula por baixo da estrutura de suporte dos moldes através de uma tubagem perfurada em forma de grelha na zona dos moldes.

As peças cerâmicas depois do processo de moldagem são também armazenadas na olaria de forma a diminuir a sua humidade, só depois são encaminhadas para o secador.

Os geradores instalados na olaria quatro utilizam como fonte de aquecimento a queima de gás natural. A queima é realizada numa câmara de combustão e parte do calor dispendido por esta reacção é usado no aquecimento do ar que vai ser alimentado às baterias. Os gases resultantes da combustão são expelidos através de chaminés para o ar atmosférico pelo tecto da olaria. O ar utilizado na combustão é o ar do interior da olaria, conduzido através de um ventilador associado ao gerador. Os geradores são desligados ao fim-de-semana, o que origina uma inércia térmica relativa ao aumento da temperatura ambiente até à temperatura de trabalho da olaria.

Como em qualquer processo de secagem, o ar utilizado não pode ser sempre o mesmo, daí ser necessário a renovação do ar utilizado. Na olaria quatro a renovação do ar interior é realizada através de dez ventoinhas igualmente divididas pela parede situada a Este e a Oeste. As ventoinhas situadas a Este fazem a extracção do ar enquanto que as restantes fazem a introdução de ar novo, permitindo assim a renovação do ar interior de forma a controlar a humidade na olaria.

Na olaria quatro estão também instaladas, setecentas e trinta e quatro lâmpadas fluorescentes de 58 W. Cada lâmpada têm associado um balastro com uma potência de 11 W. As lâmpadas iluminam o salão, as bancas de enchimento e as bancas de acabamento.

2.2. Especificações dos Equipamentos

Em seguida estão apresentadas as especificações dos equipamentos utilizados na olaria e outros utilizados para medições ao longo do trabalho experimental.

Tabela 2.1 - Características dos equipamentos.

Gerador	
Tipo	TC300
Motor Vent.	5500 W
Potência térmica	349 kW
Ventilador	
Marca	Riello
Modelo	519 M
Potência	150/350 kW
Analisador de gases	
Marca	Anapol
Tipo	EU 200 FL
Termopar de IV	
Marca	E.T.I. LDT
Tipo	TN2
Max. Output	<1mW
Wave length	650 nm
Anemómetro	
Marca	ETI
Modelo	8903
Termo higrómetro	
Marca	ETI
Modelo	8711

2.3. Procedimento

De forma a cumprir os objectivos estabelecidos neste trabalho foi necessário determinar as perdas térmicas da olaria, ou seja, da energia gasta para aquecer o ar ambiente da olaria, quanta é perdida durante o processo de conformação (ciclo de trabalho). Por sua vez houve também a necessidade de saber qual a quantidade de energia aproveitada. Tendo estes objectivos em conta, o procedimento efectuado foi dividido nas seguintes fases:

A. -Estudo das condições processuais

Numa primeira fase foram caracterizadas as etapas de produção das peças cerâmicas. Em seguida foi estudada em maior detalhe a etapa de conformação que decorre

na Olaria número quatro e as condições exigidas pela mesma. Recolheram-se também dados relativos à quantidade de peças cerâmicas moldadas, às humidades da barbotina e das peças, da quantidade de resíduos, entre outros, de modo a ser possível realizar o balanço de massa.

B. -Análise das condições da olaria

Após efectuar o balanço energético e determinar todas as entradas e saídas de energia foi necessário quantificá-las. Numa primeira fase analisaram-se as condições ambientais da olaria de forma a saber se são constantes. Mediu-se a temperatura e a humidade em vários pontos da olaria e do lado exterior Norte e Oeste. Estas medições foram realizadas com um higrómetro. Foram também recolhidos dados relativamente às dimensões e materiais das paredes da olaria, e das condições climatéricas exteriores.

C. Estudo das perdas térmicas pela envolvente

Com base nos dados anteriormente referidos, criou-se uma folha de cálculo para determinar as perdas térmicas ocorridas através das paredes, portas e vidros existentes na olaria.

D. Estudo do funcionamento da ventilação

Realizaram-se medições de velocidades e de dimensões associadas às ventoinhas instaladas na olaria de forma a determinar o caudal de ar e a taxa de renovação do ar. Com estes, foi possível quantificar a energia perdida associada à renovação do ar.

E. Análise do funcionamento dos geradores

De modo a quantificar a principal entrada de energia e a forma como esta é aplicada, estudou-se o funcionamento dos geradores. Deste modo recolheram-se dados relativos ao consumo de gás natural de cada gerador. Analisaram-se os gases de combustão, e os caudais e as temperaturas do ar aquecido.

Recolheram-se também dados relativos à iluminação instalada na olaria e dados referentes à energia solar que entra na olaria através dos vidros de forma a quantificar todas as entradas de energia.

Depois da análise de todas as entradas e saídas de energia, foi possível determinar as principais perdas de energia da olaria e posteriormente sugerir algumas medidas de optimização do consumo energético da mesma.

Capítulo 3

3. Resultados e Discussão

Numa fase inicial são apresentados os resultados relativos a uma primeira abordagem da etapa de conformação ou seja à determinação do seu rendimento efectivo. Seguidamente, o estudo incidiu nas perdas ocorridas, a nível da envolvente, da ventilação, da exaustão de gases e da inércia térmica. Por último, procedeu-se à adopção de medidas de forma a optimizar energeticamente a etapa de conformação.

3.1. Determinação do rendimento efectivo da etapa de conformação

Na análise energética da etapa em estudo é essencial calcular o seu rendimento efectivo. Este foi determinado pela razão entre a quantidade de energia necessária para evaporar a água contida nas peças e nos moldes e a quantidade de energia gasta para a climatização da olaria.

Na contabilização da energia que entra no sistema, teve-se em conta além da energia associada ao gás natural, a energia relativa à iluminação e aos ganhos solares. Embora a principal função destes dois últimos factores não seja aquecer a Olaria, estas fontes de radiação introduzem energia no sistema.

Efectuou-se o cálculo do rendimento tendo como base uma semana de produção (Anexo F). Obteve um consumo de energia de 252235 MJ e um aproveitamento para a secagem das peças e dos moldes de 62389 MJ. Da energia consumida 247236 MJ (98%) referem-se à energia obtida pela queima de gás natural, 384 MJ (0,2%) à energia adquira através dos ganhos solares e 4614 MJ (1,8%) à energia ganha relativa aos dispositivos de iluminação. O rendimento obtido é bastante baixo, ou seja da energia gasta apenas 24,7% é utilizada na evaporação da água. Verificam-se várias condições processuais que impedem que o rendimento seja elevado, nomeadamente, a necessidade de haver renovação do ar interior da olaria, a necessidade de aquecimento de todo equipamento e do ar interior sempre que a produção pára (fim-de-semana).

De forma a optimizar a etapa de conformação e consequentemente aumentar o seu rendimento, numa segunda parte deste capítulo serão estudadas as perdas energéticas ocorridas.

3.2. Perdas térmicas da etapa de conformação

Como referido anteriormente, a olaria encontra-se a uma temperatura superior à exterior, o que envolve um grande consumo energético. Sendo o objectivo minimizá-lo, é necessário identificar as perdas de energia. Com base no funcionamento da olaria e no seu balanço energético e tendo como fronteira os limites da olaria, pode-se dizer que as saídas de energia referem-se: à energia perdida pela envolvente, pelos gases de combustão, pela ventilação e pela inércia térmica. Embora a saída de peças cerâmicas seja considerada uma saída de energia do sistema esta não é descrita como perda.

3.2.1. Perdas térmicas pela envolvente

As perdas térmicas pela envolvente referem-se às perdas ocorridas por condução através das paredes, das portas e dos vidros existentes na Olaria quatro. De modo a que o cálculo destas perdas fosse possível foi necessário realizar-se inicialmente um estudo das condições ambientais da olaria.

3.2.1.1. Estudo das condições ambientais da olaria

Efectuou-se o estudo de modo a determinar se a olaria está a uma temperatura uniforme ou se havia variações de local para local no interior da mesma. Observou-se também a evolução da temperatura ao longo do tempo (ao longo do dia e da semana). No Anexo A estão apresentados os ensaios realizados para o estudo referido. Como há alguma variação na temperatura no interior da olaria esta foi dividida em seis zonas (Anexo A). Cada zona correspondente à área abrangida por cada gerador, ou seja, a zona um é referente à zona abrangida pelo gerador número um, e assim sucessivamente. Na tabela 3.1 são apresentadas as médias das temperaturas e das humidades relativas medidas nas diversas zonas.

Tabela 3.1 - Valores médios de temperatura (T) e humidade relativa (HR).

	T (°C)	HR (%)
Zona 1	30,9	43,7
Zona 2	31,3	40,3
Zona 3	31,5	43,8
Zona 4	31,1	40,5
Zona 5	29,1	48,8
Zona 6	28,7	45,0
Média	30,4	43,7

Numa segunda fase foi efectuado o estudo das condições climatéricas exteriores da olaria. O estudo foi realizado tanto nas zonas viradas para o interior da fábrica como na zona que está virada para o exterior. De modo a determinar as perdas pela envolvente mensalmente foi necessário saber as condições exteriores ao longo do ano. Estas foram retiradas dos boletins meteorológicos para a agricultura e dos boletins de climatologia mensal de 2010 disponibilizados pelo Instituto de Meteorologia.

De forma a saber quais as condições no exterior da olaria, mas no interior da fábrica, foram colocados higrómetros tanto a Norte como a Oeste durante uma semana e depois estes valores foram relacionados com a temperatura exterior de modo a termos um perfil de temperaturas ao longo do ano (Anexo A).

3.2.1.2. Simulação

Com base nos dados referidos anteriormente, elaborou-se uma folha de cálculo para determinar as perdas térmicas ocorridas através das paredes, das portas, dos portões e janelas presentes na Olaria. Consideraram-se constantes as condições no interior da olaria apenas variando as condições externas. Não foram contabilizadas as perdas térmicas através da parede virada a Sul e do chão da Olaria pois ambos estão em contacto com a terra o que diminui as perdas térmicas, (a resistência à transferência de calor é superior). As perdas pelo tecto também foram desprezadas pois este é constituído por uma estrutura dupla e é isolado.

Na folha de cálculo separou-se as perdas térmicas ocorridas por zona da Olaria, e por altura do dia. Toda a elaboração da folha de cálculo e todas as condições e suposições que daí advêm, estão descritas e explicadas no Anexo B.

Na figura 3.1 é possível observar o perfil à variação obtida ao longo do ano. Este comportamento era de se esperar pois em meses de maior frio as perdas térmicas através da envolvente aumentam e vice-versa. Constatou-se também que a energia perdida durante a noite é sempre superior à perdida durante o dia, pois as temperaturas nocturnas são sempre inferiores às temperaturas diurnas.

As perdas térmicas oscilam entre os 21,6 kW no mês de Agosto e os 45,9 kW ocorridos no mês de Janeiro. A figura 3.1 assume que ocorrem perdas no mês de Agosto mas estas não devem ser contabilizadas, pois a fábrica nessa altura encontra-se encerrada, por isso o mês em que ocorre a menor perda de energia é o mês de Julho (22,1 kW).

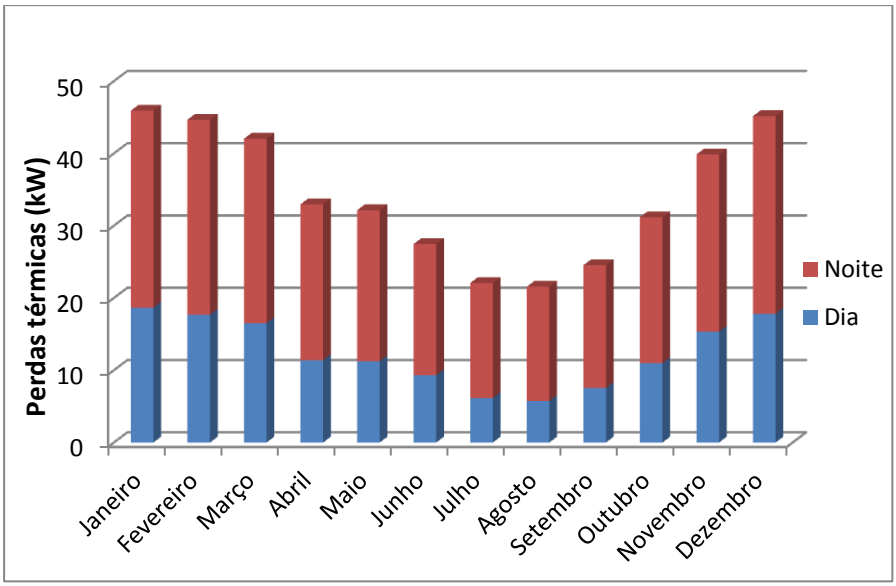


Figura 3.1 - Perdas térmicas mensais ocorridas pela envolvente da Olaria, diferenciadas pela altura do dia.

Analisando a figura 3.2 é possível constatar que a zona onde ocorre a maior perda de energia é na zona cinco, sendo de 12,6 kW. Esta zona tem uma maior área de parede pois está em contacto com o exterior e com o lado Norte da olaria, o que faz com que as suas perdas térmicas sejam superiores às restantes zonas.

As zonas onde se esperariam as maiores perdas de energia seriam as zonas ímpares pois estas estão em contacto com o exterior e também são onde se localizam os portões, o que se verifica na figura 3.2.

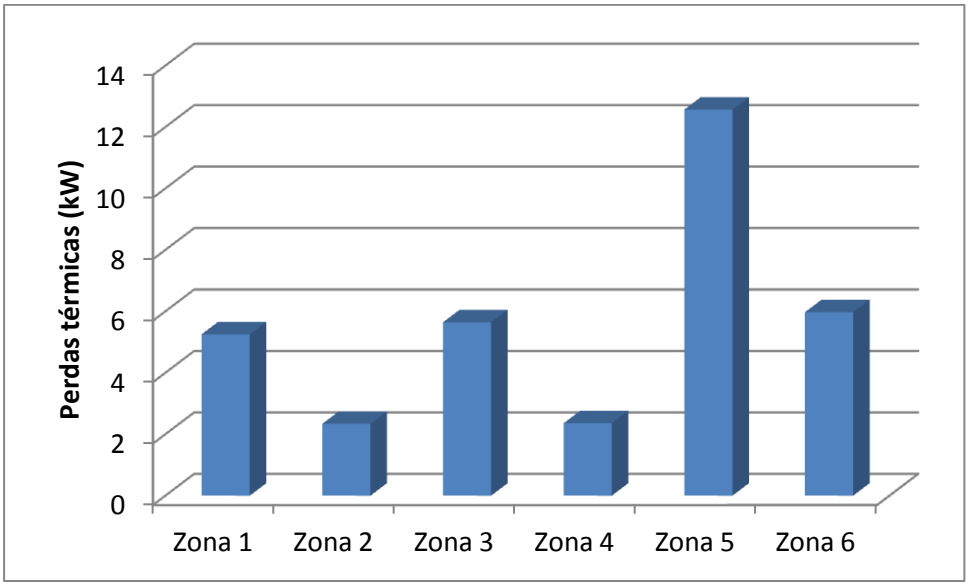


Figura 3.2 - Perdas térmicas médias anuais ocorridas por zona.

Pela figura 3.3 é possível verificar que as zonas ímpares sofrem uma maior variação das perdas ao longo do ano pois estas estão em contacto com o exterior. O perfil das restantes zonas é mais constante pois estão em contacto com o interior da fábrica. As zonas onde ocorrem menos perdas correspondem às zonas quatro e dois, que se encontram sobrepostas na figura 3.3. Como já referido anteriormente, a zona cinco é onde sucede uma maior perda de energia.

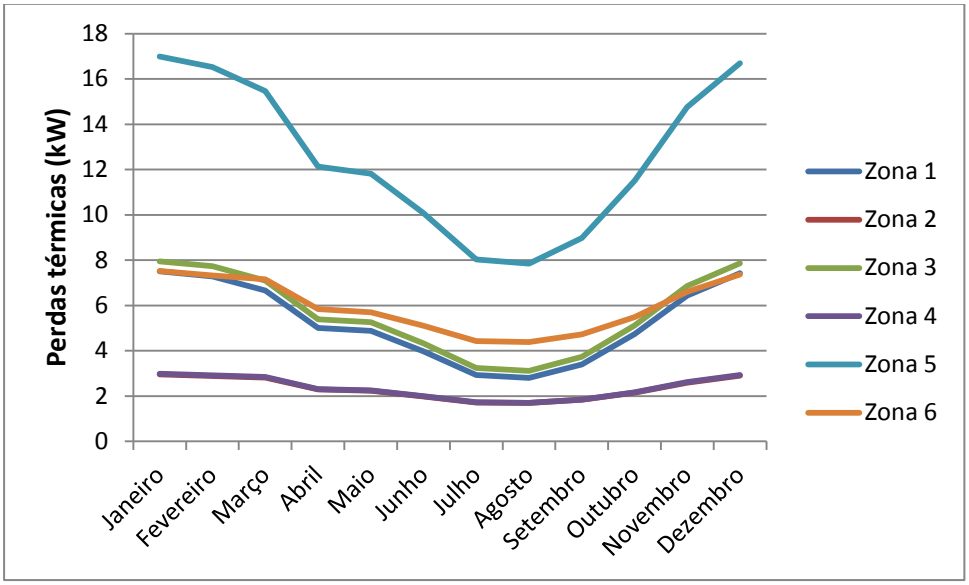


Figura 3.3 - Perdas térmicas ocorridas mensalmente, especificadas por zona

De modo a validar e a fundamentar a simulação realizada, mediram-se as temperaturas das várias paredes da olaria. Registaram-se as temperaturas externas e as internas de modo a ser possível calcular qual a taxa de calor perdida pelas mesmas (Anexo B).

Realizou-se a comparação entre os valores medidos no mês de Fevereiro e os valores resultantes da simulação para esse mesmo mês.

Pode-se dizer que a simulação retrata de forma adequada as perdas ocorridas pela envolvente na olaria. Analisando a tabela 3.2 verifica-se que a maior discrepância de resultados ocorre na zona número cinco, com um desvio de 8,9% o que é claramente aceitável.

Tabela 3.2 - Fluxo térmico perdido por zona, com base na simulação e nas medições efectuadas.

$\dot{Q}$ (W/m^2)	**Zona 1**	**Zona 2**	**Zona 3**	**Zona 4**	**Zona 5**	**Zona 6**	**Total**
Experimental	23,6	11,8	26,3	12,5	30,4	19,7	124,3
Simulação	23,2	11,6	24,0	11,4	33,1	20,4	123,7
Desvio (%)	1,8%	1,6%	8,6%	8,4%	8,9%	3,3%	0,5%

Com base no balanço energético semanal, anteriormente referido, pode-se afirmar que a Olaria perde cerca de 18122 MJ por semana, devido às perdas através da envolvente. Estas perdas correspondem a 7,2% da energia total que entra na olaria.

3.2.2. Perdas térmicas pela exaustão dos gases de combustão

A energia contida nos gases de combustão corresponde àquela que não é aproveitada no gerador para aquecer o ar de circulação da olaria e que é expelida pela chaminé. De modo a quantificar esta energia, foi necessária uma análise detalhada dos geradores em funcionamento.

3.2.2.1. Análise dos Geradores

Na análise do funcionamento dos geradores, começou-se pela determinação da eficiência pelo método directo. O cálculo deste rendimento está descrito no Anexo C.

Da observação da tabela 3.3 é possível verificar que as eficiências obtidas são relativamente baixas, sendo o valor mais elevado de 66,0% correspondente ao gerador número um. Como o cálculo desta eficiência têm em conta a energia gasta e a energia captada, a quantidade de energia captada pelo ar que é aquecido é relativamente baixa quando comparada com a energia gasta de gás natural. Isto poderá dever-se a algumas infiltrações nos geradores ou seja a entrada de ar parasita. Outro motivo para os valores das eficiências serem baixos é a energia perdida através de radiação e convecção dos geradores. Pensa-se que este não deverá ser desprezável pois notou-se um aumento de temperatura à volta dos geradores durante as medições.

Tabela 3.3 – Rendimento dos geradores calculados pelo método directo.

	E_{ar} (kW)	$E_{gás\ natural}$ (kW)	$\eta_{directo}$ (%)
Gerador 1	133,1	201,7	66,0
Gerador 2	174,3	291,7	59,8
Gerador 3	130,6	305,1	42,8
Gerador 4	170,5	295,5	57,7
Gerador 5	142,1	219,3	64,8
Gerador 6	163,7	273,9	59,8

Verificou-se que no funcionamento dos geradores, estes eram controlados através da temperatura de saída do ar, ou seja, o gerador aquecia o ar e desligava-se quanto atingia os 60ºC. Esta forma de funcionar provoca uma diminuição da eficiência, porque pouco

tempo depois do gerador atingir o estado de pleno funcionamento este desliga-se, quando volta a ligar, tem um determinado tempo de arranque em que a eficiência é menor.

A eficiência de combustão também foi analisada porque permite determinar a quantidade de energia associada aos gases de combustão.

Através da análise da combustão de gás natural e com ajuda do analisador de gases de combustão foi possível determinar o excesso de ar usado em cada gerador. Calculou-se ainda a eficiência de combustão (tabela 3.4).

Tabela 3.4 - Dados relativos à eficiência de combustão e excesso de ar dos geradores.

	$E_{gás\ natural}$ (kW)	E_{gases} (kW)	$\eta_{combustão}$ (%)	$Excesso\ de\ Ar\ (\%)$
Gerador 1	201,7	37,0	81,7	103
Gerador 2	291,7	54,3	81,4	148
Gerador 3	305,1	44,5	85,4	52
Gerador 4	295,5	41,2	86,1	43
Gerador 5	219,3	44,3	79,8	112
Gerador 6	273,9	40,5	85,2	53

Pela análise da tabela 3.4 pode-se verificar que todos os geradores funcionam com uma percentagem de excesso de ar elevada, variando de 43% a 148%. Uma quantidade elevada de ar introduzido na combustão vai fazer com que a temperatura da chama diminua, aumentando assim as perdas térmicas pelos gases de combustão.

Relativamente à eficiência de combustão esta apresenta valores na ordem dos 83%, embora seja um valor relativamente elevado, esta eficiência apenas tem em conta, as perdas pelos gases de combustão, por isso se a queima fosse controlada de forma mais proveitosa este valor poderia aumentar. O gerador que exibe a maior eficiência de combustão é o gerador número quatro (86,1%) e o que exibe a menor é o número cinco (79,8%). Recorda-se que esta eficiência não pode ser comparada com a eficiência anteriormente calculada pelo método directo pois, ambas contêm informações diferentes.

Pode-se também verificar pela tabela 3.4 que a energia perdida associada aos gases de combustão de todos os geradores é de 261,8 kW.

Recorrendo-se ao balanço energético semanal realizado, a energia perdida pelos gases de combustão é cerca de 39228 MJ por semana representando cerca de 16% da energia gasta na Olaria.

3.2.3. Perdas térmicas pela ventilação

Como em qualquer processo de secagem térmica é necessário haver uma renovação do ar, pois este começa a ficar saturado ao final de um determinado tempo. Na Olaria quatro a renovação é realizada por dez ventiladores; cinco promovem a entrada de ar novo e os outros cinco a extracção do ar interior. O caudal mássico de renovação de ar é de 4,71 kg/s e o ciclo de renovação da totalidade do ar interior é de 2,3 h. Com base no valor do ciclo de renovação do ar interior pode-se afirmar que este é pequeno, pois o caudal de renovação de ar é elevado relativamente ao volume da Olaria (27222,9 m^3).

A ventilação representa 50222 MJ de perdas térmicas semanais, que correspondem a cerca de 20% da energia consumida na Olaria (Anexo D).

3.2.4. Perdas térmicas pela inércia dos equipamentos

Considerou-se também a inércia térmica inerente ao aquecimento da olaria. Como os geradores são desligados ao fim-de-semana a temperatura da Olaria diminui até à temperatura exterior. No arranque da semana os geradores voltam a ser ligados e há um consumo energético para que todos os componentes da Olaria voltem a estar à sua temperatura normal de trabalho. Este consumo de energia representa cerca de 2% da energia total gasta semanalmente, correspondendo a 4338 MJ.

3.3. Optimização energética da etapa de conformação

Com o intuito de melhorar a eficiência energética de equipamentos e da secção da Olaria, sugerem-se seguidamente algumas medidas relativamente simples e que, pelo reduzido investimento que habitualmente envolvem, devem merecer uma maior atenção.

Todos os cálculos realizados nas medidas de optimização são apresentados no Anexo G.

3.3.1. Medidas simples de manutenção e melhoria do funcionamento da Olaria

Uma das medidas muitas vezes esquecida na indústria é a limpeza e manutenção dos geradores. Esta deve ser realizada periodicamente de modo a minimizar as perdas térmicas. Um dos casos mais frequentes é a formação de fuligem nos geradores. Esta acumular-se-á no interior do gerador diminuindo a eficiência da troca de calor, havendo assim uma maior perda de calor o que implica um maior consumo de combustível. As despesas inerentes à limpeza são normalmente rapidamente recuperadas pela economia de combustível. É de notar que os geradores instalados na Olaria requerem manutenção, pois

alguns têm entradas de ar parasita e necessitam claramente de uma limpeza interior de modo a melhorar o seu funcionamento.

Propõe-se também que sejam aumentadas as gamas de temperatura de funcionamento dos geradores, aumentando assim o tempo de funcionamento e consequentemente, um aumento da eficiência.

Outra medida simples é minimizar o tempo de abertura dos portões. Um tempo de abertura excessivo dos portões provoca perdas de energia significativas, pois ocorre a entrada de ar frio e/ou a exaustão de ar quente. De modo a diminuir estas perdas, a aberturas de portões deve ser reduzida ao mínimo possível. Isto pode ser conseguido através de uma boa gestão das peças que saem e entram na olaria e através da sensibilização dos trabalhadores.

3.3.2. Optimização da queima dos geradores

A optimização da queima dos geradores têm como objectivo diminuir o ar em excesso na combustão, de forma a minimizar as perdas térmicas associadas aos gases de combustão. O excesso de ar deve ser minimizado, mas não pode ser em demasia, pois pode haver o aparecimento de CO e inqueimados. Por isso o excesso de ar deve ser optimizado para uma percentagem onde ocorra a queima completa do gás e ainda se assegure uma margem de segurança adequada.

De acordo com Doty & Turner (2009) considerou-se que a percentagem de excesso de ar óptima era de 10%. Com base neste valor calculou-se novamente as perdas pelos gases de combustão e as novas eficiências de combustão. Pela análise da tabela 3.5 e da tabela 3.4 é possível verificar que houve melhorias de eficiências de quase de 10%. Ao diminuir o excesso de ar, diminuíram-se as perdas relativas aos gases de combustão.

Tabela 3.5 - Eficiência dos geradores após optimização.

	$E_{gás\ natural}$· (kW)	E_{gases} (kW)	$\eta_{combustão}$ (%)
Gerador 1	201,7	21,0	89,6
Gerador 2	291,7	25,6	91,2
Gerador 3	305,1	33,1	89,2
Gerador 4	295,5	32,6	89,0
Gerador 5	219,3	24,2	89,0
Gerador 6	273,9	30,0	89,0

Na tabela 3.6 está apresentada a diminuição dos custos do gás natural num ano, se os geradores funcionarem com uma percentagem de excesso de ar de 10%. Constatou-se que se poupava 26498 Nm^3/ano que correspondem a 8839 €/ano. Esta medida de optimização é bastante viável, pois não existe nenhum investimento, mas sim apenas um controlo das condições de funcionamento do gerador

Tabela 3.6 - Poupança obtida pela optimização da eficiência de combustão

	Consumo 2010		Economizado		Poupança (€/ano)
	$V_{gás\ natural}$ (m^3/ano)	$m_{gás\ natural}$ (kg/ano)	$m_{gás\ natural}$. (kg/ano)	$Vn_{gás\ natural}$ (Nm^3/ano)	
Gerador 1	11403	33414	2950	3565	8839
Gerador 2	21235	62225	6720	8120	
Gerador 3	17868	52359	2188	2644	
Gerador 4	23248	68124	2236	2702	
Gerador 5	17464	51175	5283	6384	
Gerador 6	20351	59635	2551	3083	

3.3.3. Aproveitamento dos gases de combustão

Como os gases de exaustão saem a uma temperatura superior à da Olaria, parte dessa energia ainda pode ser recuperada. A segunda medida visa o aproveitamento de energia dos gases para o aquecimento de ar; este será realizado num permutador de calor construído pela própria empresa. O permutador consistirá simplesmente num tubo que será colocado à volta do tubo da exaustão de gases de combustão. Este permutador irá ser semelhante a um permutador de duplo tubo.

A aplicação desta medida permitirá a produção de ar quente a 33 ºC a um caudal de aproximadamente 250 m^3/h. No cálculo da sua poupança energética considerou-se que este só funcionaria quando o gerador estivesse em funcionamento. A aplicação deste permutador permitia uma poupança de 14582 MJ por ano correspondendo a 119,3 € por ano.

Embora o permutador fosse construído pela própria empresa este tem um custo associado de cerca de 1500 €. Com base no investimento e na poupança obteve-se um retorno de investimento de 12,6 anos. Esta medida não é viável pois tem um tempo de retorno de investimento elevado.

3.3.4. Diminuição da ventilação

Outra medida de optimização proposta é a diminuição da ventilação da olaria. Aumentou-se o ciclo de renovação do ar interior, diminuindo assim o caudal de ventilação utilizado. Aumentou-se o ciclo de renovação de 2,3 h para 5h, o que origina um caudal mássico de ventilação de 1,73 kg/s. A aplicação desta medida resulta numa possível

poupança de 1048945 MJ/ano correspondendo a um valor de 8583 €/ano. Esta medida também é de fácil aplicação e viável pois não é necessário investimento.

A aplicação desta medida deve ser realizada cautelosamente pois ao diminuir a ventilação da Olaria, a humidade vai aumentar, o que pode diminuir a velocidade de secagem e em caso extremo promover a condensação. Por isso, ela deve ser aplicada gradualmente de modo a verificar as alterações provocadas.

3.3.5. Diminuição do volume da Olaria

A última medida proposta é a diminuição do volume da olaria, visando atingir três principais objectivos: a diminuição das perdas através da envolvente, diminuição das perdas associadas à ventilação e um melhor controlo das condições ambientais da Olaria. A olaria tem um tecto em formato de W, ou seja, a altura do tecto varia entre os quatro e os sete metros. A medida visa a diminuição do tecto para os quatro metros, correspondendo a uma diminuição de 6935 m^3 no volume da Olaria. Este processo seria realizado com as placas de isolamento existentes no tecto ou seja, o isolamento passaria a estar na posição horizontal em vez de estar na forma de W.

De forma a manter o ciclo de renovação de ar de 2,3 h, o caudal mássico de ventilação passaria para 2,8 kg/s. Com base na redução do caudal de ventilação obtém-se uma economia de 489762 MJ/ano.

Outra poupança que está inerente a esta medida é a diminuição das perdas pela envolvente, através da diminuição da área de parede (227,4 m^2), traduzindo-se numa poupança de 120462 MJ/ano.

No total esta medida possibilita uma economia de 610224 MJ/ano, que corresponde a 4993 €/ano. Inerente a esta medida está o investimento necessário para a mudança de posição do isolamento do tecto, que ronda os 12000 €. Com base no investimento e na poupança calculou-se o tempo de retorno do investimento, sendo este de 2,4 anos. Esta é viável pois tem um tempo de retorno de investimento relativamente reduzido e ainda permite um melhor controlo das condições ambientais da olaria.

Capítulo 4

4. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

O presente trabalho consistiu na análise da situação energética e sugestão de algumas medidas de optimização da etapa de conformação que ocorre na Olaria número quatro da Fábrica Cerâmica de Valadares, S.A. Para tal mediram-se e recolheram-se dados sobre o funcionamento desta etapa tendo sido posteriormente analisados.

Num estudo inicial determinou-se o rendimento efectivo da Olaria (24,7%) concluindo-se que é necessário determinar as perdas térmicas na Olaria. Estas ocorrem a nível da envolvente, da ventilação, da exaustão de gases e da inércia térmica.

As perdas térmicas pela envolvente referem-se às perdas ocorridas por condução através das paredes, das portas e dos vidros existentes na Olaria quatro. Realizou-se uma simulação na qual se calcularam as perdas térmicas ocorridas pela envolvente ao longo de um ano. As perdas térmicas variam entre os 22,1 kW (Julho) e 45,915 kW (Janeiro). De modo a validar e fundamentar a simulação realizada, comparam-se os valores medidos no mês de Fevereiro e os resultados da simulação para esse mesmo mês, obtendo-se um desvio máximo de 8,9%.

Com base no balanço energético semanal, concluiu-se que a Olaria perde 18122 MJ por semana através da envolvente.

A perda pelos gases de combustão refere-se à energia que não é aproveitada no gerador para aquecer o ar de circulação da olaria e que é expelida pela chaminé. As eficiências dos geradores calculadas pelo método directo são relativamente baixas, variando entre 42,8% (Gerador 3) e 66,0% (Gerador 1).

Foi também determinada a eficiência de combustão, tendo-se obtidos valores de cerca de 83%.

Analisou-se também o ar dos geradores concluindo-se que estes funcionam com percentagem elevadas de excesso (43 a 148%).

Recorrendo-se ao balanço energético semanal conclui-se que as perdas térmicas dos gases de combustão, da ventilação e da inércia térmica correspondem a 39228 MJ, 50222 MJ e 4338 MJ, respectivamente.

Numa última fase sugeriram-se algumas medidas de optimização. A primeira medida visa uma melhoria na manutenção dos geradores promovendo um aumento na gama de temperaturas de funcionamento. Pretende-se ainda minimizar o tempo de abertura dos portões. A segunda medida propõe a diminuição da percentagem de excesso de ar para 10%, o que resultaria numa poupança de 26497 Nm^3/ano de gás natural e 8839 €/ano. Na

terceira medida aconselhou-se a aplicação de um permutador de calor de modo a aproveitar os gases de combustão. Este permitia uma poupança de 14582 MJ correspondendo a 119 € por ano. Verificou-se que esta medida não é viável pois tem um retorno de investimento de 12,6 anos. Na quarta medida propôs-se a optimização da ventilação da Olaria, aumentando-se o ciclo de renovação para 5 h. Esta medida resulta numa poupança de 1048945 MJ/ano e 8583 €/ano. A última medida proposta foi a diminuição do volume da olaria em 6935 m^3. Com esta sugestão obtém-se uma poupança de 4993 €/ano. Inerente a esta medida está um investimento que ronda os 12000 € sendo o tempo de retorno do investimento de 2,4 anos.

Das cinco medidas apresentadas quatro são viáveis e visam um melhor funcionamento da Olaria e uma poupança significativa na factura energética.

Como sugestão para trabalhos futuros aconselha-se uma análise detalhada do consumo de energia eléctrica dos geradores na olaria quarta, assim como, realizar auditorias energéticas às outras olarias da Fábrica Cerâmica de Valadares, S.A.

Referências bibliográficas

Çengel, Y. A. (2003). *Heat Transfer - A practical approach.* McGraW-Hill.

Cerâmica, A. B. (2002). *Associação Brasileira de Cerâmica*. Obtido em 4 de Abril de 2011, de Web site da Associação Brasileira de Cerâmica: http://www.abceram.org.br

Coelho, P., & Costa, M. (2007). *Combustão.* Edições Orion.

Coulson, J. M., & Richardson, J. F. (1989). *Uma Introdução ao projecto em tecnologia química* (Vol. Volume IV). Fundação Calouste Gulbenkian.

Doty, S., & Turner, W. C. (2009). *Energy Management Handbook.* The Fairmont Press Inc.

Fábrica Cerâmica de Valadares. (s.d.). Obtido em 23 de Março de 2011, de Web site da Fábrica Cerâmica de Valadares: http://www.valadares.com

Fontes Vieira, C. M., Feitosa, H. S., & Monteiro, S. N. (2000). Avaliação da Secagem de Cerâmica Vermelha através da Curva de Bigot.

Freire, M. T. (2003). *Seminário, O Gesso Cerâmico.* Cencal.

Gaspar, C. (2004). *Eficiência energética na indústria.* ADENE - Cursosde utilização racional de energia.

Gomes, C. F. (1988). *Argilas, O que são e para que servem.* Fundação Calouste Glubenkian.

INE. (2011). *Indústria e Energia em Portugal 2008-2009.* Instituto Nacional de Estatística.

Jesus, M. F., & Silva, G. F. (2002). Programa para estimativa das propriedades psicométricas. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais* , 63-70.

Oliveira, L. S. (s.d.). Fenômenos de Transporte para Bioengenharia. *Psicometria* . Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG.

Oliveira, M. C., & Maganha Bérnils, M. F. (2008). *Guia Técnico Ambiental da Indústria de Cerâmica Branca e de Revestimento - Série P+L.* CETESB.

Pinheiro, P. C., & Valle, R. M. (1995). Controle de combustão:Otimização do excesso de ar. Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG.

Poling, B. E., Thomson, G. H., Friend, D. G., Rowley, R. L., & Wildind, V. W. (2008). *Perry's Chemical Engineers Handbook.* McGraw-Hill Companies.

R. Norris, S., & Brink Jr., J. A. (1997). *Indústria dos processos químicos* (4ª Edição ed.). Editora Guanabara.

Smith, W. (2000). *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais.* Mc Graw-Hill.

Anexos

A. Condições climáticas

A1. Condições climáticas da olaria

De modo a compreender melhor as condições de climatização da olaria e de forma a saber se estas eram constantes ao longo do espaço e do tempo, realizaram-se três ensaios nos quais se efectuou medições de temperatura e de humidade em vários pontos da olaria

Na figura A.1 – A.4, que são apresentadas seguidamente os quadrados de cor-de-laranja representam a temperatura em graus célsius e os azuis a humidade relativa em percentagem. Estes quadrados estão distribuídos conforme os ensaios realizados na Olaria. Os números referem-se aos geradores instalados na Olaria.

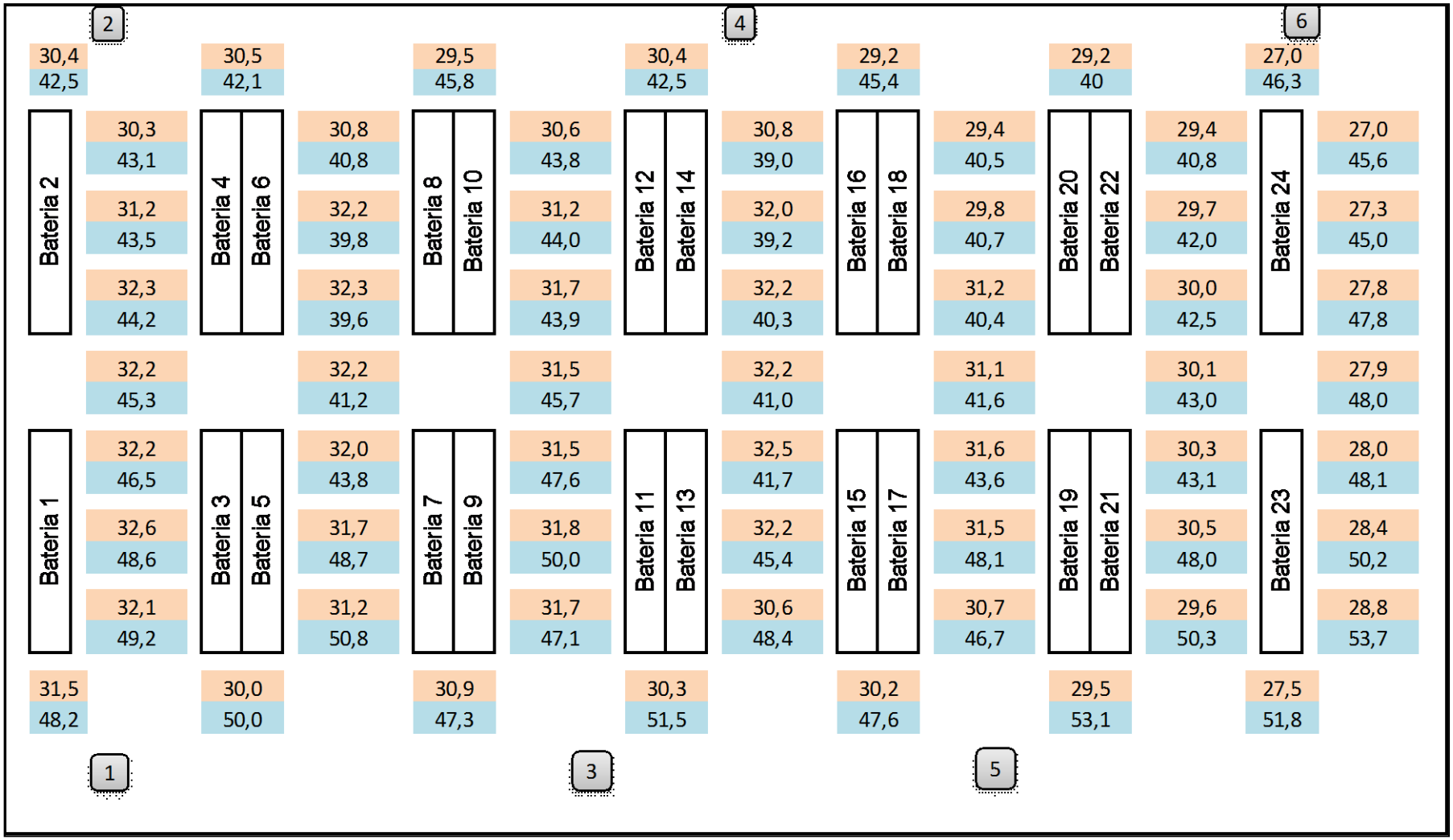


Figura A.1 - Valores das medições realizadas no 1º ensaio das condições ambientais da Olaria.

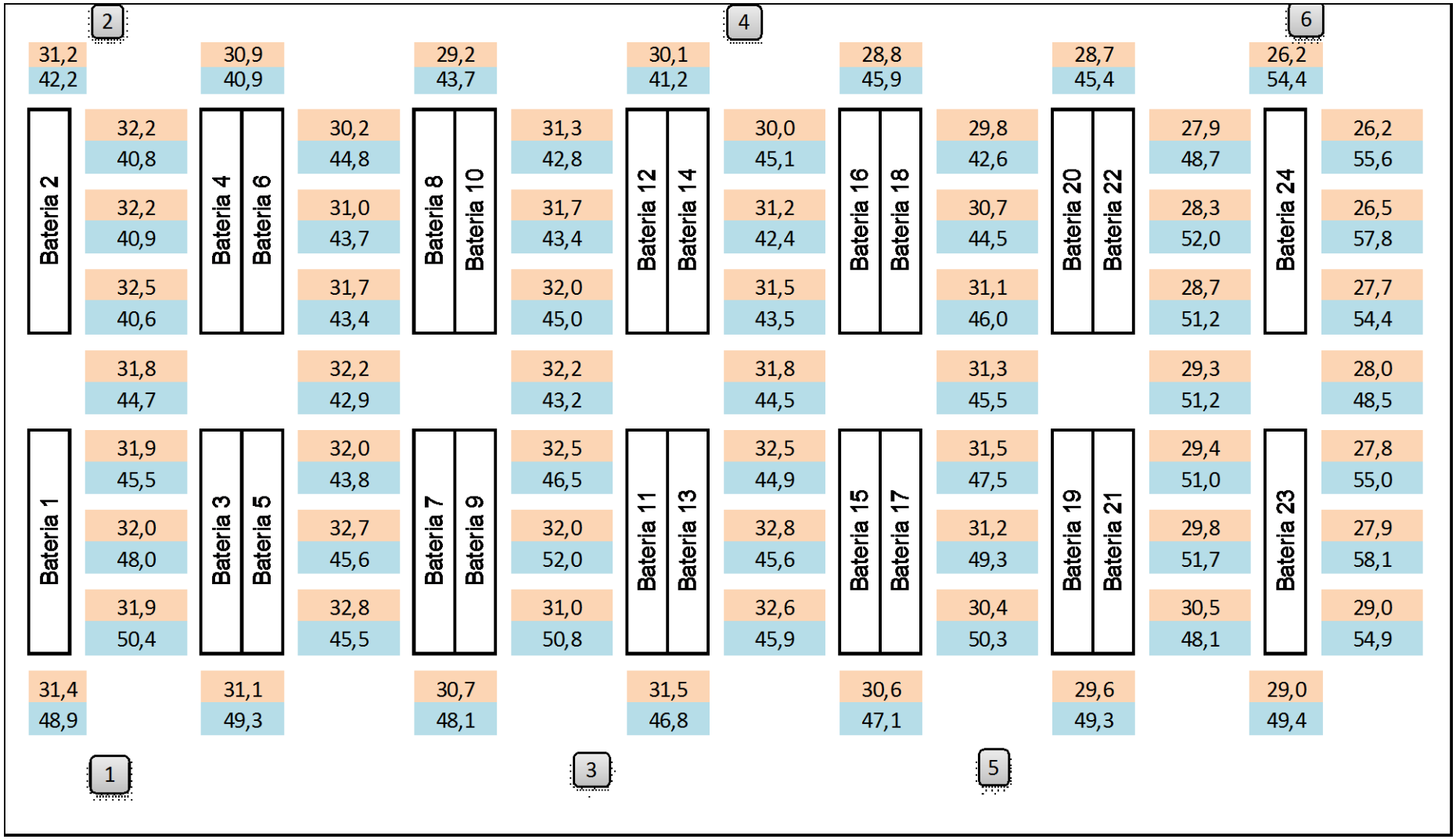


Figura A.2 - Valores das medições realizadas no 2º ensaio das condições ambientais da Olaria.

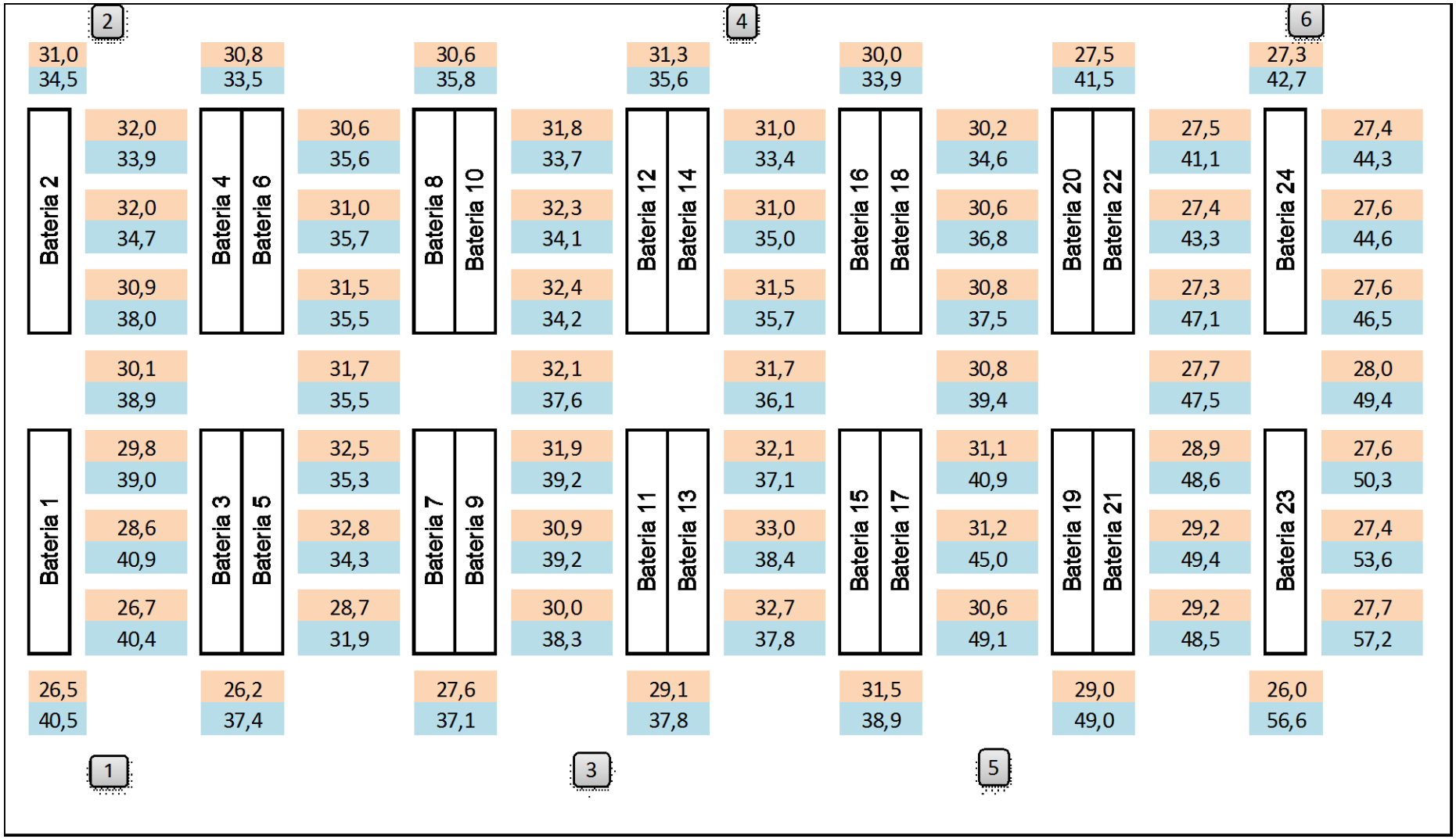


Figura A.3 - Valores das medições realizadas no 3º ensaio das condições ambientais da Olaria.

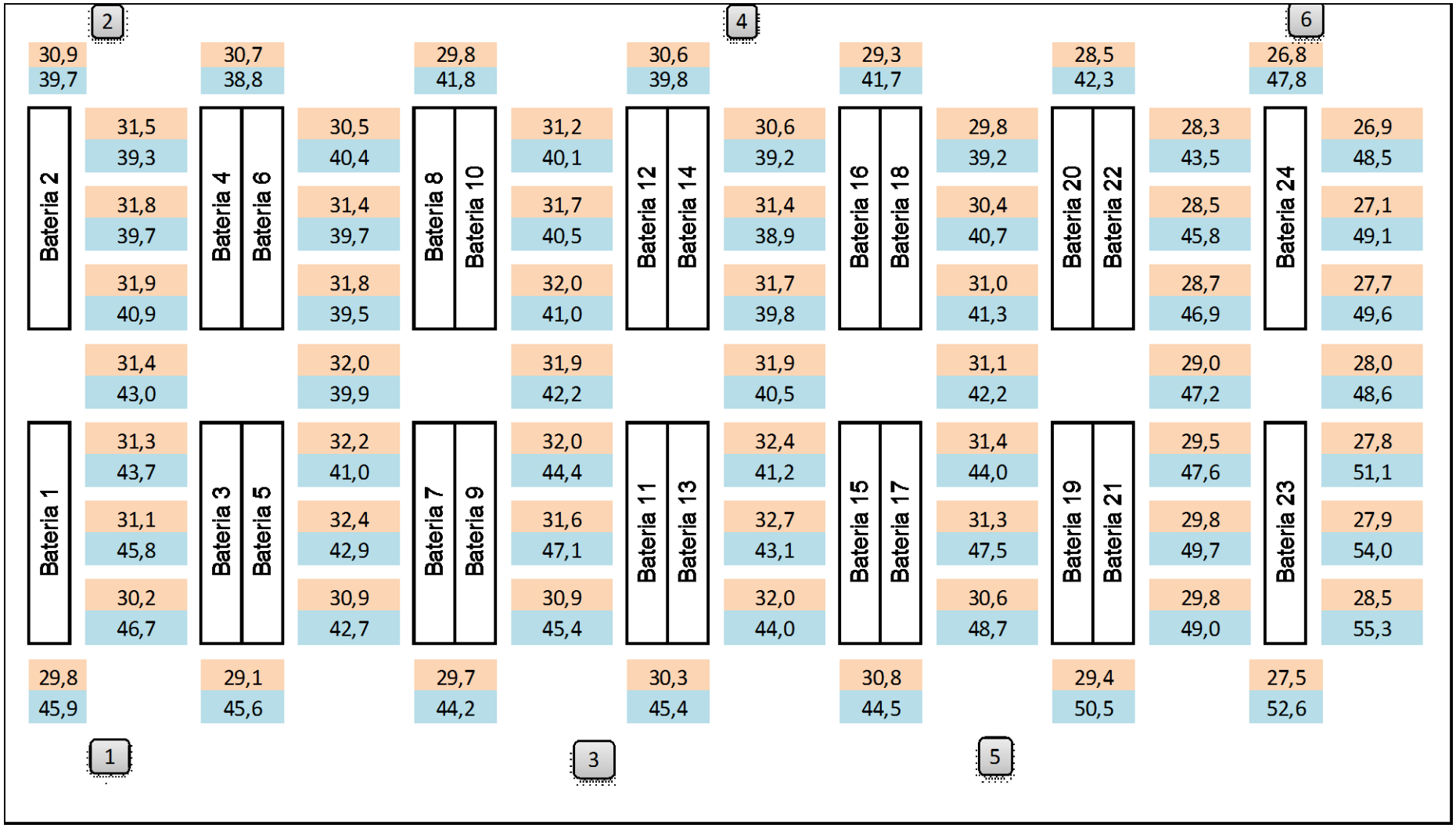


Figura A.4 - Valores da média das medições realizadas, das condições ambientais da Olaria.

Depois de se efectuar as medições, verificou-se que havia alguma variação das condições da Olaria. De modo a diminuir a influência destas diferenças em futuros cálculos dividiu-se a Olaria em seis zonas conforme o representado na figura A.5. Dividiu-se a olaria em seis zonas, cada zona representa o espaço e os moldes abrangidos por cada um dos geradores.

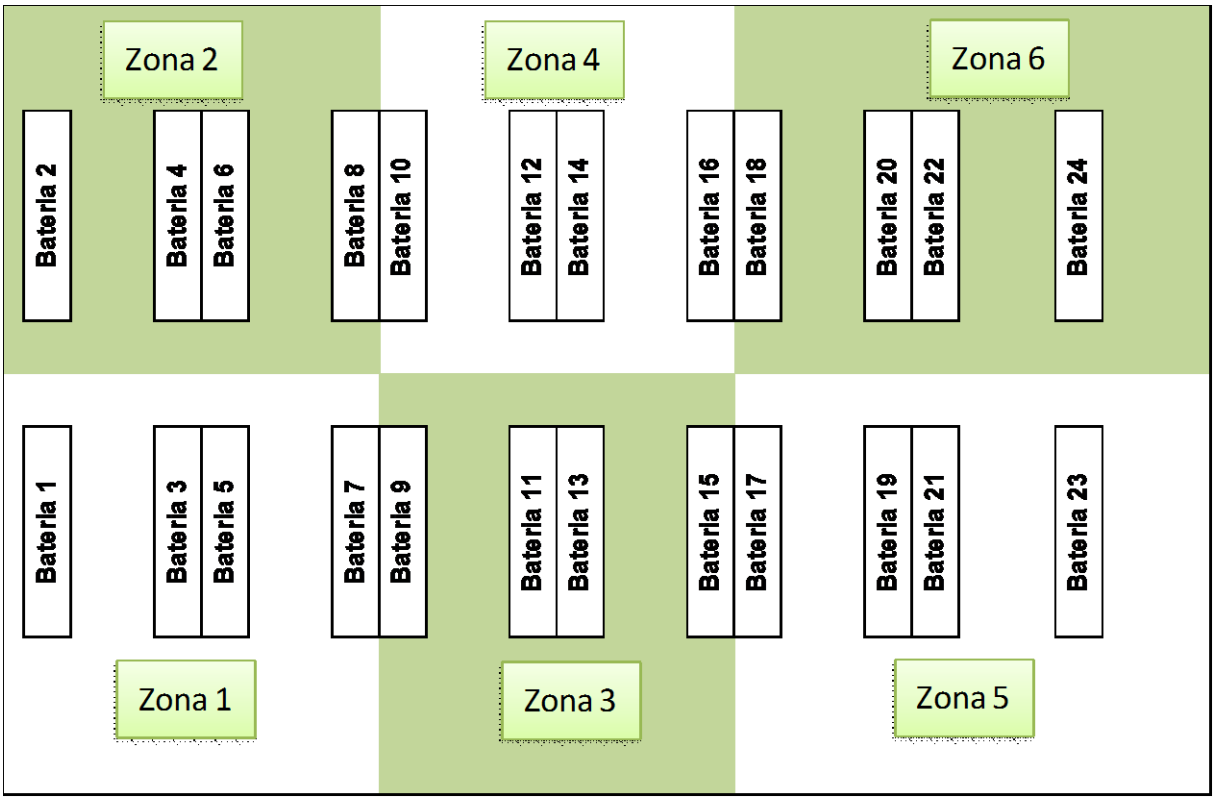


Figura A.5 - Representação da divisão da Olaria por zonas.

Com base na divisão da Olaria por zonas determinaram-se as médias das temperaturas e das humidades, em que estas estão representadas na tabela A.1.

Tabela A.1 - Valores de temperatura e humidade das diferentes zonas.

	T (°C)	HR (%)
Zona 1	30,9	43,7
Zona 2	31,3	40,3
Zona 3	31,5	43,8
Zona 4	31,1	40,5
Zona 5	29,1	48,8
Zona 6	28,7	45,0
Média	30,4	43,7

A2. Condições climáticas do exterior da olaria

As condições do lado exterior da olaria dividem-se em duas partes, a parede a Este que está virada para o exterior da fábrica e as paredes a Norte e a Oeste estão viradas para o interior da fábrica.

De modo a comparar as condições no interior e exterior da olaria foi posto um higrómetro do lado Oeste e do lado Norte no exterior da olaria. Este registou medições durante uma semana de trabalho, de modo a saber a variação da temperatura ao longo do tempo. Isto permitiu verificar a variação de temperatura e ao mesmo tempo compará-la com a temperatura interior da Olaria. As medições na figura A.6 referem-se à semana entre 28/02/2011 e 07/03/2011.

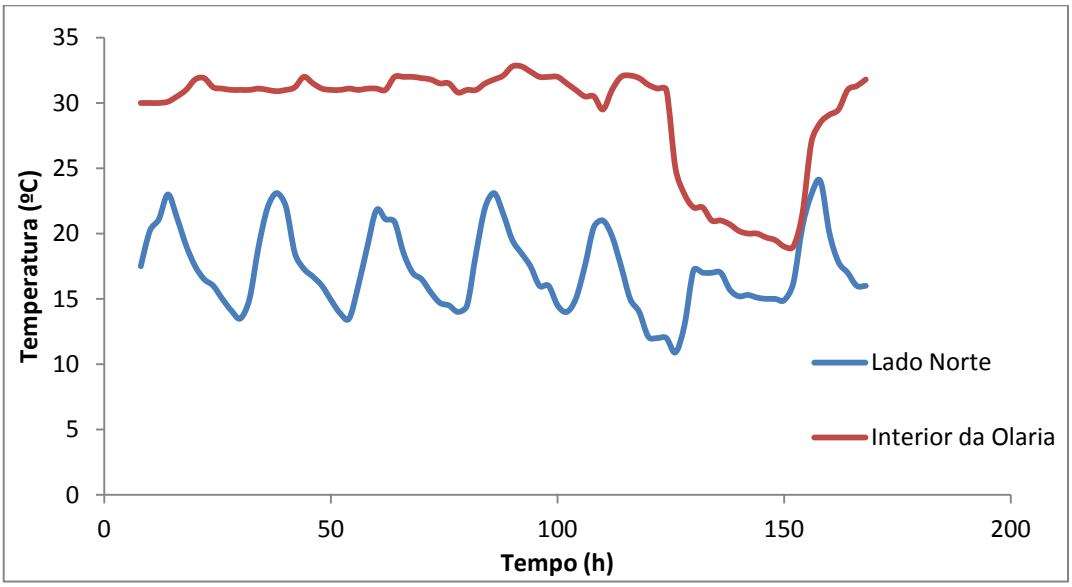


Figura A.6 - Comparação entre as temperaturas do lado Norte e do interior da Olaria.

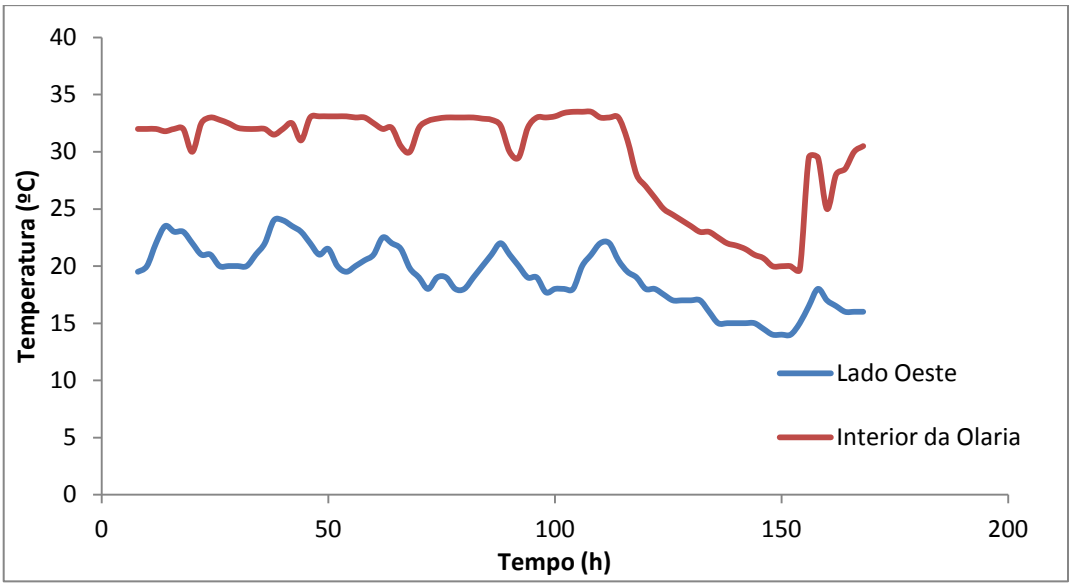


Figura A.7 - Comparação entre as temperaturas do lado Oeste e do interior da Olaria.

Os valores representados na figura A.7 foram medidos na semana de 21/03/2011 até 28/03/2011.

A figura A.6 e A.7 resultaram da recolha de dados retirados das folhas dos higrómetros, De seguida foi definido um período de dia e de noite de modo a obter as temperaturas médias, diurna e nocturna. O período considerado diurno era o das 8h até às 20h e o restante era considerado nocturno.

Estas medições apenas se realizaram nas datas acima referidas, de modo a extrapolar estes dados para o longo do ano, relacionou-se a temperatura do lado Norte e do lado Oeste com a temperatura exterior. De modo a que esta varie consoante o mês que nos encontramos. Aplicou-se a equação A.1 de modo a determinar as temperaturas ao longo do ano.

$$T_{mês} = \left[\frac{\left(\frac{T_{exterior\ mês\ anterior} - T_{exterior\ mês}}{T_{exterior\ mês}} \right)}{4} + 1 \right] \times T_{mês\ anterior} \qquad \text{(A.1)}$$

As condições do exterior foram retiradas da Climatologia Mensal ocorrida no ano de 2010 na estação meteorológica do Porto e dos boletins meteorológicos para a agricultura (tabela A.2)

De modo a retratar melhor a temperatura do ar ambiente externo às temperaturas médias máximas e médias mínimas retratam a temperatura diurna e nocturna nos meses do ano.

Tabela A.2 - Valores da temperatura exterior retirados do Instituto de Meteorologia.

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
T_{diurna}. (ºC)	12,8	13,7	15,3	20,3	20,5	22,6	26,4	26,9	24,6	20,6	16,0	13,7
$T_{nocturna}$. (ºC)	6,4	6,6	8,3	11,3	12,0	14,4	16,6	16,6	15,4	12,4	8,6	6,5
v (m/s)	3,4	3,5	3,9	3,2	3,8	3,3	3,6	2,9	2,9	3,4	3,7	4,3
$HR_{média}$ (%)	79,3%	76,5%	60,3%	63,7%	63,5%	75,0%	77,0%	71,7%	60,0%	69,7%	86,3%	81,3%

Com base nas temperaturas e humidades retiradas do Instituto de Meteorologia e nas medições realizadas durante uma semana, as quais foram extrapoladas para as condições mensais. Calcularam-se as condições do lado Norte e Oeste (tabela A.3 e A.4)

Tabela A.3 - Valores calculados de temperaturas e humidades ao longo do ano do lado Norte.

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
T_{diurna}. (ºC)	19,5	19,8	19,9	21,5	21,6	22,1	23,1	23,2	22,7	21,8	20,5	19,8
$T_{nocturna}$. (ºC)	14,2	14,3	14,6	15,9	16,2	17,0	17,6	17,6	17,3	16,5	15,2	14,3
$HR_{média}$ (%)	38,1%	37,8%	35,1%	35,7%	35,6%	37,2%	37,4%	36,8%	35,3%	36,7%	38,9%	38,3%

Tabela A.4 - Valores calculados de temperaturas e humidades ao longo do ano do lado Oeste.

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
$T_{diurna.}$ (ºC)	21,2	21,6	21,7	23,5	23,5	24,1	25,1	25,3	24,7	23,7	22,4	21,6
$T_{nocturna.}$ (ºC)	18,9	19,0	19,4	21,2	21,5	22,6	23,4	23,4	23,0	21,9	20,2	19,0
$HR_{média}$ (%)	44,7%	44,3%	41,2%	41,8%	41,7%	43,6%	43,9%	43,2%	41,4%	43,1%	45,7%	45,0%

B. Cálculo das perdas térmicas pela envolvente

B1. Realização da folha de cálculo ou simulação

Neste caso é exemplificado o cálculo para uma porção de parede, correspondente à zona 1 em que esta, está virada para o exterior da fábrica.

Com base nas medições representativas de temperatura e humidade da zona 1:

Zona 1

$T_{interior}$ =30,92 ºC=304,07 K

HR=43,74%

P_{atm}=1 atm=101,325 kPa

g =9,807 m/s^2

L=6 m

- Cálculo da humidade absoluta interna

Cálculo da pressão de vapor na saturação com base na equação 1.1.

$$\ln(P_{vs}) = -\frac{7511{,}52}{304{,}07} + 89{,}63121 + 0{,}02399897 \times 304{,}07 - 1{,}1654551 \times 10^{-5} \times 304{,}07^2 - 1{,}2810336 \times 10^{-8} \times 304{,}07^3 + 2{,}0998405 \times 10^{-11} \times 304{,}07^4 - 12{,}150799 \times \ln(304{,}07)$$

$$P_{vs} = 4{,}472\ kPa$$

Cálculo da pressão de vapor, recorrendo-se à equação 1.2.

$$HR = \frac{P_v}{P_{vs}} \Leftrightarrow P_v = HR \times P_{vs} = 0{,}4374 \times 4{,}472 = 1{,}956\ kPa$$

Cálculo da humidade absoluta aplicando-se a equação 1.3.

$$HA = \left(\frac{P_v}{(P - P_v)}\right) = \left(\frac{1{,}956}{(101{,}325 - 1{,}956)}\right) = 0{,}01969\ mol_{água}/mol_{ar\ seco}$$

- Arbitrar $T_{parede\ interior}$

Para calcular o coeficiente pelicular interno foi necessário conhecer a temperatura da parede interior, por isso arbitrou-se um valor.

$T_{parede\ interior}$=25 ºC=298,15 K

- Cálculo das propriedades do ar húmido interno

O cálculo das propriedades do ar foi feito com base na composição molar do ar seco e na sua humidade, estas foram calculadas à temperatura média (equação B.1)

$$T_{Média} = \frac{T_{interior} + T_{parede\ inteior}}{2} = \frac{298{,}15 + 304{,}07}{2} = 301{,}1\ K \quad \text{(B.1)}$$

Os dados utilizados para o cálculo das propriedades dos componentes do ar estão descritos na tabela B.1 (Poling, Thomson, Friend, Rowley, & Wildind, 2008).

Tabela B.1 - Dados para o cálculo das propriedades dos componentes do ar.

	Ar		cp (J/Kmol.K)					μ (Pa.s)			k (W/(m.K)			
Composto	%	MM (g/mol)	C1	C2	C3	C4	C5	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C4
O_2	20,95%	31,999	29103	10040	2526,5	9356	1153,8	1,1010E-06	0,5634	96,30	4,50E-04	0,7456	56,699	
N_2	78,08%	28,013	29105	8614,9	1701,6	103,47	909,79	6,5592E-07	0,6081	54,714	3,31E-04	0,7722	16,323	373,72
H_2O (vapor)		18,015	33363	26790	2610,5	8896	1169	1,7096E-08	1,1146		1,71E-08	1,1146		
Ar	0,934%	39,948	20,786					9,2121E-07	0,60529	83,24	6,33E-04	0,6221	70	
CO_2	0,0379%	44,010	29370	34540	1428	26400	588	2,1480E-06	0,4600	290,0	3,69	-0,3838	964	1860000

Em que:

$$cp = C_1 + C_2 \times \left(\frac{C_3/T}{\sinh(C_3/T)}\right)^2 + C_4 \times \left(\frac{C_5/T}{\cosh(C_5/T)}\right)^2 \quad \text{(B.2)}$$

$$\mu = \frac{C_1 \times T^{C_2}}{1+\frac{C_3}{T}+\frac{C_4}{T^2}} \quad \text{(B.3)}$$

$$k = \frac{C_1 \times T^{C_2}}{1+\frac{C_3}{T}+\frac{C_4}{T^2}} \quad \text{(B.4)}$$

Cálculo do calor específico do O_2 à temperatura média, com base na equação B.2.

$$cp_{O_2} = 29103 + 10040 \times \left(\frac{2526{,}5/301{,}1}{\sinh(2526{,}5/301{,}1)}\right)^2 + 9356 \times \left(\frac{1153{,}8/301{,}1}{\cosh(1153{,}8/301{,}1)}\right)^2 = 29360{,}94 \frac{J}{kmol.K}$$

Efectuou-se o mesmo cálculo para os restantes componentes do ar. De seguida calculou-se o calor específico do ar seco à temperatura média (equação B.3 e B.4).

$$cp_{ar\ seco} = \%O_2 \times cp_{O_2} + \%N_2 \times cp_{N_2} + \%Ar \times cp_{Ar} + \%CO_2 \times cp_{CO_2} \quad \text{(B.5)}$$

$$cp_{ar\ seco} = 0{,}2095 \times 29360{,}94 + 0{,}7808 \times 29127{,}52 + 0{,}00934 \times 20{,}786 + 0{,}000379 \times 37395{,}47 = 28908{,}25 \frac{J}{kmol.K}$$

Cálculo do calor específico do vapor de água à temperatura média, recorrendo-se à equação B.2.

$$cp_{H_2O} = 33363 + 26790 \times \left(\frac{2610{,}5/301{,}11}{\sinh(2610{,}5/301{,}11)}\right)^2 + 8896 \times \left(\frac{1169/301{,}11}{\cosh(1169/301{,}11)}\right)^2 = 33590{,}72 \frac{J}{kmol.K}$$

Cálculo da massa molecular do ar húmido (equação B.6 e B.7).

$$MM_{ar\ seco} = \%O_2 \times MM_{O_2} + \%N_2 \times MM_{N_2} + \%Ar \times MM_{Ar} + \%CO_2 \times MM_{CO_2} \quad \text{(B.6)}$$

$$MM_{ar\ seco} = 0{,}2095 \times 31{,}999 + 0{,}7808 \times 28{,}013 + 0{,}00934 \times 39{,}948 + 0{,}000379 \times 44{,}010 = 28{,}966\ g/mol$$

$$MM_{ar\ húmido} = HA \times MM_{H_2O} + (1 - HA) \times MM_{ar\ seco} \quad \text{(B.7)}$$

$$MM_{ar\ húmido} = 0{,}01969 \times 18{,}015 + (1 - 0{,}01969) \times 28{,}966 = 28{,}75\ g/mol$$

Cálculo do calor específico do ar húmido (equação B.8).

$$cp_{ar\ húmido} = HA \times cp_{H_2O} + (1 - HA) \times cp_{ar\ seco} \quad \text{(B.8)}$$

$$cp_{ar\ húmido} = 0{,}01969 \times 33590{,}72 + (1 - 0{,}01969) \times 28908{,}25 = 29000{,}5 \frac{J}{kmol.K}$$

$$cp_{ar\ húmido} == \frac{29000{,}45}{28{,}75} = 1008{,}7\ \frac{J}{kg.K}$$

Realizou-se o semelhante cálculo para a condutividade e a viscosidade do ar húmido.

$$\mu_{ar\ húmido} = 1{,}8446 \times 10^{-5}\ Pa.s$$

$$k_{ar\ húmido} = 0{,}025630\ \frac{W}{m.K}$$

Cálculo da massa volúmica do ar húmido (equação B.9).

$$\rho = \frac{P \times M_{ar\ h\text{húmido}}}{R \times T} = \frac{1 \times 28{,}75}{0{,}082057 \times 301{,}11} = 1{,}1636\ kg/m^3 \quad \text{(B.9)}$$

Cálculo da viscosidade cinemática do ar húmido (equação B.10)

$$\mu_{cinemática} = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1{,}8446 \times 10^{-5}}{1{,}1636} = 1{,}578 \times 10^{-5}\ m^2/s \quad \text{(B.10)}$$

Cálculo do coeficiente de expansão do ar húmido equação (B.11).

$$\beta = \frac{1}{T} = \frac{1}{301{,}11} = 0{,}003321\ K^{-1} \quad \text{(B.11)}$$

- Coeficiente de convecção interior

Para o cálculo do coeficiente pelicular interior considerou-se que no interior da olaria ocorre convecção natural e foram usadas as correlações empíricas para o caso de convecção sobre uma superfície plana vertical.

Cálculo do Prantdl (equação B.12)

$$Pr = \frac{cp \times \mu}{k} = \frac{1008{,}7 \times 1{,}8446 \times 10^{-5}}{0{,}025630} = 0{,}72122 \quad \text{(B.12)}$$

Cálculo do Rayleigh (equação B.13)

$$Ra_L = Gr_L \times Pr = \frac{g \times \beta \times (T_{interior} - T_{parede\ interior}) \times L}{\mu_{cinemática}{}^2} \times Pr \quad \text{(B.13)}$$

$$Ra_L = \frac{9{,}807 \times 0{,}003321 \times (304{,}07 - 298{,}15) \times 6^3}{1{,}578 \times 10^{-5}{}^2} \times 0{,}72122 = 1{,}6723 \times 10^{11}$$

Cálculo do Nussel, com base na equação 1.25.

$$Nu = \left(0{,}825 + \frac{0{,}387 \times {Ra_L}^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0{,}492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 = \left(0{,}825 + \frac{0{,}387 \times 1{,}6723 \times 10^{11\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0{,}492}{0{,}72122}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2$$

$$Nu = 621{,}67$$

Cálculo do coeficiente de convecção interior, recorrendo-se à equação 1.22.

$$h_{conv.int.} = \frac{Nu \times k}{L} = \frac{621{,}67 \times 0{,}025630}{6} = 2{,}6556 \frac{W}{m^2.K}$$

- Cálculo do fluxo térmico com base no coeficiente pelicular interior, aplicando-se a equação 1.20.

$$\dot{Q}_{conv.int.} = h_{conv.int.} \times \Delta T = 2{,}6556 \times (304{,}07 - 298{,}15) = 15{,}721\ W/m^2$$

$$\dot{Q}_{conv.int.} = \dot{Q}_{int.} = 15{,}721\ W/m^2$$

- Cálculo da Temperatura da parede exterior

Sabendo que a parede a Norte é constituída por tijolos de 15 cm e uma camada de reboco de cada lado com 1,5 cm de espessura, as paredes a Oeste e a Este são idênticas, embora a única diferença é que são constituídas por tijolos de 22cm. Inicialmente calcularam-se as resistências à transferência de calor por condução, com base na equação 1.19.

Reboco

k=1,16 W/(m.K)

Δx=0,03 m

$$R_{reboco} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0{,}03}{1{,}16} = 0{,}0259\ K.m^2/W$$

Tijolo

k=0,77 W/(m.K)

Δx=0,22 m

$$R_{tijolo} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0{,}22}{0{,}77} = 0{,}286\ K.m^2/W$$

$$R_{Total} = R_{tijolo} + R_{reboco} = 0{,}312\ K.m^2/W$$

Sabendo que o calor de convecção interior é igual ao calor de condução recorreu-se à equação 1.18 para calcular-se a temperatura da parede exterior.

$$\dot{Q}_{conv.int.} = \dot{Q}_{condução} = k \times \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$\dot{Q}_{condução} = \frac{\Delta T}{R_{total}} = \frac{(T_{parede\ interior} - T_{parede\ exterior})}{R_{total}}$$

$$T_{parede\ exterior} = T_{parede\ interior} - \dot{Q}_{condução} \times R_{total} = 298{,}15 - 15{,}721 \times 0{,}312$$

$$T_{parede\ exterior} = 293{,}25\ K$$

- Cálculo das propriedades do ar externo

O cálculo das propriedades do ar foi feito com base na composição molar do ar seco e na sua humidade. Calcularam-se as propriedades à temperatura média. Admitiu-se que o ar exterior teria uma temperatura de 15 ºC, uma humidade relativa de 20 % e uma velocidade de 2 m/s.

$$T_{Média} = 290{,}70\ K$$

As propriedades do ar externo à temperatura média foram calculadas de igual modo as propriedades do ar interno.

Cp=1111,4 J/(kg.K)
μ=1,6348*10^{-5} kg/m.s
k=0,020154 W/m.K
ρ=1,1243 kg/m^3
$\mu_{cinemática}$=1,4541*10^{-5} m^2/s
Pr=0,90155

- Cálculo do coeficiente de convecção exterior

Para o cálculo do coeficiente pelicular externo foi considerado que a convecção é forçada e que o escoamento é paralelo sobre superfícies planas. Foram aplicadas diferentes fórmulas empíricas para o cálculo do coeficiente pelicular dependendo do tipo de regime em que estamos a trabalhar, laminar ou turbulento.

Cálculo do número de Reynolds (equação B.14)

$$Re = \frac{\rho \times v \times L}{\mu} = \frac{v \times L}{\mu_{cinemática}} = \frac{2 \times 6}{1{,}4541 \times 10^{-5}} = 833906 \qquad \text{(B.14)}$$

O cálculo do numero de Nusselt foi feito com base na equação 1.23 e 1.24.Como o número de Reynolds é superior ao número de Reynolds crítico que é de 5*10^5, estamos a trabalhar em regime turbulento.

$$Nu = 0{,}037 \times 833906^{0{,}8} \times 0{,}90155^{\frac{1}{3}} = 1934{,}08$$

$$h_{conv.ext.} = \frac{Nu \times k}{L} = \frac{1934{,}08 \times 0{,}020154}{6} = 6{,}4965 \frac{W}{m^2.K}$$

- Cálculo do fluxo térmico por convecção exterior, aplicando a equação 1.20.

$$\dot{Q}_{conv.ext.} = h_{conv.ext.} \times \Delta T = h_{conv.ext.} \times \left(T_{parede\ exterior} - T_{exterior}\right)$$

$$\dot{Q}_{conv.ext.} = 6{,}4965 \times (293{,}25 - 288{,}15) = 49{,}949\ W/m^2$$

- Cálculo do fluxo térmico por radiação exterior, com base na equação 1.26.

$$\dot{Q}_{rad.ext.} = \sigma \times \varepsilon \times \left(T^4{}_{parede\ exterior} - T^4{}_{exterior}\right) = 5{,}67 \times 10^{-8} \times 0{,}9 \times (293{,}25^4 - 288{,}15^4) = 25{,}575\ W/m^2$$

- Cálculo do fluxo térmico total externo (equação B.15)

$$\dot{Q}_{.ext.} = \dot{Q}_{rad.ext.} + \dot{Q}_{conv.ext.} = 25{,}575 + 49{,}949 = 75{,}524\ W/m^2 \qquad \text{(B.15)}$$

Como o fluxo térmico externo não é igual ao fluxo térmico interno teríamos de arbitrar uma nova temperatura da parede interna até os calores se igualarem, se fosse utilizado um método iterativo por aproximação o termo para a nova temperatura da parede interna seria (equação B.16):

$$T_{nova\ parede\ interior} = T_{parede\ interior} - \frac{\dot{Q}_{.ext.} - \dot{Q}_{int.}}{\dot{Q}_{.ext.}} \qquad \text{(B.16)}$$

Na folha de excel criada para o cálculo das perdas térmicas pela envolvente a obtenção da temperatura da parede interior foi determinada com a ajuda do Solver.

B2. Fundamentação da folha de cálculo realizada

De modo a verificar e a fundamentar a simulação realizada, foram medidas várias temperaturas das várias paredes da olaria. Foram medidas as temperaturas externas e as internas de modo a ser possível calcular qual a taxa de calor perdida pelas mesmas

Realizaram-se as medições com a ajuda do termopar de IV o que possibilitou a medição no mesmo ponto tanto na parede interior como exterior.

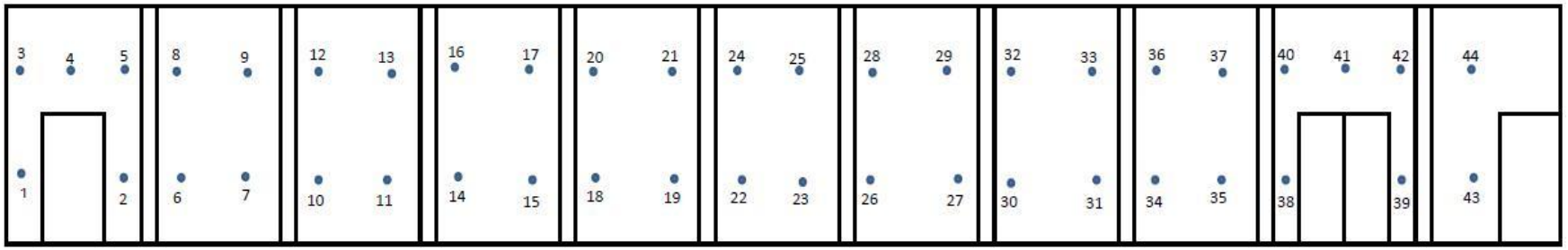


Figura B.1 - Posições das medições realizadas na parede do lado Norte na parte interna.

Tabela B.2 - Valores das temperaturas medidas no lado interno da parede a Norte.

Número	1º Ensaio T (ºC)	2ºEnsaio T (ºC)	Média T (ºC)
1	22,9	23,3	23,1
2	22,7	23,1	22,9
3	22,4	23,4	22,9
4	22,8	23,8	23,3
5	22,6	23,6	23,1
6	23,0	23,4	23,2
7	23,0	23,6	23,3
8	22,5	23,2	22,9
9	22,4	23,2	22,8
10	22,7	23,3	23,0
11	22,0	22,6	22,3
12	22,3	23,0	22,7
13	22,3	22,8	22,6
14	22,2	22,5	22,4
15	22,2	22,4	22,3
16	22,3	22,8	22,6

Número	1º Ensaio T (ºC)	2ºEnsaio T (ºC)	Média T (ºC)
17	22,7	23,2	23,0
18	22,4	23,2	22,8
19	22,9	23,3	23,1
20	22,7	23,3	23,0
21	23,1	23,5	23,3
22	23,0	23,6	23,3
23	23,2	24,0	23,6
24	23,6	24,1	23,9
25	23,7	24,4	24,1
26	23,6	24,6	24,1
27	24,4	24,4	24,4
28	24,1	24,8	24,5
29	24,2	24,5	24,4
30	24,0	24,1	24,1
31	24,4	24,4	24,4
32	24,2	24,6	24,4

Número	1º Ensaio T (ºC)	2ºEnsaio T (ºC)	Média T (ºC)
33	24,2	24,5	24,4
34	24,8	25,9	25,4
35	25,1	26	25,6
36	24,6	25,3	25,0
37	25,0	25,8	25,4
38	23,5	24,3	23,9
39	23,6	24,3	24,0
40	23,9	24,6	24,3
41	24,0	24,7	24,4
42	24,3	25,1	24,7
43	24,2	24,4	24,3
44	23,9	24,1	24,0

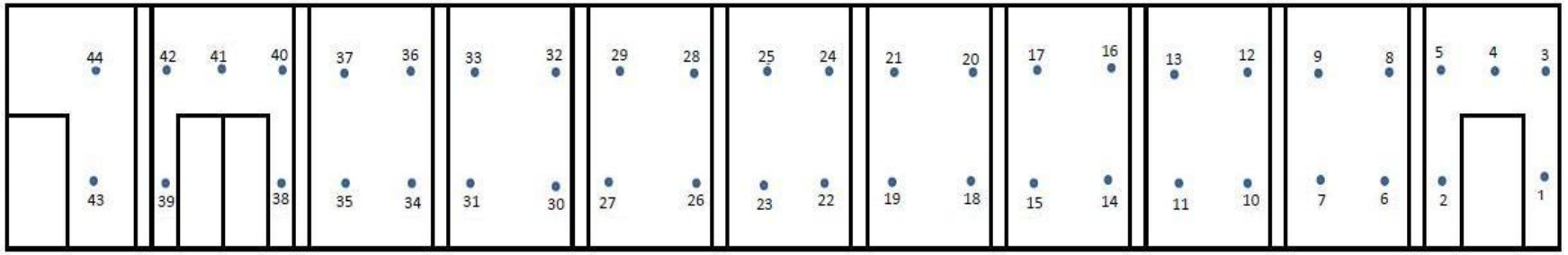


Figura B.2 - Posições das medições realizadas na parede do lado Norte na parte externa.

Tabela B.3 - Valores das temperaturas medidas no lado externo da parede a Norte.

Número	1º Ensaio T (ºC)	2ºEnsaio T (ºC)	Média T (ºC)
1	20,6	20,8	20,7
2	20,8	21,1	21,0
3	20,8	21,2	21,0
4	20,9	21,3	21,1
5	20,8	20,0	20,4
6	21,3	21,4	21,4
7	21,2	21,5	21,4
8	20,8	21,1	21,0
9	20,4	20,7	20,6
10	20,7	20,9	20,8
11	20,5	20,6	20,6
12	20,6	20,9	20,8
13	20,7	21,2	21,0
14	21,3	21,5	21,4
15	21,2	21,4	21,3
16	21,0	21,3	21,2

Número	1º Ensaio T (ºC)	2ºEnsaio T (ºC)	Média T (ºC)
17	21,0	21,3	21,2
18	21,4	21,7	21,6
19	22,1	22,3	22,2
20	21,8	21,9	21,9
21	22,0	22,4	22,2
22	22,3	22,5	22,4
23	22,3	22,7	22,5
24	21,9	22,6	22,3
25	21,7	22,0	21,9
26	22,0	22,5	22,3
27	21,6	22,1	21,9
28	21,4	22,0	21,7
29	21,8	22,3	22,1
30	21,6	22,4	22,0
31	21,8	22,0	21,9
32	21,5	21,9	21,7

Número	1º Ensaio T (ºC)	2ºEnsaio T (ºC)	Média T (ºC)
33	21,4	21,9	21,7
34	21,9	22,3	22,1
35	22,4	22,7	22,6
36	21,6	22,2	21,9
37	22,0	22,4	22,2
38	21,9	22,5	22,2
39	21,6	22,8	22,2
40	21,8	22,5	22,2
41	22,1	22,7	22,4
42	22,0	22,8	22,4
43	22,1	22,8	22,5
44	22,2	23,1	22,7

Sabendo onde ocorre a divisão da Olaria por zonas foi possível determinar as diferenças de temperatura entre o interior e o exterior separando esses valores por zona, de modo a obter o calor transferido por zona.

Tabela B.4 - Valores das diferenças de temperatura para a parede a Norte.

	Número	ΔT (ºC)
Zona 6	1	2,4
	2	2,0
	3	1,9
	4	2,2
	5	2,7
	6	1,9
	7	2,0
	8	1,9
	9	2,3
	10	2,2
	11	1,8
	12	1,9
	13	1,6
	14	1,0
	15	1,0
	16	1,4
	17	1,8
	18	1,3
	20	1,2
	Média	1,8

	Número	ΔT (ºC)
Zona 5	19	0,9
	21	1,1
	22	0,9
	23	1,1
	24	1,6
	25	2,2
	26	1,9
	27	2,6
	28	2,8
	29	2,3
	30	2,1
	31	2,5
	32	2,7
	33	2,7
	34	3,3
	35	3,0
	36	3,1
	37	3,2
	38	1,7
	39	1,8
	40	2,1
	41	2,0
	42	2,3
	43	1,8
	44	1,4
	Média	2,1

Sabendo que a parede a Norte é constituída por tijolos de 15 cm e uma camada de reboco de cada lado com 1,5 cm de espessura, e que as paredes a Oeste e a Este são idênticas embora a única diferença seja a espessura do tijolo que é de 22 cm, foi possível calcular o fluxo de calor através das mesmas

Com base nos dados referidos anteriormente e na condutividade dos materiais foi possível calcular o fluxo de calor através da parede a Norte

Seguidamente apresenta-se um exemplo de cálculo para a parede virada a norte. Numa primeira fase com os dados da constituição da parede e das condutividades (Poling,

Thomson, Friend, Rowley, & Wildind, 2008), foi possível calcular a resistência em função da área. Realizou-se o seu cálculo aplicando-se a equação 1.19.

$$\dot{R}_{reboco} = \frac{L}{k} = \frac{0{,}015}{1{,}16} = 1{,}29 \times 10^{-2} K.m^2/W$$

Na tabela B.5 apresentam-se os valores da resistência em função da área para os diferentes materiais da parede.

Tabela B.5 - Valores de resistência térmica dos materiais da parede a Norte.

	Espessura (m)	k (W/m.K)	R (K.m^2/W)
1-Reboco	0,015	1,16	1,29E-02
2- Tijolo 15	0,150	0,77	1,95E-01
3-Reboco	0,015	1,16	1,29E-02

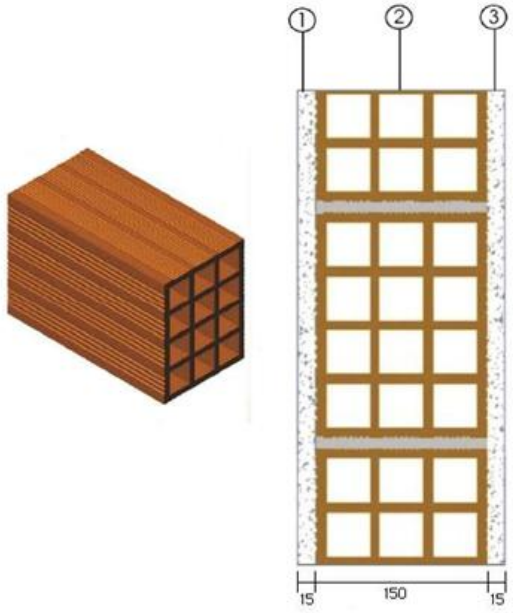


Figura B.3 - Ilustração representativa da parede.

Tendo conhecimento que os materiais se encontram em série, a resistência total á passagem de calor vai ser o somatório das resistências individuais.

$$\dot{R}_{total} = 1{,}29 \times 10^{-2} + 1{,}95 \times 10^{-1} + 1{,}29 \times 10^{-2} = 2{,}21 \times 10^{-1} K.m^2/W \quad \text{(B.17)}$$

Calculou-se o fluxo térmico para a zona seis da parede virada a Norte, recorrendo-se à equação 1.18.

$$\dot{Q}_{condução} = \frac{\Delta T}{\dot{R}_{total}} = \frac{1{,}8}{2{,}21 \times 10^{-1}} = 8{,}13\ W/m^2$$

Tabela B.6 - Valores do fluxo térmico para a parede a Norte.

	Zona 6	Zona 5
R_{total} (K.m^2/W)	2,21E-01	2,21E-01
Q (W/m^2)	8,13	9,55

Analisando a tabela B.6 verificou-se que na parede situada a norte há um fluxo térmico de 8,13 W/m^2 na zona seis e um fluxo de 9,55 W/m^2 na zona cinco.

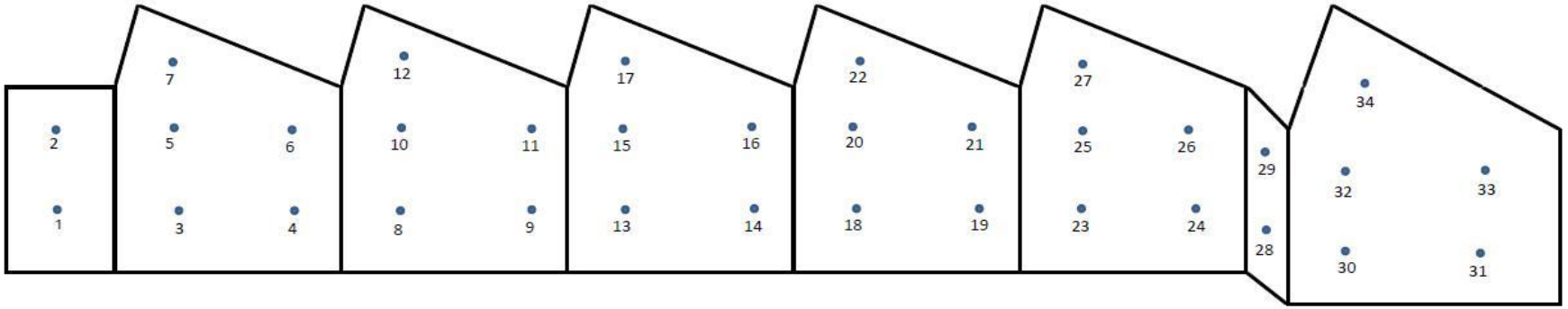


Figura B.4 - Posições das medições realizadas na parede do lado Oeste na parte interna.

Tabela B.7 - Valores das temperaturas medidas no lado interno da parede a Oeste.

Número	1º Ensaio T (ºC)	2ºEnsaio T (ºC)	Média T (ºC)
1	24,1	24,8	24,5
2	24,7	26,1	25,4
3	24,8	27,7	26,3
4	22,6	23,8	23,2
5	26,1	34,0	30,1
6	24,5	25,3	24,9
7	28,0	30,5	29,3
8	22,1	23,2	22,7
9	23,0	22,0	22,5
10	22,0	23,6	22,8
11	22,9	23,9	23,4
12	20,6	22,8	21,7
13	22,8	24,4	23,6
14	25,0	27,0	26,0

Número	1º Ensaio T (ºC)	2ºEnsaio T (ºC)	Média T (ºC)
15	23,7	25,3	24,5
16	24,9	26,9	25,9
17	23,8	25,4	24,6
18	24,4	24,4	24,4
19	22,8	23,3	23,1
20	25,6	25,7	25,7
21	22,9	24,1	23,5
22	25,7	28,0	26,9
23	22,9	24,1	23,5
24	23,0	24,0	23,5
25	22,9	24,3	23,6
26	23,5	25,3	24,4
27	22,5	23,5	23,0
28	29	33,7	31,4

Número	1º Ensaio T (ºC)	2ºEnsaio T (ºC)	Média T (ºC)
29	30,7	31,6	31,2
30	21,4	22,4	21,9
31	20,7	21,6	21,2
32	21,7	22,9	22,3
33	20,8	21,8	21,3
34	21,5	23,2	22,4

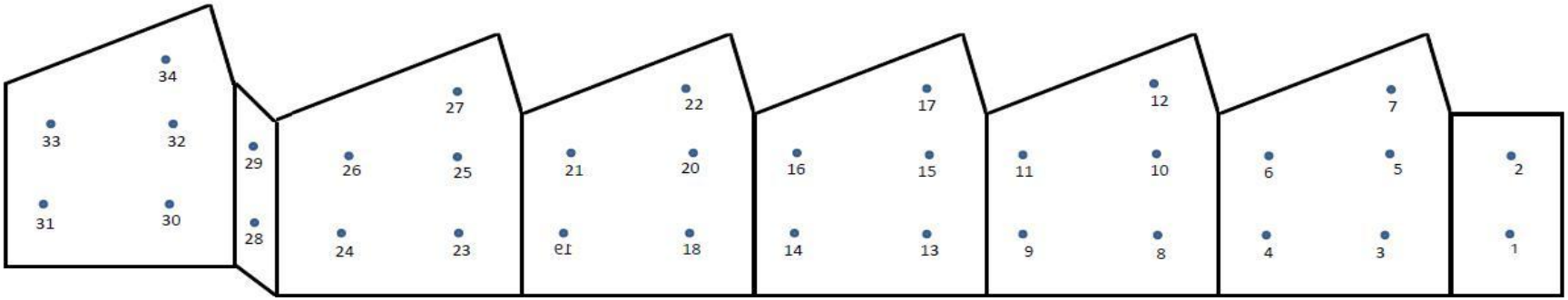


Figura B.5 - Posições das medições realizadas na parede do lado Oeste na parte externa.

Tabela B.8 - Valores das temperaturas medidas no lado externo da parede a Oeste.

Número	1º Ensaio T (ºC)	2ºEnsaio T (ºC)	Média T (ºC)
1	21,4	22,6	22,0
2	20,5	21,9	21,2
3	19,8	21,3	20,6
4	19,4	21,0	20,2
5	20,8	22,2	21,5
6	20,6	21,9	21,3
7	21,4	25,1	23,3
8	20,2	21,6	20,9
9	20,6	21,7	21,2
10	20,7	22,1	21,4
11	20,5	22,3	21,4
12	20,4	22,8	21,6
13	19,2	21,1	20,2
14	19,8	20,8	20,3

Número	1º Ensaio T (ºC)	2ºEnsaio T (ºC)	Média T (ºC)
15	19,9	21,8	20,9
16	20,1	21,8	21,0
17	20,0	22,3	21,2
18	19,6	21,2	20,4
19	19,4	20,9	20,2
20	20,2	21,8	21,0
21	19,2	21,3	20,3
22	20,1	22,2	21,2
23	19,7	20,7	20,2
24	19,5	20,4	20,0
25	20,1	21,1	20,6
26	19,9	21,3	20,6
27	20,0	21,5	20,8
28	20,8	21,3	21,1

Número	1º Ensaio T (ºC)	2ºEnsaio T (ºC)	Média T (ºC)
29	20,9	20,9	20,9
30	20,0	20,8	20,4
31	19,9	20,4	20,2
32	19,8	20,9	20,4
33	19,6	20,2	19,9
34	19,1	21,2	20,2

Tabela B. 9 - Valores das diferenças de temperatura para a parede a Oeste.

	Número	ΔT (ºC)
Zona 2	1	2,5
	2	4,2
	3	5,7
	4	3,0
	5	8,6
	6	3,7
	7	6,0
	8	1,8
	10	1,4
	12	0,1
	Média	3,7

	Número	ΔT (ºC)
Zona 4	9	1,4
	11	2,0
	13	3,5
	14	5,7
	15	3,7
	16	5,0
	17	3,5
	18	4,0
	20	4,7
	22	5,7
	Média	3,9

	Número	ΔT (ºC)
Zona 6	19	2,9
	21	3,3
	23	3,3
	24	3,6
	25	3,0
	26	3,8
	27	2,3
	28	10,3
	29	10,3
	30	1,5
	31	1,0
	32	2,0
	33	1,4
	34	2,2
	Média	3,6

Tabela B. 10 - Valores de resistência térmica dos materiais da parede a Oeste.

	Espessura (m)	k (W/(m.K))	R ($K.m^2/W$)
1-Reboco	0,015	1,16	1,29E-02
2- Tijolo 22	0,220	0,77	2,86E-01
3-Reboco	0,015	1,16	1,29E-02

Tabela B. 11 - Valores do fluxo térmico para a parede a Oeste.

	Zona 2	Zona 4	Zona 6
R_{total} ($K.m^2/W$)	3,12E-01	3,12E-01	3,12E-01
Q (W/m^2)	11,81	12,48	11,61

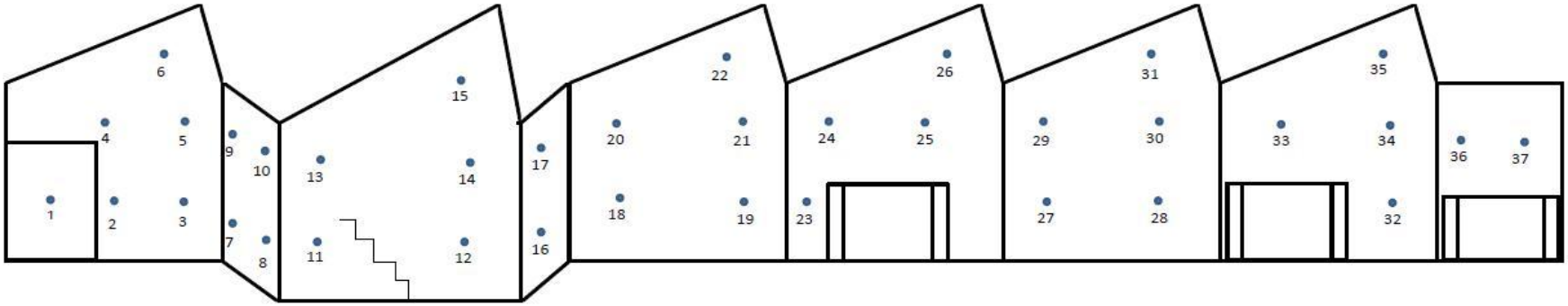


Figura B. 6 - Posições das medições realizadas na parede do lado Este na parte interna.

Tabela B. 12. Valores das temperaturas medidas no lado interno da parede a Este.

Número	1º Ensaio T (ºC)	2ºEnsaio T (ºC)	Média T (ºC)
1	25,0	25,2	25,1
2	23,1	23,9	23,5
3	23,3	23,8	23,6
4	23,4	23,8	23,6
5	23,6	23,9	23,8
6	23,4	23,7	23,6
7	23,6	24,1	23,9
8	23,6	24,3	24,0
9	23,8	24,5	24,2
10	24,4	25,3	24,9
11	27,3	28,5	27,9
12	27,2	27,8	27,5
13	26,6	27,3	27,0
14	28,0	28,7	28,4

Número	1º Ensaio T (ºC)	2ºEnsaio T (ºC)	Média T (ºC)
15	27,7	28,5	28,1
16	26,6	26,9	26,8
17	26,8	27,6	27,2
18	24,1	25,5	24,8
19	23,1	24,7	23,9
20	24,4	24,4	24,4
21	24,8	25,4	25,1
22	25,3	27,5	26,4
23	24,6	25,6	25,1
24	24,5	27,3	25,9
25	22,4	25,7	24,1
26	25,4	27,3	26,4
27	24,0	23,3	23,7
28	23,6	24,4	24,0

Número	1º Ensaio T (ºC)	2ºEnsaio T (ºC)	Média T (ºC)
29	22,4	25,6	24,0
30	23,0	23,3	23,2
31	24,4	24,6	24,5
32	23,1	22,9	23,0
33	23,8	24,6	24,2
34	23,3	23,4	23,4
35	24,4	24,7	24,6
36	24,0	23,9	24,0
37	23,8	23,8	23,8

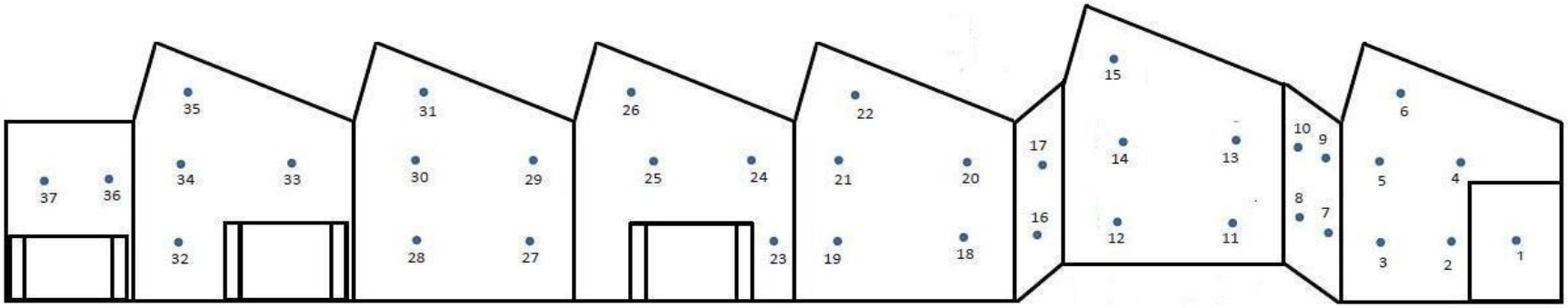


Figura B. 7 - Posições das medições realizadas na parede do lado Este na parte externa.

Tabela B. 13 - Valores das temperaturas medidas no lado externo da parede a Este.

Número	1º Ensaio T (ºC)	2ºEnsaio T (ºC)	Média T (ºC)
1	19,4	20,2	19,8
2	14,0	21,4	17,7
3	14,3	21,6	18,0
4	13,2	20,3	16,8
5	13,4	20,5	17,0
6	10,8	18,1	14,5
7	18,2	20,2	19,2
8	18,3	20,4	19,4
9	18,0	20,3	19,2
10	18,9	20,0	19,5
11	19,1	20,5	19,8
12	18,4	20,7	19,6
13	18,5	20,4	19,5
14	18,7	20,9	19,8

Número	1º Ensaio T (ºC)	2ºEnsaio T (ºC)	Média T (ºC)
15	19,2	21,3	20,3
16	19,4	21,8	20,6
17	21,0	21,7	21,4
18	15,4	22,9	19,2
19	15,3	21,4	18,4
20	15,2	20,7	18,0
21	15,2	20,1	17,7
22	11,1	17,9	14,5
23	15,8	22,2	19,0
24	16,9	18,6	17,8
25	17,3	19,0	18,2
26	10,1	18,4	14,3
27	11,8	19,3	15,6
28	12,1	21,5	16,8

Número	1º Ensaio T (ºC)	2ºEnsaio T (ºC)	Média T (ºC)
29	12,6	18,6	15,6
30	12,6	19,1	15,9
31	13,8	18,3	16,1
32	13,4	18,3	15,9
33	13,8	18,4	16,1
34	14,6	18,8	16,7
35	15,8	18,4	17,1
36	15,3	20,1	17,7
37	12,2	20,0	16,1

Tabela B. 14 - Valores das diferenças de temperatura para a parede a Este.

	Número	ΔT (ºC)
Zona 5	1	5,3
	2	5,8
	3	5,6
	4	6,9
	5	6,8
	6	9,1
	7	4,7
	8	4,6
	9	5,0
	10	5,4
	11	8,1
	12	8,0
	13	7,5
	14	8,6
	15	7,9
	16	6,2
	17	5,9
	18	5,7
	20	6,5
	Média	6,5

	Número	ΔT (ºC)
Zona 3	19	5,6
	21	7,5
	22	11,9
	23	6,1
	24	8,2
	25	5,9
	26	12,1
	27	8,1
	29	8,4
	Média	8,2

	Número	ΔT (ºC)
Zona 1	28	7,2
	30	7,3
	31	8,5
	32	7,2
	33	8,1
	34	6,7
	35	7,5
	36	6,3
	37	7,7
	Média	7,4

Tabela B. 15 - Valores de resistência dos materiais da parede a Este.

	Espessura (m)	k (W/(m.K))	R ($K.m^2/W$)
1-Reboco	0,015	1,16	1,29E-02
2- Tijolo 22	0,220	0,77	2,86E-01
3-Reboco	0,015	1,16	1,29E-02

Tabela B. 16 - Valores do fluxo térmico para a parede a Este.

	Zona 5	Zona 3	Zona 1
R_{total} ($K.m^2/W$)	3,12E-01	3,12E-01	3,12E-01
Q (W/m^2)	20,80	26,26	23,63

Somando os fluxos térmicos por zona e comparando-os com os calculados através da folha de cálculo, pode-se dizer que o desvio entre eles não é significativo.

Tabela B. 17 - Comparação dos fluxos térmicos com base na simulação e na medição experimental.

$\dot{Q}$ (W/m^2)	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Total
Experimental	23,63	11,81	26,26	12,48	30,36	19,74	124,29
Simulação	23,19	11,61	24,02	11,43	33,07	20,39	123,72
Desvio (%)	1,8%	1,7%	8,6%	8,4%	8,9%	3,3%	0,5%

C. Estudo dos geradores

Com o objectivo de determinar os rendimentos e as perdas nos geradores foi necessário realizarem-se várias medições. Numa primeira fase de análise calculou-se o rendimento directo de cada gerador, ou seja da energia associada ao gás natural, quanta realmente passa para o ar que queremos aquecer.

C1. Determinação da eficiência pelo método directo

Na determinação da eficiência pelo método directo foi necessário conhecer a energia associada ao gás natural que entra no gerador e a energia associada ao ar que é aquecido no gerador. Para saber a energia associada ao gás natural foi necessário saber o seu caudal e o seu poder calorífico. Na tabela C.1 está representado o cálculo do consumo de combustível por cada gerador.

Tabela C.1 - Dados dos ensaios realizados para determinar o caudal de gás natural.

		Combustível (m^3)		Tempo (s)	Combustível consumido (m^3)	Caudal de combustível (m^3/s)	
		Início	Fim				
Gerador 1	1º Ensaio	54570,19	54570,67	343,52	0,48	0,00140	0,00139
	2º Ensaio	54570,67	54571,13	332,42	0,46	0,00138	
	3º Ensaio	54571,13	54571,59	332,6	0,46	0,00138	
Gerador 2	1º Ensaio	27357,18	27357,66	237,50	0,48	0,00202	0,00201
	2º Ensaio	27357,66	27358,13	237,67	0,47	0,00198	
	3º Ensaio	27358,13	27358,61	237,33	0,48	0,00202	
Gerador 3	1º Ensaio	62978,36	62978,67	148,64	0,31	0,00209	0,00210
	2º Ensaio	62978,67	62979,01	162,44	0,34	0,00209	
	3º Ensaio	62979,35	62979,68	155,78	0,33	0,00212	
Gerador 4	1º Ensaio	15451,12	15451,77	321,30	0,65	0,00202	0,00203
	2º Ensaio	15451,77	15452,20	214,06	0,43	0,00201	
	3º Ensaio	15452,20	15452,63	208,08	0,43	0,00207	
Gerador 5	1º Ensaio	71987,94	71988,40	303,32	0,46	0,00152	0,00151
	2º Ensaio	71988,88	71989,35	313,73	0,47	0,00150	
	3º Ensaio	71989,35	71989,82	310,74	0,47	0,00151	
Gerador 6	1º Ensaio	32425,36	32425,75	207,83	0,39	0,00188	0,00188
	2º Ensaio	32425,75	32426,10	186,76	0,35	0,00187	
	3º Ensaio	32426,10	32426,47	194,56	0,37	0,00190	

Na tabela C.2 são apresentados os valores dos ensaios realizados de forma a conhecer o caudal de ar aquecido, estas medições foram realizadas nos pontos de entrada de cada bateria como exemplificado na figura C.1.

Tabela C.2 - Dados dos ensaios realizados para determinar o caudal de ar aquecido.

		Gerador 5								Gerador 3							
		1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
1º Ensaio	v (m/s)	9,78	9,56	12,51	13,00	9,11	9,80	10,08	10,85	13,39	10,77	11,13	12,50	8,77	9,61	10,27	10,49
2º Ensaio	v (m/s)	9,84	10,19	11,92	12,77	8,87	9,74	10,17	10,52	13,26	10,55	10,77	12,65	8,78	9,53	10,27	10,41
3º Ensaio	v (m/s)	9,40	10,18	12,44	12,42	9,03	9,56	10,17	10,65	13,45	10,46	10,88	12,42	8,88	9,43	10,10	10,86
4º Ensaio	v (m/s)	9,23	10,45	12,63	12,66	8,98	10,01	10,96	10,63	13,30	10,45	10,52	12,46	9,00	9,74	10,49	10,88
5º Ensaio	v (m/s)	9,79	10,22	12,60	12,44	8,94	9,69	10,02	10,78	13,12	10,42	10,53	12,50	8,97	9,57	10,57	10,73
Média	v (m/s)	9,61	10,12	12,42	12,66	8,99	9,76	10,28	10,69	13,30	10,53	10,77	12,51	8,88	9,58	10,34	10,67
	Área (m^2)	0,0480	0,0480	0,0480	0,0480	0,0480	0,0480	0,0480	0,0480	0,0480	0,0480	0,0480	0,0480	0,0480	0,0480	0,0480	0,0480
Caudal (m^3/s)		0,461	0,486	0,596	0,608	0,431	0,468	0,493	0,513	0,639	0,505	0,517	0,600	0,426	0,460	0,496	0,512
Caudal médio (m^3/s)		4,06								4,16							
		4,11															

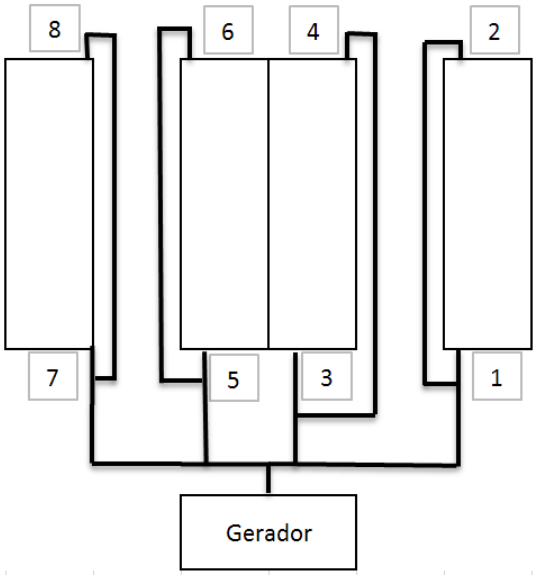


Figura C.1 - Representação dos pontos onde se realizaram os ensaios.

Conhecendo o ar que entra na bateria, sabemos o caudal de ar aquecido, pois é o mesmo, visto que este no gerador só sofre um aquecimento

Com os caudais conhecidos tanto do gás natural como do ar aquecido é possível calcular a eficiência de cada gerador. Neste cálculo assumiu-se que todos os geradores debitam a mesma quantidade de ar, e que este é aquecido até aos 60 ºC, não esquecendo que nos geradores de número ímpar o ar que entra é proveniente do interior da olaria e nos restantes o ar é admitido do exterior. A temperatura e a humidade do ar de entrada para os geradores de número ímpar foi considerada as temperaturas e humidades medidas nas zonas da Olaria e nos de número par foi medida com o higrómetro. Na tabela C.3 são apresentados os valores usados no cálculo do calor associado ao ar.

Tabela C. 3 - Dados usados no cálculo da energia associada ao ar aquecido.

	$\dot{V}_{ar}$ (m^3/s)	$T_{ent.ar}$ (ºC)	$T_{saí.ar}$ (ºC)	$T_{média}$ (K)	ρ_{ar} (kg/m^3)	HR (%)	$HA\ (mol_{água}/mol_{ar\ seco})$	cp_{ar} (J/kg.K)	E_{ar} (kW)
Gerador 1	4,11	30,92	60,0	318,6	1,0894	43,74	0,04424	1023,34	133,1
Gerador 2	4,11	22,40	60,0	314,4	1,1051	51,90	0,04196	1021,78	174,3
Gerador 3	4,11	31,46	60,0	318,9	1,0882	43,82	0,04497	1023,77	130,6
Gerador 4	4,11	23,20	60,0	314,8	1,1033	52,00	0,04298	1022,38	170,5
Gerador 5	4,11	29,06	60,0	317,7	1,0914	48,83	0,04721	1024,95	142,1
Gerador 6	4,11	24,60	60,0	315,5	1,0993	54,20	0,04664	1024,47	163,7

No cálculo do calor associado ao ar considerou-se a humidade do ar. Esta foi tida em conta no cálculo da massa volúmica e no cálculo do seu calor específico, o cálculo de

ambos já foi descrito no Anexo B. O calor associado ao ar foi calculado com base na equação 1.14.

Na tabela C.4 são apresentadas as propriedades do gás natural que são necessárias no cálculo do seu calor libertado.

Tabela C.4 - Propriedades do gás natural alimentado aos geradores.

P (atm)	3,8
T (K)	291,15
$MM_{\text{Gás Natural}}$ (g/mol)	18,550
$PCI_{comb.}$ (MJ/kg)	49,263

O cálculo do poder calorífico e a massa molecular do gás natural apresentam-se no Anexo C.2, considerou-se que o gás natural encontra-se a uma temperatura ambiente de 18ºC.

Tabela C.5 - Resultados do cálculo da energia associada ao gás natural.

	$\dot{V}_{gás\ natural}$ (m^3/s)	$\rho_{gás\ natural}$ (kg/m^3)	$\dot{m}_{gás\ natural}$ (kg/s)	$E_{gás\ natural}$ (kW)
Gerador 1	0,00139	2,9505	0,004095	201,7
Gerador 2	0,00201		0,005922	291,7
Gerador 3	0,00210		0,006193	305,1
Gerador 4	0,00203		0,005998	295,5
Gerador 5	0,00151		0,004452	219,3
Gerador 6	0,00188		0,005559	273,9

O cálculo do calor associado ao combustível foi realizado com base na equação 1.11, e o calor referente ao calor sensível existente no gás natural foi desprezado.

Dividindo a energia associada ao ar pela energia associada ao gás natural foi possível determinar a eficiência (tabela C.6).

Tabela C.6 - Valores da eficiência directa dos geradores.

	E_{ar} (kW)	$E_{gás\ natural}$ (kW)	η (%)
Gerador 1	133,1	201,7	65,98
Gerador 2	174,3	291,7	59,77
Gerador 3	130,6	305,1	42,79
Gerador 4	170,5	295,5	57,69
Gerador 5	142,1	219,3	64,79
Gerador 6	163,7	273,9	59,78

C2. Análise da combustão

De modo a calcular o excesso de ar em cada gerador foi necessário perceber o processo de combustão. Na tabela C.7 é apresentada a composição volumétrica do gás natural da Argélia que é o utilizado nos geradores (Coelho & Costa, 2007).

Tabela C.7 - Dados da composição do gás natural.

Gás Natural (Argélia)			
Composição Química (% vol)			MM (g/mol)
Metano	CH_4	87,0%	16,04
Etano	C_2H_6	9,0%	30,07
Azoto	N_2	0,2%	28,01
Propano	C_3H_8	2,7%	44,10
Butano	C_4H_{10}	1,1%	58,12

Conhecendo a sua composição e a massa molecular de cada composto, calculou-se a massa molecular do gás natural, sendo esta de 18,55 g/mol. As equações que se seguem são relativas à queima de cada composto.

$$CH_4 + 2(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 7{,}52N_2 \quad \text{(C.1)}$$

$$C_2H_6 + 3{,}5(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O + 13{,}16N_2 \quad \text{(C.2)}$$

$$C_3H_8 + 5(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O + 18{,}8N_2 \quad \text{(C.3)}$$

$$C_4H_{10} + 6{,}5(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O + 24{,}44N_2 \quad \text{(C.4)}$$

$$C_5H_{12} + 8(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 5CO_2 + 6H_2O + 30{,}08N_2 \quad \text{(C.5)}$$

De seguida foi criada a tabela C.8 onde foi possível calcular os produtos de combustão sabendo assim o seu caudal ou a sua percentagem.

Os valores apresentados na tabela C.8 foram calculados com base na razão entre as quilomoles de componente por quilograma de gás natural, sendo assim os valores que se encontram na coluna correspondente à quantidade necessária, também têm as mesmas unidades. Os factores multiplicativos foram retirados das equações de combustão.

Tabela C.8 - Tabela de combustão.

Combustível			Comburente				Produtos de Combustão						
Componentes	%(volume)	$\left(\frac{kmol_{componente}}{kg_{gás\ natural}}\right)$	Factor multiplicador		Necessário		Factor multiplicador			Necessário			
			O_2	Ar	O_2	Ar	CO_2	H_2O	N_2	CO_2	H_2O	N_2	O_2
CH_4	87,0%	4,69E-02	2	9,52	9,38E-02	4,47E-01	1	2	7,52	4,69E-02	9,38E-02	3,53E-01	
C_2H_6	9,0%	4,85E-03	3,5	16,67	1,70E-02	8,09E-02	2	3	13,16	9,70E-03	1,46E-02	6,39E-02	
N_2	0,2%	1,08E-04										1,08E-04	
C_3H_8	2,7%	1,46E-03	5	23,81	7,28E-03	3,47E-02	3	4	18,8	4,37E-03	5,82E-03	2,74E-02	
C_4H_{10}	1,1%	5,93E-04	6,5	30,95	3,85E-03	1,84E-02	4	5	24,44	2,37E-03	2,97E-03	1,45E-02	
		Total teórico			1,22E-01	5,81E-01				6,33E-02	1,17E-01	4,59E-01	
		Excesso de ar			10%								
		Teório + excesso de ar			1,34E-01	6,39E-01				6,33E-02	1,17E-01	4,53E-01	1,22E-02
		Real (Teórico+Exc. Ar+Humidade)			1,34E-01	6,39E-01				6,33E-02	8,40E-01	4,53E-01	1,22E-02
								% (base seca)		12,0		85,7	2,3
										CO_2	H_2O	N_2	O_2

Na tabela C.9 são apresentadas as considerações feitas para o ar de combustão, na elaboração da tabela C.8. O ar foi considerado à temperatura e à humidade existentes no interior da Olaria, pois o ar de combustão é ventilado no interior da mesma.

Tabela C.9 - Propriedades do ar de combustão.

Ar					
O_2 %	N_2 %	MM (g/mol)	HR (%)	T (K)	$HA\ (mol_{água}/mol_{ar\ seco})$
0,21	0,79	28,97	49,08	314,12	0,03909

Com base no PCS e no PCI de cada componente calculou-se o PCS e o PCI do gás natural e a sua massa volúmica à temperatura ambiente e à pressão atmosférica (Coelho & Costa, 2007).

Tabela C.10 - Propriedades dos compostos do gás natural.

Gás Natural (Argélia)								
Composição Química (% vol.)			MM (g/mol)	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	ρ (kg/m^3)	PCS (MJ/m^3)	PCI (MJ/m^3)
Metano	CH_4	87,0%	16,04	55,528	50,016	0,667	37,033	33,357
Etano	C_2H_6	9,0%	30,07	51,901	47,489	1,250	64,879	59,364
Azoto	N_2	0,2%	28,01			1,165		
Propano	C_3H_8	2,7%	44,10	50,368	46,357	1,833	92,333	84,980
Butano	C_4H_{10}	1,1%	58,12	49,546	45,742	2,416	119,718	110,526

Tabela C.11 - Poder calorífico do gás natural.

Gás Natural (Argélia)				
ρ (kg/m3)	PCS		PCI	
	MJ/m3	MJ/kg	MJ/m3	MJ/kg
0,769	41,868	54,458	37,874	49,263

Conhecendo o mecanismo da queima de gás natural procedeu-se à recolha de dados dos geradores instalados. Mediu-se a percentagem de cada componente dos gases de combustão, com o analisador de gases. Os resultados estão apresentados na tabela C.12.

Tabela C.12 - Dados experimentais e calculados dos ensaios realizados na análise dos gases de combustão.

	Gerador nº 1		Gerador nº 2		Gerador nº 3		Gerador nº 4		Gerador nº 5		Gerador nº 6	
	1º Ensaio	2º Ensaio	1º Ensaio	2º Ensaio	1º Ensaio	2º Ensaio	1º Ensaio	2º Ensaio	1º Ensaio	2º Ensaio	1º Ensaio	2º Ensaio
T_{Gases} $(°C)$	169	170	130	143	181	172	180	180	180	179	178	180
$T_{ambiente}$ $(°C)$)	33	33	33	34	33	33	32	33	32	32	29	29
$(T_{Gases} - T_{ambiente})$ $(°C)$	136	137	97	109	148	139	148	147	148	147	149	151
O_2 (%)	11,7	11,7	13,7	13,8	7,9	7,9	6,9	6,8	12,2	12,2	8,0	7,9
CO_2 (%)	5,3	5,3	4,2	4,1	7,5	7,5	8,0	8,1	5,0	5,0	7,4	7,5
CO (mg/m^3)	1	1	0	0	0	0	4	9	113	121	0	0
NO_2^+ (mg/m^3)	74	77	36	38	83	87	82	87	2	3	97	75
SO_2 (mg/m^3)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ρCO (kg/m^3)	0,772	0,770	0,846	0,820	0,751	0,766	0,753	0,753	0,753	0,755	0,756	0,753
%CO	0,00013	0,00013	0	0	0	0	0,00053	0,00120	0,0150	0,0160	0	0
Dados calculados com base nos dados acima medidos e no quadro de combustão representado pela tabela C.8.												
Excesso de ar (%)	103%	103%	146%	150%	52%	52%	43%	42%	112%	112%	53%	52%
O_2 (%)	12,2%	12,2%	14,2%	14,3%	8,4%	8,4%	7,5%	7,3%	12,7%	12,7%	8,5%	8,4%
CO_2 (%)	6,2%	6,2%	5,0%	5,0%	8,4%	8,4%	9,0%	9,0%	5,9%	5,9%	8,3%	8,4%
N_2 (%)	81,6%	81,6%	80,8%	80,7%	83,2%	83,2%	83,6%	83,6%	81,4%	81,4%	83,1%	83,2%
$Ar_{necessário}$ $(kmol_{componente}$ $/kg_{gás\ natural})$	1,18	1,18	1,43	1,45	0,882	0,882	0,83	0,824	1,23	1,23	0,888	0,882
	1,18		1,44		0,882		0,827		1,23		0,885	

O excesso de ar foi determinado no Excel com a ajuda da ferramenta Solver, pois o processo era o invertido. Com a percentagem de gases era necessário obter o excesso de ar e os caudais de cada componente.

C3. Determinação da eficiência de combustão

A eficiência de combustão foi determinada de forma semelhante ao método das perdas, mas apenas são contabilizadas as perdas de calor devido aos gases de combustão. Recorrendo à tabela de combustão e à equação 1.7 calculou-se este termo de eficiência.

Na tabela C.13 os dados referentes à quantidade de cada componente foram retirados da tabela de combustão. O seu caudal foi calculado pela multiplicação desse valor pelo caudal de gás natural e obteve-se o caudal de cada componente em cada gerador. O caudal de gás natural é apresentado na tabela C.5.

Tabela C. 13 - Dados relativos à quantidade de gases de combustão de cada gerador.

	Gases de Combustão								
	$(kg_{componente}/kg_{gás\ natural})$				$(kg_{componente}/s)$				
	CO_2	H_2O	N_2	O_2	CO_2	H_2O	N_2	O_2	$T_{Gases}\ (K)$
Geradores 1	2,79	11,40	23,45	4,03	0,0113	0,0464	0,0954	0,0164	443,15
Geradores 2	2,79	13,48	28,57	5,78	0,0164	0,0793	0,1680	0,0340	416,15
Geradores 3	2,79	9,08	17,56	2,03	0,0171	0,0558	0,1080	0,0125	450,15
Geradores 4	2,79	8,64	16,44	1,66	0,0166	0,0515	0,0979	0,0099	453,15
Geradores 5	2,79	11,82	24,48	4,38	0,0123	0,0523	0,1083	0,0194	453,15
Geradores 6	2,79	9,10	17,62	2,05	0,0154	0,0502	0,0973	0,0113	452,15
			cp (kJ/kg.K)		0,9799	1,9239	1,0485	0,9534	

Com base na tabela C.13 calculou-se o teor de cada componente nos gases de combustão, para a determinação do calor específico. Com o calor específico e com o caudal e a temperatura dos gases de combustão calculou-se a energia associada à exaustão dos gases (tabela C.14).

Tabela C. 14 - Dados da eficiência de combustão dos geradores.

		$Teor_{componente}\ (kg_{componente}/kg_{gase\ de\ combustão})$						
	$E_{gás\ natural}$ (kW)	CO2	H2O	N2	O2	cp_{gases} (kJ/(kg.K))	E_{gases} (kW)	$\eta_{combustão}$ (%)
Gerador 1	201,749	0,0669	0,274	0,563	0,097	1,274	36,97	81,68
Gerador 2	291,717	0,0550	0,266	0,565	0,114	1,267	54,30	81,39
Gerador 3	305,086	0,0886	0,289	0,558	0,064	1,289	44,45	85,43
Gerador 4	295,459	0,0944	0,293	0,557	0,056	1,293	41,21	86,05
Gerador 5	219,338	0,0641	0,272	0,563	0,101	1,273	44,33	79,79
Gerador 6	273,851	0,0883	0,288	0,558	0,065	1,289	40,46	85,23

D. Ventilação

De modo a determinar a quantidade de ar que entra na olaria mediram-se as velocidades de ar nas ventoinhas localizadas na Olaria. A Olaria tem dez ventoinhas, cinco do lado Oeste e as restantes do lado Este. As ventoinhas do lado Este fazem a extracção do ar enquanto que as demais fazem a entrada de ar novo.

Considerou-se que as ventoinhas localizadas a Este estão sempre a funcionar e ar restantes funcionam a 50% a convecção forçada e 50% a convecção natural. Na tabela D.1 estão representados os valores medidos e calculados para as ventoinhas de extracção.

Tabela D.1 - Valores medidos nas ventoinhas de extracção.

Medições	Ar saída			
	v(m/s)	$A_{ex.}$ (m^2)	$\dot{V_{ar}}$ (m^3/s)	$\dot{m_{ar}}$ (kg/s)
1	3,2	0,196	0,628	0,725
2	3,3	0,196	0,648	0,748
3	3,5	0,196	0,687	0,793
Média	3,3	0,196	0,654	0,756

A temperatura e a humidade utilizadas foram as temperaturas e humidades médias das várias zonas.

Na tabela D.2 apresentam-se as condições utilizadas nos cálculos referentes à extracção de ar.

Tabela D.2 - Propriedades do ar de extracção.

P (atm)	1
T(ºC)	30,42
T(K)	303,57
HR (%)	43,68%
HA(mol_v/mol_{arseco})	0,01909
ρ (kg/m^3)	1,154

As ventoinhas do lado de entrada de ar novo nem sempre estão ligadas, pois muitas vezes estão desligadas, mas soltas de forma a deixar entrar o ar mas sem exercer nenhuma força, em que a velocidade varia entre 2,5 e 1 m/s

Na tabela D.3 e D.4 são apresentados os valores medidos e calculados para as ventoinhas de extracção em convecção forçada e convecção natural.

Na tabela D.5 apresenta-se as condições utilizadas nos cálculos referentes à introdução de ar na Olaria.

Tabela D.3 - Valores medidos nas ventoinhas de introdução de ar novo.

Medições	Ar entra			
	v(m/s)	$A_{ex.}$ (m^2)	$\dot{V_{ar}}$ (m^3/s)	$\dot{m_{ar}}$ (kg/s)
1	3,0	0,196	0,5890	0,705
2	2,8	0,196	0,5498	0,658
3	3,1	0,196	0,6087	0,729
Média	3,0	0,196	0,5825	0,697

Tabela D.4 - Valores medidos nas ventoinhas de introdução de ar mas a funcionar em convecção natural.

Convecção natural	
v(m/s)	1,75
$A_{ex.}$ (m^2)	0,196
$\dot{V_{ar}}$ (m^3/s)	0,344
$\dot{m_{ar}}$ (kg/s)	0,411

Tabela D.5 - Propriedades do ar de introdução na Olaria.

P (atm)	1
T(ºC)	20,60
T(K)	293,75
HR (%)	41,20%
HA(mol_v/mol_{arseco})	0,00996
ρ (kg/m^3)	1,197

Como o ar que sai é superior ao ar que entra, teve-se como referência o ar que sai pois as outras entradas de ar podem ser parasitas. Para determinarmos o ar que efectivamente saí da Olaria foi necessário conhecer o ar utilizado na combustão nos geradores. Na tabela D.6 encontram-se os valores obtidos para o cálculo do ar de combustão.

Tabela D.6 - Valores do ar necessário para a combustão dos geradores.

	Ar $_{necessário}$ (kmol/$kg_{comb.}$)	$\dot{m}_{gás\ natural}$ (kg/s)	Ar $_{necessário}$ (kmol/s)	Ar $_{necessário}$ (kg/s)
Gerador nº 1	1,18	0,00407	0,00480	0,139
Gerador nº 2	1,44	0,00588	0,00847	0,245
Gerador nº 3	0,882	0,00615	0,00542	0,157
Gerador nº 4	0,827	0,00596	0,00493	0,143
Gerador nº 5	1,23	0,00442	0,00544	0,158
Gerador nº 6	0,885	0,00552	0,00489	0,142
				0,983

O ar total que sai da Olaria é a soma do ar usado na combustão mais o ar que saí pela ventilação. Na tabela D.7 está representado o caudal de ar que sai por ventilação combustão e o caudal de ar seco correspondente.

Tabela D.7 - Valores dos caudais mássicos de extracção de ar.

Ar à saida	
$\dot{m}_{ar\ comb.}$ (kg/s)	0,983
$\dot{m}_{ar\ vent.}$ (kg/s)	3,78
$\dot{m}_{ar\ sai}$ (kg/s)	4,76
$\dot{m}_{ar\ seco\ sai}$ (kg/s)	4,71

Sabendo que o volume da Olaria é de 27222,9 m^3 e que o caudal mássico de extracção de ar é de 4,71 kg/s calculou-se o ciclo de renovação do ar interior, que é de 2,3 h.

E. Consumos de gás natural

Os valores apresentados na tabela E.1 foram fornecidos pela Fábrica Cerâmica de Valadares. Estes referem-se ao consumo de gás natural dos geradores instalados na Olaria quatro. Com os valores do consumo e o caudal da tabela E.2 determinou-se o tempo que os geradores estão ligados.

Tabela E.1 - Valores dos consumos de gás natural ao longo do ano de 2010.

	Gás Natural (m^3)												
	Janeiro	**Fevereiro**	**Março**	**Abril**	**Maio**	**Junho**	**Julho**	**Agosto**	**Setembro**	**Outubro**	**Novembro**	**Dezembro**	**Total**
Geradores 1	794	1621	1700	826	805	989	721	0	759	978	887	1323	11403
Geradores 2	1267	2072	2228	1697	1724	1370	1096	0	1687	2723	2763	2608	21235
Geradores 3	1118	1963	2024	1464	1589	1417	1076	0	1406	2175	1838	1798	17868
Geradores 4	895	2473	2747	2052	1672	1700	1312	0	1994	3080	2985	2338	23248
Geradores 5	1182	1721	2117	1387	1429	1271	1016	0	1521	2058	1925	1837	17464
Geradores 6	1368	1971	1767	1431	1534	1593	1318	0	1838	2517	2533	2481	20351
Total	6624	11821	12583	8857	8753	8340	6539	0	9205	13531	12931	12385	111569

Tabela E.2 - Valores do tempo em que os gerados encontram-se em funcionamento.

	$V_{gás\ natural}$ (m^3)	$\dot{V}_{gás\ natural}$ (m^3/s)	T (h)
Geradores 1	11403	0,001388	2282
Geradores 2	21235	0,002007	2939
Geradores 3	17868	0,002099	2365
Geradores 4	23248	0,002033	3177
Geradores 5	17464	0,001509	3215
Geradores 6	20351	0,001884	3000
Total	111569	0,010920	16977

F. Balanços efectuados

F1. Balanço de massa

Na realização do balanço mássico foi necessário conhecer alguns dados relativamente ao processo em estudo. De forma a determinar a massa de barbotina utilizada na Olaria efectuou-se um balanço ao sólido seco, neste caso à barbotina seca.Com base na massa das peças secas que saem da Olaria, sendo 100020 kg por semana e sabendo que cinco porcento da barbotina que entra, são resíduos foi possível determinar a massa de barbotina seca como exemplificado na equação F.1.

$$\dot{m}_{barbotina\ seca} = 0{,}05 \times \dot{m}_{barbotina\ seca} + \dot{m}_{peças\ secas} \quad \text{(F.1)}$$

$$\dot{m}_{barbotina\ seca} = 105284\ kg/semana$$

Depois calculou-se a massa de água que é evaporada na Olaria. Efectuou-se este cálculo recorrendo à equação F.2 e à tabela F.1.

$$\dot{m}_{barbotina\ seca} \times Y_{barbotina} = 0{,}05 \times \dot{m}_{barbotina\ seca} \times Y_{barbotina} + \dot{m}_{peças\ secas} \times Y_{peças} + \dot{m}_{água\ evaporada} \quad \text{(F.2)}$$

Tabela F. 1 - Valor da água evaporada e dados utilizados no seu cálculo.

$\dot{m}_{barbotina\ seca}\ (kg/semana)$	105284
$Y_{barbotina}\ (kg_{água}/kg_{sólido\ seco}\ )$	0,32
$\dot{m}_{peças\ secas}\ (kg/semana)$	100020
$Y_{peças}\ (kg_{água}/kg_{sólido\ seco})$	0,08
$\dot{m}_{resíduos}\ (kg/semana)$	5% $\dot{m}_{barbotina\ seca}$
$Y_{resid.}\ (kg_{água}/kg_{sólido\ seco})$	0,08
$\dot{m}_{água\ evaporada}\ (kg/semana)$	25268

F2. Balanço energético

No balanço energético à Olaria determinaram-se todas as entradas e saídas de energia. Todos os cálculos realizados tiveram como base uma semana de trabalho ou seja cinco dias úteis. Na equação F.3 está representado o balanço energético realizado à Olaria.

$$Q_{gás\ natural} + Q_{Iluminação} + Q_{\ rad.\ solar} = Q_{gases\ de\ combustão} + Q_{ventilação} + Q_{envolvente} + Q_{inércia\ térmica} + Q_{barbotina\ e\ peças} \quad \text{(F.3)}$$

Numa primeira fase determinou-se o calor gerado pela queima de gás natural usando a equação 1.11. Os dados utilizados para o cálculo do calor gerado pelo gás são apresentados na tabela F.2.

Tabela F.2 - Valores do calor gerado pelo gás natural e dados utilizados para o seu cálculo.

$m_{gás\ natural}\ (kg)$	5019
$PCI_{gás\ natural}(MJ/kg)$	49,263
$T\ (K)$	293,15
$cp_{gás\ natural}\ (MJ/kg.K)$	2,28
$Q_{gás\ natural}\ (MJ)$	247236

De seguida calcularam-se os ganhos de energia através da energia solar que atravessa os vidros. Os ganhos solares foram calculados com base na equação F.4.

$$E_{rad.solar} = G_{sul} \times X \times 0{,}46 \times A \times g_r \times M \quad \text{(F.4)}$$

Os dados utilizados no cálculo e o valor do calor ganho pela energia solar estão representados na tabela F.3. Realizou-se o cálculo da energia com base no inverno e no verão e de seguida foi realizada uma média, o cálculo realizou-se com base no RCCTE-DL nº80/2006.

Tabela F.3 - Valores da energia solar obtida pela Olaria e dados utilizados no seu cálculo.

	Inverno	Verão
$G_{sul}(kW.h/mês.m^2)$	93	420
$M\ (meses)$	6,7	5,3
$E_{rad.solar}(kW.h/ano)$	2429	8676
X	0,56	
$A\ (m^2)$	8,7	
g_r	0,8	
$Q_{rad.solar}(MJ)$	384,4	

Consecutivamente calculou-se a energia ganha pela Olaria através da Iluminação. No cálculo desta energia considerou-se que a iluminação está em funcionamento cinco horas diárias, pois nem todas as lâmpadas estão ligadas simultaneamente. O seu cálculo foi efectuado com base na equação F.5 e na tabela F.4.

$$Q_{Iluminação} = P \times t_{funcionamento} \quad \text{(F.5)}$$

Tabela F.4 - Dados da energia obtida através da iluminação e valores utilizados no seu cálculo.

$P_{iluminação}\ (W)$	51267
$t\ (h)$	25
$Q_{Iluminação}\ (MJ)$	4614

Depois de calculadas todas as entradas de energia na Olaria calculou-se o rendimento semanal da mesma, ou seja, da energia gasta quanta é que realmente é utilizada para a secagem de moldes e peças. Este cálculo foi realizado com base nas equações F.6, F.7 e F.8. O cálculo das propriedades apresentadas na tabela F.5 foram realizados à temperatura média.

$$\eta_{Olaria} = \frac{Q_{útil}}{Q_{Gerado}} \quad \text{(F.6)}$$

Em que:

$$Q_{Gerado} = Q_{gás\ natural} + Q_{Iluminação} + Q_{rad.\ solar} \quad \text{(F.7)}$$

$$Q_{útil} = m_{água\ evap.} \times cp_{água} \times \Delta T + m_{água\ evap.} \times \lambda \quad \text{(F.8)}$$

Tabela F.5 - Dados da energia útil da Olaria e valores utilizados no seu cálculo.

$m_{água}\ (kg)$	25268
$cp_{água}\ (kJ/kg.K)$	4,184
$T_{inicial\ água}\ (K)$	293,15
$T_{final\ água}\ (K)$	304,15
$\lambda\ (kJ/kg)$	2423,1
$Q_{útil}\ (MJ)$	62390

Posteriormente calcularam-se as saídas de energia da Olaria. Inicialmente calcularam-se as perdas de energia relativas à envolvente. Com base na simulação realizada considerou-se uma perda de 38,14 kW, pois efectuou-se uma média anual. Considerou-se as perdas durante cinco dias e meio, visto que os geradores são desligados no sábado de manhã e são ligados no domingo ao final da tarde, mas como depois de desligados a Olaria ainda perde energia até voltar à temperatura ambiente, foram adicionas dez horas para esse arrefecimento. Estas considerações foram feitas, tendo como base os dados obtidos através dos higrómetros instalados na Olaria.

Tabela F.6 - Valores das perdas pela envolvente e dados utilizados no seu cálculo.

$E_{envolvente}\ (kW)$	38,14
$t\ (h)$	142
$Q_{envolvente}\ (MJ)$	19495

De seguida foram calculadas as perdas através da ventilação. Estas calcularam-se a partir das diferenças de entalpia entre a saída e a entrada de ar na Olaria, como exemplificado nas equações F.9 e F.10. Neste cálculo considerou-se o funcionamento de vinte e quatro horas diárias, cinco dias por semana. Os dados utilizados no cálculo são apresentados na tabela F.7.

$$Q_{ventilação} = H_{ar\ saída} - H_{ar\ entrada} \tag{F.9}$$

Em que:

$$H_{ar} = m_{ar} \times cp_{ar} \times \left(T_{ar} - T_{ref.}\right) + m_{vapor\ água} \times cp_{vapor\ água} \times \left(T_{ar} - T_{ref.}\right) + m_{vapor\ água} \times \lambda \tag{F.10}$$

Tabela F.7 - Valores das perdas pela ventilação e dados utilizados no seu cálculo.

	Entrada	Saída
$\dot{m}_{ar\ seco}\ (kg/s)$	4,76	
$t\ (h)$	120	
$m_{ar\ seco}\ (kg)$	2054659	
$T_{ref.}\ (K)$	273,15	
$T\ (K)$	293,75	303,57
$HV\ (kg_{água}/kg_{ar\ seco})$	6,19E-03	1,19E-02
$cp_{ar\ seco}\ (kJ/kg.K)$	0,9972	0,9974
$cp_{vapor\ água}\ (kJ/kg.K)$	1,861	1,862
$H\ (kJ)$	74537666	124759825
$\lambda\ (kJ/kg)$	2501,6	
$Q_{ventilação}\ (MJ)$	50222	

Em seguida calcularam-se as perdas associadas à exaustão dos gases de combustão. Este cálculo foi realizado com base na equação 1.8 e na tabela F.8.

Tabela F.8 - Valores das perdas pelos gases de combustão e dados utilizados no seu cálculo.

$m_{Gases}\ (kg)$	188912
$cp_{Gases}\ (kJ/kg.K)$	1,282
$T_{Gases}\ (K)$	453,15
$T_{amb.}(K)$	291,15
$Q_{Gases\ combustão}\ (MJ)$	39228

No cálculo da energia perdida foi também necessário calcular a energia relativamente à inércia térmica. Pois no inicio de cada semana é necessário aquecer a Olaria o todo o equipamento dentro da mesma até à temperatura de trabalho. Considerou-se o aquecimento, dos moldes, das peças cerâmicas, das máquinas da tubagem, dos carros de transporte de peças e do ar da Olaria. O cálculo foi realizado com base na equação F.11 e na tabela F.9.

$$Q_{Inércia\ térmica} = m_{moldes} \times cp_{moldes} \times \Delta T + m_{Peças} \times cp_{Peças} \times \Delta T + m_{máquinas} \times cp \times \Delta T + m_{tubagem} \times cp_{tubagem} \times \Delta T + m_{Carros} \times cp_{Carros} \times \Delta T + m_{ar} \times cp_{ar} \times \Delta T \quad \text{(F.11)}$$

Tabela F.9 - Valores das perdas pela inércia térmica e dados utilizados no seu cálculo.

$m_{moldes}\ (kg)$	168155
$cp_{moldes}\ (kJ/kg.K)$	1,09
$m_{peças}\ (kg)$	33560
$cp_{peças}\ (kJ/kg.K)$	2,1
$m_{carros}\ (kg)$	20833
$cp_{aço}\ (kJ/kg.K)$	0,486
$m_{máquinas}\ (kg)$	72000
$m_{tubagem}\ (kg)$	6528
$cp_{tubagem}\ (kJ/kg.K)$	0,486

$V_{ar}\ (m^3)$	27223
$m_{ar}\ (kg)$	31948
$cp_{ar}(kJ/kg.K)$	1,01
$T_{inicial}\ (K)$	291,15
$T_{final}\ (K)$	304,15
$Q_{inércia\ térmica}(MJ)$	4338

De forma a saber se algumas considerações foram realizadas correctamente é necessário calcular a energia de gás natural mas partindo agora das perdas.

Sabendo que depois da queima o calor é utilizado na secagem e perdido pela envolvente, pela ventilação e pela inércia é possível determinar a energia associada ao gás consumido. A equação F.12 representa o cálculo efectuado. O rendimento utilizado neste cálculo foi o rendimento directo médio dos geradores instalados na Olaria, como o rendimento engloba as perdas pelos gases estas não foram contabilizadas

$$Q_{gás\ natural} \times \eta = Q_{útil} + Q_{ventilação+}Q_{envolvente} + Q_{inércia\ térmica} - Q_{Iluminação} - Q_{rad.\ solar} \quad \text{(F.12)}$$

Obteve-se uma energia referente ao gás natural de 224273 MJ, isto representa um desvio de 9,3% em relação ao realmente consumido.

G. Cálculos das medidas de optimização propostas

G1.Optimização da queima dos geradores

A primeira medida de optimização consiste em melhorar as condições de queima dos geradores. Esta medida consiste na diminuição do excesso de ar introduzido na combustão.

Na tabela G.1 apresentam-se os dados referentes à quantidade de cada componente, que foram retirados da tabela C.8, para um excesso de ar de 10 %.

Tabela G.1 - Valores dos caudais de cada componente dos gases de combustão para um excesso de ar de 10%.

	Gases de Combustão								
	$(kg_{componente}/kg_{gás\ natural})$				$(kg_{componente}/s)$				
	CO_2	H_2O	N_2	O_2	CO_2	H_2O	N_2	O_2	$T_{Gases}\ (K)$
Geradores 1	2,79	7,15	12,7	0,390	0,011	0,029	0,052	0,002	443,15
Geradores 2	2,79	7,15	12,7	0,390	0,017	0,042	0,075	0,002	416,15
Geradores 3	2,79	7,15	12,7	0,390	0,017	0,044	0,079	0,002	450,15
Geradores 4	2,79	7,15	12,7	0,390	0,017	0,043	0,076	0,002	453,15
Geradores 5	2,79	7,15	12,7	0,390	0,012	0,032	0,057	0,002	453,15
Geradores 6	2,79	7,15	12,7	0,390	0,015	0,040	0,071	0,002	452,15

Calcularam-se as novas eficiências de combustão como exemplificado na tabela G.2.

Tabela G.2 - Valores optimizados da eficiência de combustão.

	$E_{gás\ natural}$ (kW)	cp_{gases} (kJ/kg.K)	E_{gases} (kW)	$\eta_{combustão}$ (%))
Gerador 1	201,8	1,31	21,01	89,6
Gerador 2	291,7	1,31	25,55	91,2
Gerador 3	305,1	1,31	33,08	89,2
Gerador 4	295,5	1,31	32,58	89,0
Gerador 5	219,3	1,31	24,19	89,0
Gerador 6	273,9	1,31	30,03	89,0

Depois de saber a nova eficiência calculou-se a poupança de combustível. Esta realizou-se com base na equação G.1 que permite calcular a percentagem de combustível poupado. Na tabela G.3 apresenta-se o combustível poupado em cada gerador.

$$\%_{gás\ natural\ poupado} = \frac{(\eta_{combustão\ nova} - \eta_{combustão\ antiga})}{\eta_{combustão\ nova}} \quad \text{(G.1)}$$

Tabela G.3 - Valores do combustível poupado com a diminuição do excesso de ar.

	$\%_{gás\ natural\ poupado}$	$m_{gás\ natural\ poupado}$ (kg/ano)	$V_{gás\ natural\ poupado}$ (Nm^3/ano)
Gerador 1	8,829%	2950,1	3564,6
Gerador 2	10,799%	6719,8	8119,6
Gerador 3	4,179%	2188,3	2644,1
Gerador 4	3,282%	2236,1	2702,0
Gerador 5	10,324%	5283,3	6383,9
Gerador 6	4,278%	2551,2	3082,6
			26496,9

Sabendo que o preço do normal metro cúbico de gás natural é de 0,3336 €, a poupança efectuada é de 8839,37 €.

G2.Aproveitamento dos gases de combustão

A segunda medida tem como objectivo o aproveitamento dos gases de combustão para aquecimento de ar. Este aquecimento será realizado num permutador de calor construído pela própria empresa. O permutador consistia em realizar um tubo à volta do tubo que faz a exaustão de gases de combustão. Desta forma o ar que passa-se entrava em contacto com o tubo dos gases de combustão e efectua-se o seu aquecimento. Este permutador será semelhante a um permutador de duplo tubo a única diferença seria que o fluido externo teria um fluxo em espiral à volta do tubo inteior. Na figura G.1 apresenta-se um esquema do permutador em que o fluido quente são os gases de combustão e o fluido frio é o ar.

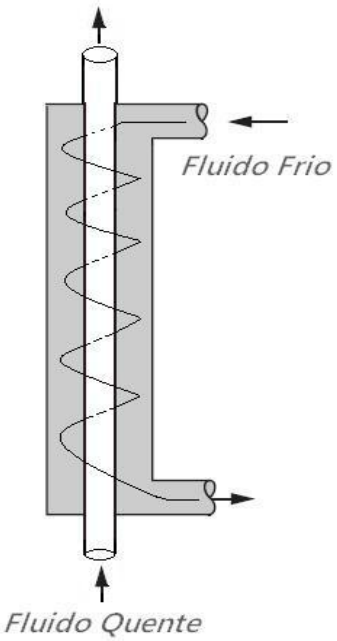


Figura G.1 – Esquema representativo do permutador de calor.

No cálculo da energia poupada com este permutador fizeram-se algumas considerações. Considerou-se que se queria aquecer o ar ambiente que entra a 18 ºC até mais ou menos à temperatura de funcionamento da Olaria e que os gases de combustão entravam a uma temperatura média de 180 ºC e numa primeira fase considerou-se que saíam a 150ºC. Na tabela G.4 são apresentados os caudais e as temperaturas consideradas no cálculo.

Tabela G.4 - Valores de caudais e temperaturas considerados no cálculo do permutador de calor.

	$m_{gases\ de\ combustã}$ (kg/s)	$V_{gases\ de\ combustão}$ (m^3/s)	$T_{gases\ ent.}$ (K)	$T_{gases\ said.}$ (K)	$T_{média}$ (K)
Geradores 1	0,169	0,245	443,15	423,15	433,15
Geradores 2	0,298	0,404	416,15	423,15	394,65
Geradores 3	0,193	0,286	450,15	423,15	411,65
Geradores 4	0,176	0,262	453,15	423,15	413,15
Geradores 5	0,192	0,285	453,15	423,15	413,15
Geradores 6	0,174	0,258	452,15	423,15	412,65

O cálculo do número Nusselt no caso de convecção forçada no interior de tubos é calculado pela equação G.2.

$$Nu = 0{,}023 \times Re^{0,8} \times Pr^{n} \qquad \text{(G.2)}$$

O factor n é de 0,3 quando o fluido e arrefecido e 0,4 quando é aquecido (Çengel, 2003).

Na tabela G.5 apresentam-se os valores usados no cálculo do coeficiente de transferência de calor do lado interior do permutador de calor.

Tabela G. 5 - Valores calculados para o lado interior do permutador.

	$Gases\ de\ Combustão$							
	$\mu\ (Pa.s)$	K $(W/m.K)$	cp $(kJ/(kg.K)$	$v\ (m/s)$	Re	Pr	Nu	h_i $(W/m^2.°C)$
Geradores 1	2,03E-05	0,0213	1271,0	5,0	42431	1,21	122,8	10,47
Geradores 2	1,90E-05	0,0201	1253,8	8,2	79942	1,19	202,3	16,25
Geradores 3	1,92E-05	0,0196	1279,4	5,8	51335	1,25	144,3	11,33
Geradores 4	1,92E-05	0,0195	1283,5	5,3	46703	1,26	134,2	10,46
Geradores 5	1,96E-05	0,0206	1263,8	5,8	49980	1,20	139,6	11,49
Geradores 6	1,92E-05	0,0197	1279,4	5,3	46109	1,25	132,4	10,43

No caso do fluido exterior como este circula em espiral este tubo terá uma secção quadrada com um lado de 15 cm.

Na tabela G.6 são apresentados as dimensões e os dados considerados no dimensionamento do permutador.

Tabela G.6 - Dados do permutador de calor.

	Fluido Interno	Fluido Externo
$d\ (m)$	0,25	0,254
$A_{secção\ esc.}\ (m^2)$	0,0491	0,0625
$A_{tf}\ (m^2)$	1,57	1,60
$a\ (m)$		0,15
$Espessura\ (m)$	0,002	
$k_{aço\ inoxidável}\ (W/m.K)$	36	
$h(m)$	2	

O dimensionamento do permutador de calor foi feito para o gerador número um pois é dos que apresenta um menor coeficiente de transferência de calor.

Numa primeira fase calculou -se o calor transferido pelo ar assumindo uma temperatura de saída de 30ºC. Este cálculo foi efectuado com base na equação 1.14. De seguida, calcularam-se os coeficientes de transferência de calor internos e externos de modo a calcular o coeficiente global de transferência de calor (equação G.3,G.4 e G.5).

$$Q = U \times A \times \Delta T_{ln} \tag{G.3}$$

Em que:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_i \times A_i} + \frac{\Delta x}{k \times A_x} + \frac{1}{h_e \times A_e} \tag{G.4}$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_{qe} - T_{fs}) - (T_{qs} - T_{fe})}{ln\left(\frac{(T_{qe} - T_{fs})}{(T_{qs} - T_{fe})}\right)} \tag{G.5}$$

Depois de calcular ambos os calores usando a ferramenta solver do Excel fez-se variar a temperatura de saída do ar até que estes se igualassem e numa segunda fase fez-se variar a temperatura dos gases de combustão à saída.

Na tabela G.7 são apresentados os valores usados no cálculo do calor do lado exterior (a temperatura de saída de ar já é a optimizada e não a arbitrada no inicio). Na tabela G.8 apresentam-se os valores obtidos para o calor trocado entre os fluidos no permutador.

Tabela G.7 - Valores das propriedades de transferência de calor do fluido externo.

Fluido frio	
$v\ (m/s)$	3,0
$T_{ent.ar}\ (K)$	291,15
$T_{said.ar}\ (K)$	306,4
$cp_{ar}\ (j/kg.K)$	1008
$k_{ar}(W/m.K)$	0,0252
$\mu_{ar}\ (Pa.s)$	1,82E-05
$\rho_{ar}(kg/m3)$	1,173
Re	28945
Pr	0,731
Nu	75,24
$h_e(W/m^2.°C)$	12,62

Tabela G.8 - Valores de potência térmica trocada no permutador.

$E_{ar}\ (W)$	1215,9
$1/UA\ (K/W)$	0,1105
$UA\ (W/K)$	9,049
$\Delta T_{ln}\ (K)$	134,4
$E_{total}\ (W)$	1215,9

Sabendo a energia que é poupada e as horas que o gerador está ligado sabemos a energia poupada. O gerador está ligado 2282 horas por ano e o seu rendimento efectivo é de 65,69%. Depois de conhecer a energia contida no ar que é poupada, esta foi dividida pelo rendimento do gerador, de modo a determinar a energia necessária para produzir pelo gás natural. Considerou-se também cerca de 50 W para o funcionamento da ventilação. Na tabela G.9 são apresentados os valores de gás natural economizado.

Tabela G.9 - Dados de gás natural economizado com a aplicação do permutador.

$m_{gás\ natural\ poupado}$. (kg/ano)	$V_{gás\ natural\ poupado}$ (Nm^3/ano)
296	358

Esta medida equivale a uma poupança de 119,31 € por ano e por permutador.

G3.Diminuição da ventilação

A terceira medida proposta foi diminuir a taxa de ventilação. Propôs-se o aumento do ciclo de renovação do ar interior para cinco horas. Sabendo o volume e as condições da Olaria chegou-se a um caudal de 1,73 kg/s de ar seco. Fazendo a diferença entre o caudal antigo e o novo obtém-se o caudal de poupança de 2,07 kg/s.

No cálculo da energia poupada anualmente representada na tabela G.10 considerou-se que as ventoinhas estão ligadas vinte e quatro horas por dia, cinco dias por semana e quarenta e oito semanas por ano.

Tabela G.10 - Valores da energia poupada na diminuição ventilação.

	Entrada	Saída
$\dot{m}_{ar\ seco}\ (kg/ano)$	42913805	
$T_{ref.}\ (K)$	273,15	
$T\ (K)$	293,75	303,57
$HV\ (kg_{água}/kg_{ar\ seco})$	0,0061	0,0119
$cp_{ar\ seco}\ (kJ/kg.K)$	0,9972	0,9974
$cp_{vapor\ água}\ \ (kJ/kg.K)$	1,860	1,862
$H\ (kJ)$	1,56E+09	2,61E+09
$\lambda\ (kJ/kg)$	2501,6	
$Q_{ventilação}\ \ (MJ)$	1048945	

Tabela G.11 - Valores de gás natural poupado na melhoria da ventilação.

	$m_{gás\ natural\ poupado}$· (kg/ano)	$V_{gás\ natural\ poupado}$ (Nm^3/ano)
Ventilação	21292,8	25728,4

Esta medida equivale a uma poupança de 8582,99 € por ano.

G4. Diminuição do volume da Olaria

A última medida consiste na diminuição do volume da Olaria. Como a Olaria tem um tecto em formato de W, esta medida visa a mudança das placas de isolamento colocadas no tecto para uma forma horizontal plana de modo a excluir o volume de ar desnecessário. A aplicação desta medida tem duas principais consequências a diminuição do ar necessário na olaria e a diminuição das perdas pela envolvente, pois algumas paredes terão uma menor dimensão do ponto de vista do interior da Olaria.

A diminuição do volume é de 6934,5 m^3, por isso de forma a manter a mesmo ciclo de renovação do ar interior de 2,3h o caudal de ventilação terá de ser de 2,83 kg/s. Realizando a diferença entre o caudal antigo e o novo obtém-se o caudal de poupança de ar de 0,966 kg/s. O cálculo da energia poupada através da diminuição da ventilação está apresentado na tabela G.12.

Tabela G.12 - Valores de energia poupada na diminuição da ventilação referente à diminuição do volume.

	Entrada	Saída
$\dot{m}_{ar\ seco}\ (kg/ano)$	20036847	
$T_{ref.}\ (K)$	273,15	
$T\ (K)$	293,75	303,57
$HV\ (kg_{água}/kg_{ar\ seco})$	0,00619	0,0118
$cp_{ar\ seco}\ (kJ/kg.K)$	0,9972	0,9974
$cp_{vapor\ água}\ \ (kJ/kg.K)$	1,860	1,862
$H\ (kJ)$	7,27E+08	1,22E+09
$\lambda\ (kJ/kg)$	2501,6	
$Q_{ventilação}\ \ (MJ)$	1048945	

No cálculo das perdas térmicas através das paredes, a única diferença é na área de transferência de calor. Na tabela G.13 apresenta-se a energia poupada através da diminuição das áreas das paredes da Olaria.

Na tabela G.14 apresentam-se os valores de gás natural poupado através da diminuição do volume da Olaria

Tabela G.13 - Valores da energia poupada pelas perdas térmicas pela envolvente na diminuição do volume da Olaria.

	$E_{envolvente}\ (kW)$			$Q\ (MJ)$
	Normal	Optimizado	Diferença	
Janeiro	45,99	38,66	7,33	13937
Fevereiro	44,73	37,61	7,12	13533
Março	42,12	35,48	6,63	12607
Abril	33,05	27,96	5,08	9661
Maio	32,22	27,29	4,94	9388
Junho	27,56	23,43	4,13	7842
Julho	22,16	18,99	3,17	6025
Agosto	21,64	18,57	3,08	5853
Setembro	24,61	21,00	3,61	6862
Outubro	31,25	26,46	4,79	9096
Novembro	39,93	33,64	6,30	11974
Dezembro	45,24	38,04	7,20	13686
				120462

Tabela G.14 - Valores de gás natural poupado na melhoria da diminuição do volume.

	$m_{gás\ natural\ poupado}$ (kg/ano)	$V_{gás\ natural\ poupado}$ (Nm^3/ano)
Ventilação	9941,8	12012,8
Envolvente	2445,3	2954,7

Com base nos cálculos efectuados consegue-se uma poupança de 4993,16 € por ano.