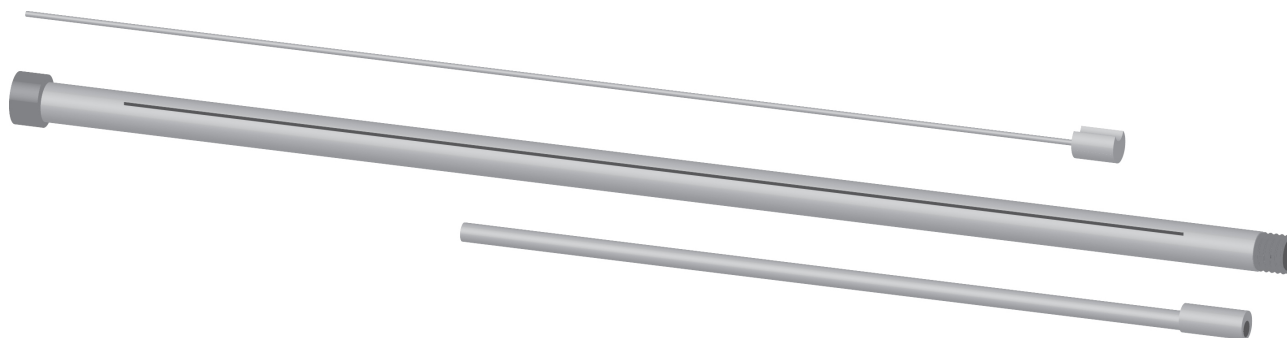




TÉCNICO
LISBOA



OTIMIZAÇÃO DE UM FORNO NA INDÚSTRIA ALIMENTAR

Xil Rey Veríssimo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Química

Orientadores: Prof. Doutor Sebastião Manuel Tavares Silva Alves
Engenheiro Nuno Miguel Antunes Moreira

Júri

Presidente: Prof. Doutor José Manuel Félix Madeira Lopes

Orientador: Engenheiro Nuno Miguel Antunes Moreira

Vogal: Prof.^a Doutora Maria Cristina Carvalho Silva Fernandes

Junho de 2014

Para a minha avó Lucila, fonte eterna de sabedoria.

Para o meu filho Afonso, notável Papageno.

*Preciso de ter aptidão e paciência para formular
o que não está contido na linguagem do nosso tempo,
pois o que é agora inteligível não tem significado.¹*

Henry Miller em *Trópico de Capricórnio*

AGRADECIMENTOS

Quero expressar a minha gratidão a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho:

Ao Professor Sebastião Alves agradeço a total disponibilidade, as engenhosas ideias e as reuniões motivadoras.

Ao Engenheiro Nuno Moreira agradeço a liberdade criativa, os recursos disponibilizados e oportunidade de trabalhar numa grande empresa.

À Catarina Rocha, ao Rui Carrajola, ao David Novais, ao Pedro Pedro e ao Nelson Sousa agradeço o companheirismo, a frontalidade e o espírito crítico.

A todos os operadores da linha de *tortilla chips*, e em particular ao Rui Camilo, agradeço a sua experiência ímpar sobre o processo.

Ao José António, ao Rui Jesus, ao Rui Martins, ao Luís Reis e ao Carlos Ferreira agradeço a implementação das melhorias no forno.

Aos meus avós e aos meus pais agradeço a confiança, o encorajamento e todo o apoio desde o início do curso.

Ao meu irmão Tomé agradeço a amizade e a sinceridade.

À Catarina agradeço a paciência, o suporte emocional e a revisão atenta do texto.

Ao Afonso agradeço a (pouca) paciência, a motivação e a constante preocupação com a escrita do “relatório da tese”.

(ao gato Faísca agradeço a companhia na solidão da escrita)

O meu sincero obrigado.

Xil Veríssimo

Lisboa, junho de 2014

(ao som de *La bohème* de G. Puccini)

RESUMO

Estudou-se o funcionamento de um forno industrial utilizado para a produção de *tortilla chips*, com o objetivo de desenvolver propostas para a sua otimização geral.

Efetou-se o acerto das temperaturas ao longo da largura dos tapetes do forno a partir de intervenções estruturais nos queimadores tubulares e desenvolveu-se uma metodologia para a sua correta aplicação. Estas alterações beneficiaram o aspeto final das *tortilla chips* com a redução de pontos tostados.

Melhorou-se a caracterização do forno e sugeriram-se novas e eficientes ferramentas de operação, monitorização e manutenção que permitiram um aumento da qualidade da crostagem.

Realizou-se a análise energética do forno e propuseram-se alterações para a redução do consumo de energia.

Aprofundou-se, com recurso à análise multivariada, o conhecimento sobre as variáveis do processo até ao final da operação de crostagem.

Todos os resultados obtidos conduziram a melhorias significativas do forno a nível técnico, económico e ambiental.

Palavras-chave: *tortilla chips*; forno; acerto de temperaturas; otimização; energia

ABSTRACT

The operation of an industrial oven for the production of tortilla chips was studied, with the aim of developing proposals for overall optimization.

The temperature balancing was performed along the width of the oven belts by physical adjustment of the ribbon burners and a methodology was developed for their correct application. These changes improved the final appearance of tortilla chips by reducing the toast points.

The characterization of the oven was enhanced and new and efficient tools were suggested for operation, monitoring and maintenance that allowed an increase in the quality of crusting.

The energetic analysis of the oven was performed and modifications were proposed to reduce energy consumption.

Using multivariate analysis, the knowledge about the process variables until the end of the crusting operation was deepened.

All the results led to significant improvements of the oven at technical, economic and environmental level.

Keywords: tortilla chips; oven; temperature balancing; optimization; energy

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
GLOSSÁRIO DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS	xiii
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1. PROCESSO DE FABRICO DE <i>TORTILLA CHIPS</i>	1
1.1.1. <i>Contextualização histórica</i>	1
1.1.2. <i>Matéria-prima</i>	3
1.1.3. <i>Limpeza</i>	3
1.1.4. <i>Cozedura e repouso</i>	3
1.1.5. <i>Lavagem e moagem</i>	4
1.1.6. <i>Laminagem</i>	5
1.1.7. <i>Crostagem e estabilização</i>	5
1.1.8. <i>Fritura</i>	7
1.1.9. <i>Arrefecimento e aromatização</i>	7
1.2. <i>CROSTAGEM</i>	8
1.2.1. <i>Objetivos</i>	8
1.2.2. <i>Qualidade dos chips</i>	8
1.2.3. <i>Equipamento</i>	8
1.3. <i>OBJETIVOS DO TRABALHO</i>	11
CAPÍTULO 2. FORNO	13
2.1. <i>COMBUSTÃO</i>	13
2.1.1. <i>Gás natural</i>	13
2.1.2. <i>Ar</i>	14
2.1.3. <i>Reações</i>	14
2.2. <i>SISTEMAS DE QUEIMADORES E PILOTOS</i>	15
2.2.1. <i>Queimadores infravermelhos</i>	15
2.2.2. <i>Queimadores tubulares</i>	16
2.2.3. <i>Pilotos</i>	17
2.3. <i>SISTEMAS DE MEDIÇÃO E CONTROLO</i>	18
2.3.1. <i>Medidor principal de caudal de gás natural</i>	18
2.3.2. <i>Sensores de temperatura</i>	18
2.3.3. <i>Válvulas de borboleta e misturadores</i>	19
2.4. <i>SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO DE AR E EXAUSTÃO DE GASES</i>	20
2.4.1. <i>Ventilador de alimentação de ar</i>	20
2.4.2. <i>Ventiladores de exaustão de gases</i>	20

CAPÍTULO 3. ACERTO DAS TEMPERATURAS NOS TAPETES	21
3.1. INTERVENÇÕES EXTERIORES.....	23
3.1.1. <i>Perfil inicial</i>	23
3.1.2. <i>Medidas corretivas e metodologia</i>	25
3.1.3. <i>Perfil final</i>	26
3.2. INTERVENÇÕES ESTRUTURAIS.....	29
3.2.1. <i>Perfil inicial</i>	30
3.2.2. <i>Medidas corretivas e metodologia</i>	31
3.2.3. <i>Perfil final</i>	34
CAPÍTULO 4. MELHORAMENTOS NO FORNO.....	39
4.1. MONITORIZAÇÃO	39
4.1.1. <i>Correções no consumo de gás natural</i>	39
4.1.2. <i>Consumo dos queimadores e pilotos</i>	40
4.2. OPERAÇÃO	43
4.2.1. <i>Ajuste das válvulas de borboleta</i>	43
4.2.2. <i>Ajuste da inclinação do primeiro volteador</i>	46
4.2.3. <i>Ajuste da frequência dos ventiladores de exaustão</i>	46
4.2.4. <i>Ajuste da orientação dos queimadores tubulares</i>	47
4.3. MANUTENÇÃO.....	47
4.3.1. <i>Substituição do tapete superior</i>	47
4.3.2. <i>Procedimentos para limpeza correta</i>	47
4.3.3. <i>Revisão das intervenções de manutenção</i>	48
CAPÍTULO 5. ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA.....	49
5.1. BALANÇOS AO FORNO.....	49
5.1.1. <i>Balanço mássico</i>	49
5.1.2. <i>Balanço entálpico</i>	55
5.2. SUGESTÕES PARA POUANÇA DE ENERGIA	62
5.2.1. <i>Remoção de pilotos desnecessários</i>	62
5.2.2. <i>Recuperação de calor</i>	63
5.2.3. <i>Otimização energética nos períodos de chama baixa</i>	65
CAPÍTULO 6. ANÁLISE MULTIVARIADA.....	67
6.1. PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	67
6.2. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS OPERATÓRIOS.....	68
6.2.1. <i>Relações bi-variáveis</i>	68
6.2.2. <i>Classificação hierárquica</i>	69
6.2.3. <i>Análise dos componentes principais</i>	70
6.3. MODELAÇÃO	71
6.3.1. <i>Redes neuronais artificiais</i>	71

CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO.....	73
7.1. CONCLUSÕES FINAIS	73
7.2. TRABALHO FUTURO	75
BIBLIOGRAFIA	77
ANEXO A. DADOS DE PERFIS DE TEMPERATURAS	A.1
ANEXO B. HISTÓRICO DE INTERVENÇÕES	B.1
ANEXO C. PROCEDIMENTOS PARA LIMPEZA CORRETA.....	C.1
ANEXO D. FORMULÁRIO PARA REGISTO DAS TEMPERATURAS.....	D.1

GLOSSÁRIO DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

A	área, m ²
A_p	área perpendicular à direção do fluxo, m ²
b.h.	base húmida
b.s.	base seca
C_d	coeficiente de descarga
C_p	capacidade calorífica a pressão constante
D	diâmetro, m
f	frequência dos ventiladores de exaustão, %
g	aceleração da gravidade, m/s ² ; estado gasoso
GC	gases de combustão
GN	gás natural
Gr	número de Grashof
h	coeficiente de transferência de calor, W/(m ² ·K)
H	entalpia específica, kJ/kmol
Δ_{vap}H	entalpia de vaporização, kJ/kmol
IV	infravermelhos
k	condutividade térmica, W/(m·K)
L	comprimento específico, m
m	massa, kg
mol %	percentagem em mol
M	massa molar, g/mol
m/v	massa de soluto por volume de solução, kg/L
n	quantidade de substância, mol
Nu	número de Nusselt
P	pressão total, Pa
P10	“peso 10” (massa de 10 <i>chips</i>), g
Pil	Pilotos
Pr	número de Prandtl
Q	quantidade de calor, kJ
Q_R	calor emitido por radiação, W
q_m	caudal mássico, kg/h
q_M	caudal molar, kmol/h
q_v	caudal volumétrico, m ³ /h
QT	queimadores tubulares
PCI	poder calorífico inferior do gás natural, kJ/Nm ³
PCS	poder calorífico superior do gás natural, kJ/Nm ³
PTN	condições de pressão e temperatura normais (101 325 Pa; 0,0 °C)

r.p.m.	rotações por minuto
R	constante dos gases perfeitos, $\text{m}^3 \cdot \text{Pa} / (\text{K} \cdot \text{mol})$
Ra	número de Rayleigh
Re	número de Reynolds
t	tempo, s; temperatura, °C
t_{expo}	tempo de exposição do produto aos queimadores infravermelhos, s
t_{resid}	tempo de residência, s
T	temperatura absoluta, K
TI	tapete inferior
TM	tapete médio
TS	tapete superior
v	velocidade, m/s
V	volume, m^3
V_m	volume molar, m^3/kmol
W	humidade (base húmida) das <i>tortilla chips</i> , kg/kg
X	humidade (base seca) das <i>tortilla chips</i> , kg/kg

LETRAS GREGAS

β	coeficiente de expansão cúbica, K^{-1}
β_o	rácio entre o diâmetro do orifício e o diâmetro da tubagem
Δ	diferença finita de uma propriedade
ε	emissividade
μ	viscosidade cinemática, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
ρ	densidade mássica, kg/m^3
σ	constante de Stefan-Boltzmann, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
Σ	somatório

EXPOENTES

—	valor médio
'	fluxo
E	quantidade de excesso
for_n	condições do fornecedor de gás natural (101 325 Pa; 15,0 °C)
PTN	condições de pressão e temperatura normais (101 325 Pa; 0,0 °C)
ref	condições de referência (101 325 Pa; 25,0 °C)

ÍNDICES

∞	condição longe da superfície
cond	referente à transferência de calor por condução
conv	referente à transferência de calor por convecção

ext	condição no exterior da tubagem
est	estrutura do forno
esteq	estequiométrico
evap	evaporado
ex	exaustão
f	condição à saída
f	filme
gc	gases de combustão
GN	gás natural
i	condição à entrada
i	componente
int	condição no interior da tubagem
IV	infravermelhos
l	estado líquido
L	comprimento específico
máx	máximo
mín	mínimo
mg	mistura de gases
O	referente ao orifício
Pil	pilotos
sec	secundário
tap	tapete
tot	total
TC	<i>tortilla chips</i>
TI	tapete inferior
TM	tapete médio
TS	tapete superior
s	condição na superfície
S	sólido
v	fase de vapor
x	cada secção da estrutura do forno
z	cada sistema de queimadores e pilotos

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

Pre-Columbian people respected maize and treated it with elaborate etiquette.

*Women carefully blew on kernels before placing them in the cooking pot
to give them courage for confronting the fire.²*

Jeffrey M. Pilcher em *¡Qué Vivan los Tamales!: Food and the Making of Mexican Identity*

1.1. PROCESSO DE FABRICO DE TORTILLA CHIPS

1.1.1. Contextualização histórica

A lenta domesticação do milho, que se terá iniciado há 8000-10 000 anos³ na região da Mesoamérica a partir do teosinto³⁻⁶, foi o germinar de um intenso processo coevolutivo que atingiu o seu auge com o florescimento das grandes civilizações do Novo Mundo, desde os olmecas (há 3500 anos) aos mexicas (há 700 anos).^{3,5,7-9}

Para tornar o milho comestível e digerível, a mulher pré-colombiana, enquanto responsável pela recolha, armazenagem e preparação dos alimentos⁵, teve que criar e desenvolver um processo tecnológico que removesse o duro pericarpo: o milho seco (ao sol) era cozido num recipiente cerâmico (*cazuela*) com uma solução de cinzas de fogueira¹⁰⁻¹¹ ou de cal (cerca de 1% da massa de milho), na proporção de 1:2 (*m/v*), a cerca de 80 °C, entre 20 e 45 minutos, e deixado em repouso durante a noite¹²; no dia seguinte, o milho cozido (*nixtamal*, da língua *náhuatl*: *nextli* “cinzas de cal” + *tamalli* “massa de milho cozido”)¹³ era lavado com água fresca, duas ou três vezes, para remover o excesso de cal¹², os pericarpos e as impurezas.¹⁴ Era importante que os grãos não fossem cozidos com a água em ebulição porque se tornavam demasiado gelatinosos e pegajosos.¹⁵ Este método de cozedura alcalina (nixtamalização), além de provocar o amolecimento do grão, e consequentemente facilitar a remoção do pericarpo, intensificava o seu sabor e o seu valor nutricional¹⁵, evitando o desenvolvimento de doenças associadas à subnutrição, como a pelagra ou o raquitismo.^{4-5,8,16-19} Como o milho, quando é consumido no seu estado natural, é nutricionalmente ineficiente, a invenção do processo de nixtamalização representa um dos mais incríveis avanços tecnológicos associados à alimentação humana e constituiu a base do desenvolvimento de todas as civilizações da Mesoamérica.⁵



Figura 1.1. Cultivo e utilização do milho pela civilização huasteca. * À direita, o milho é plantado com a ajuda da coa e cultivado nas *chinampas*; à esquerda, o milho é limpo, cozido, moído e utilizado para fazer *tortillas*. A cena é vigiada, em segundo plano, pela deusa da subsistência (ou do milho), *Chicomecóatl*.

* Painel pertencente a um conjunto de murais intitulados “Epopéia do povo mexicano” pintados por Diego Rivera sobre a história do país, expostos no Palácio Nacional, na Cidade do México, México.

Fonte: Hernández, P. A. Instalaciones Hidráulicas Avanzadas: Introducción-Influencias-Primeros Cultivos. http://editorial.cda.ulpgc.es/instalacion/7_OPTATIVAS/IHA/IHA0_introduccion/IHA03_influencia/IHA031_primeros.htm (consult. 13 abr. 2014).

A família pré-colombiana, como hoje em dia os seus descendentes, consumia o milho principalmente na forma de *tortillas*^{4,11,13,15-16,19}, o que representava cerca de 80% do consumo calórico⁵. Para as preparar, a mulher moía o *nixtamal* lavado num almofariz retangular (*metate*) com um pilão (*metlapilli*), e adicionava água até obter uma massa com a consistência desejada. Esta era depois amassada com as mãos humedecidas na forma de discos (*tortilla*) com 15 a 20 cm de diâmetro, que eram cozinhados num prato de cerâmica (*comal*) assente sobre as chamas, até que os seus dois lados se tornassem amarelos (Figura 1.1).¹⁵ Em algumas regiões da Mesoamérica, como na região de Oaxaca, devido ao clima quente e húmido²⁰, os locais desidratavam as *tortillas* num forno de cerâmica (*comixcal*) para aumentar significativamente a sua durabilidade; se fossem ao forno na sua forma original chamavam-se *tostadas*, se fossem cortadas em pedaços (triangulares ou redondos) chamavam-se *totopos*.¹⁷ Com a introdução do processo de fritura na dieta indígena após a colonização espanhola da Mesoamérica, no século XVI, começaram a fritar-se os *totopos* em óleo ou manteiga²¹ para intensificar o seu sabor — as *tortilla chips* originais.

A primeira ideia de negócio associada à produção de *tortilla chips* surgiu em San Antonio, E.U.A., em 1919, por José Bartolomé Martínez com o objetivo de aproveitar o excesso de produção diária de massa da sua fábrica “Tamalina Milling Company”. Após várias tentativas, a forma triangular foi a escolhida para as *tortilla chips*, porque era a que garantia maior resistência quando se consumiam com molhos.²²

Hoje em dia, o processo industrial de fabrico de *tortilla chips* é, essencialmente, uma interpretação otimizada das várias “operações unitárias” criadas e desenvolvidas pela mulher pré-colombiana.^{11,16-18,23}

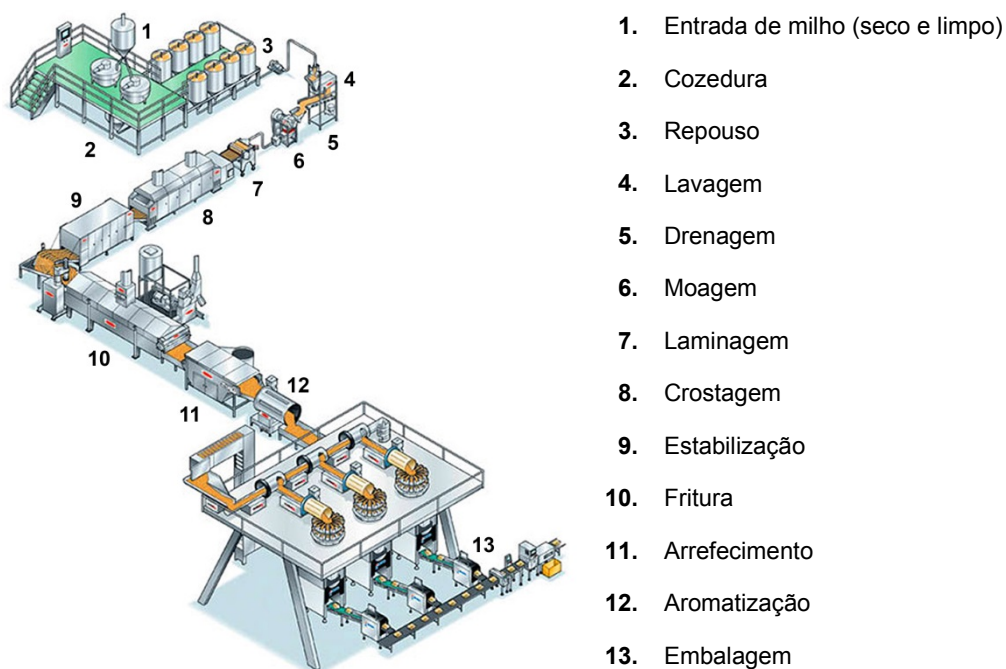


Figura 1.2. Esquema sequencial típico do processo de produção de *tortilla chips*.[†]

[†]Fonte: Heat and Control: Complete Corn & Tortilla Chip System.
<http://www.heatandcontrol.com.au/corn-tortilla-chip-solutions2.asp> (consult. 15 abr. 2014).

Nos próximos subcapítulos será abordado de forma sucinta o processo de produção de *tortilla chips*.

1.1.2. Matéria-prima

A matéria-prima utilizada no fabrico de *tortilla chips* é o milho. As suas especificações à receção na fábrica são as seguintes:

- 100% milho amarelo, por questões de qualidade e de cor do produto final;
- Tamanho uniforme, para minimizar diferenças nos tempos de cozedura;
- Humidade suficiente para evitar danos no grão durante o manuseamento e o desenvolvimento de bolores no armazenamento;
- Livre de contaminações de insetos e de evidências de roedores, por questões de segurança do consumidor;
- Livre de pedras e matérias estranhas, por questões de segurança do consumidor e de custos associados ao possível dano no equipamento;
- Sem grãos de milho danificados, que resultam numa variação do tempo de cozedura e no aumento do risco de presença de aflatoxina (toxina causadora de cancro)²⁴;
- Sem vestígios de germinação, porque causa a rancidez do óleo durante a fritura.

As características do milho afetam os parâmetros e os custos do processo, e a qualidade do produto final.

1.1.3. Limpeza

O objetivo da limpeza é fornecer, de forma contínua, milho de qualidade às operações unitárias seguintes.

O milho é transferido dos silos para a selecionadora, constituída por crivos de diferentes malhas, onde é feita a sua limpeza. Nos crivos são removidos os objetos estranhos e o tamanho do milho é uniformizado, sendo os finos removidos por um sistema de aspiração. O incorreto funcionamento da selecionadora pode afetar a aparência, textura e qualidade do produto final, aumentar o número de reclamações dos consumidores e causar danos no equipamento.

1.1.4. Cozedura e repouso

Os objetivos da cozedura e do repouso são, respetivamente, cozer o milho de forma consistente e prepará-lo, sem os pericarpos e com a humidade adequada, para ser lavado e moído. Estas duas operações unitárias são das mais importantes e influentes, uma vez que têm um impacto direto na eficiência do resto do processo, nas características da massa e na aparência, textura e qualidade do produto final.

O milho limpo é transferido para a *kettle*, onde se encontra a água de cozedura com cal, e a mistura é aquecida e cozida com vapor sob pressão até que a humidade seja suficiente; depois é arrefecida com água fria, homogeneizada e transferida para os tanques de repouso, onde deve permanecer entre o tempo adequado (tempo de repouso) para garantir a humidade correta e evitar o desenvolvimento de micro-organismos. Se o milho absorver pouca água, a massa obtida na moagem terá falta de coesão; se absorver muita água, a massa será pegajosa e irá afetar a quantidade de óleo absorvido na fritura²⁵.

Durante a cozedura, o aumento da temperatura e da humidade provoca o inchaço dos grãos de milho e dá-se a gelatinização do amido (entre 62 e 72 °C)²⁶, resultando num aumento da viscosidade do meio; quando a mistura arrefece abaixo da temperatura de gelatinização, forma-se um gel que irá manter o milho coeso e favorecer a correta moagem.

A cozedura com cal facilita a remoção do pericarpo, controla a atividade microbiana, melhora a absorção de água, aumenta a gelatinização do amido e potencia o valor nutricional do milho, enquanto o processo de repouso distribui a cal e a humidade pelos grãos, melhorando as suas qualidades organolépticas e prevenindo a sua degradação rápida.^{11,27}

1.1.5. Lavagem e moagem

Os objetivos da lavagem e da moagem são, respetivamente, preparar o milho para ser moído e abastecer o processo com um fluxo constante de massa com humidade, temperatura, textura e tamanho de partícula corretos.

Depois da cozedura e do repouso, o milho passa por um tamisador, onde é removido o excesso de água, e por um tambor de lavagem, perfurado e rotativo, onde são removidos o excesso de cal, os pericarpos e os grãos partidos com *sprays* de alta pressão. O milho é transportado para o moinho num tapete de drenagem, ajustado com um tempo de residência suficiente para se obter uma humidade e temperatura adequadas na tremonha de alimentação do moinho.

A moagem transforma os grãos de milho em massa e é realizada no espaçamento (*gap*) entre as duas pedras do moinho (uma estacionária e a outra rotativa) pelos sulcos e ranhuras existentes nas suas superfícies, desde o centro até ao exterior. Juntamente com o milho é adicionada água no moinho — humidade livre, que não se liga ao amido — para evitar o sobreaquecimento das pedras e minimizar o seu desgaste, e para controlar os parâmetros da massa transferida para o laminador: boa textura e consistência e temperatura e humidade adequadas.

Se a temperatura da massa à saída do moinho for elevada, ela será difícil de moldar, obtendo-se *chips* duros e densos, com mais pontos tostados na crostagem e maior absorção de óleo na fritura; se a temperatura for baixa, os defeitos na moldagem da massa aumentam e produzem-se *chips* grossos.

Se a distância entre as pedras do moinho for muito curta, o tamanho de partícula será pequeno, resultando em *chips* finos, com muitas e grandes ampolas, pouca humidade e mais óleo absorvido, devido aos múltiplos intervalos na massa que permitem a saída rápida da água durante a crostagem; se o espaçamento for muito grande, o tamanho de partícula será maior e os *chips* obtidos

terão poucas e pequenas ampolas, textura dura e menos óleo absorvido. Para evitar a variação do tamanho de partícula e a produção de *chips* defeituosos e inconsistentes durante o funcionamento do moinho, o espaçamento entre as pedras é ajustado no arranque e periodicamente durante a produção.

O processo de produção de *tortilla chips* utiliza massa fresca, em vez de massa desidratada, porque é mais barata — apesar de ser processualmente mais caro produzi-la — e os *chips* obtidos têm um sabor mais intenso e agradável, resultante da cozedura alcalina.¹⁷

1.1.6. Laminagem

Os objetivos da laminagem são reduzir uniformemente a espessura da massa, cortá-la na forma desejada com tamanho e “peso 10” (massa de 10 *chips*) corretos, e assegurar uma transição suave entre o tapete do laminador e o tapete superior do forno, minimizando a rejeição de produto.

A massa é transferida da tremonha do moinho para o laminador, onde é uniformemente distribuída entre dois rolos (um dianteiro e outro traseiro), que giram em sentidos contrários e com velocidades diferentes, para formar uma lâmina de massa com a espessura correta. Depois, esta é cortada com a cortadora na forma desejada, e separada do rolo dianteiro por um fio tenso e transferida suavemente para o tapete do laminador e depois para o do forno.

O espaçamento entre os dois rolos é crítico para a produção dos *chips* e é ajustado com base no “peso 10” especificado para a saída do laminador: se o “peso 10” for superior, os *chips* obtidos terão muitas e grandes ampolas, textura plástica e baixa humidade; se o “peso 10” for inferior, os *chips* serão lisos e duros, com poucas e pequenas ampolas, e com elevada humidade.

A taxa de produção (*throughput*) da linha de *tortilla chips* é definida pela velocidade do rolo dianteiro do laminador e pelo espaçamento entre os dois rolos.

1.1.7. Crostagem e estabilização

Os *chips* crus devem entrar direitos, lisos e separados no tapete superior do forno, para que sejam devidamente crostados durante o tempo de residência especificado. O forno é constituído por três tapetes transportadores (*conveyor belts*), que circulam progressivamente em sentidos opostos, e por dois volteadores:

- Tapete superior: inicia a secagem das superfícies superior e inferior dos *chips*;
- Primeiro volteador: transfere os *chips* para o tapete médio;
- Tapete médio: continua a secagem da superfície superior dos *chips*;
- Segundo volteador: transfere os *chips* para o tapete inferior;

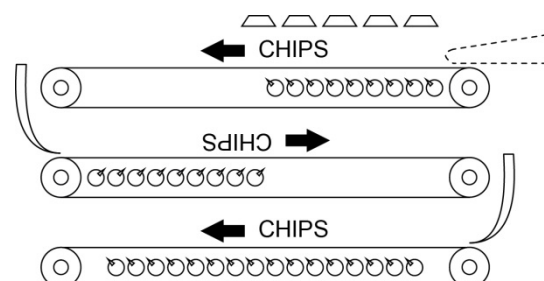


Figura 1.3. Sentido e disposição dos *chips* no interior do forno (vista lateral esquerda).

- Tapete inferior: completa a secagem da superfície inferior dos *chips*.

No forno, o calor é transferido para os *chips* de três formas:

- Radiação: calor com origem principal nos queimadores infravermelhos (IV) — emitem radiação nesse comprimento de onda — dispostos por cima do tapete superior, que afeta a superfície superior dos *chips*;
- Condução: calor com origem nos queimadores tubulares (QT) dispostos debaixo de cada tapete, transferido no contacto dos *chips* com as malhas quentes dos tapetes;
- Convecção: calor com origem principal na circulação de ar quente, que entra pelas aberturas existentes no fundo do forno, atravessa verticalmente os tapetes onde se encontram os *chips* e sai pelas chaminés no topo.

A secagem que ocorre no forno é um processo de redução da humidade da superfície dos *chips* crus, e acontece de duas formas: crostagem, que consiste na secagem da superfície exterior dos *chips* através do calor dos queimadores tubulares e infravermelhos, selando alguma água no seu interior, e tostagem, que consiste na secagem da superfície inferior dos *chips* pelo contacto com os tapetes do forno. A secagem correta dos *chips* crus no tapete superior garante que estes não se colam e se obtém uma boa transição no primeiro volteador.

As ampolas são criadas no forno, com a retenção de alguma água no interior dos *chips* crostados, e desenvolvidas durante a fritura, quando a água vaporiza e, tendo dificuldade em sair devido à superfície mais seca, expande os *chips*. As ampolas não se formam se não há crostagem suficiente para selar a água no interior dos *chips* ou no caso de tostagem excessiva, quando se evapora demasiada água. As ampolas são um atributo positivo do produto.

Os pontos tostados são criados quando os *chips* crus entram em contacto com o tapete quente do forno (calor transferido por condução), ficando gravado o padrão da malha na superfície inferior. A condutividade térmica dos *chips*, que varia com o teor de humidade (b.s.), contribui para a formação dos pontos tostados, mas é na temperatura de trabalho do tapete superior que reside o ponto de controlo principal. Os pontos tostados são um atributo negativo do produto que afetam o seu sabor e a qualidade visual, e não são desejados.

Os *chips* enrolados ou aglomerados, criados por defeitos no laminador, pela secagem incorreta no tapete superior ou por uma má transição no primeiro volteador, são rejeitados e removidos do fluxo do produto pelo *masa lump spinner*, colocado à saída do forno, no final do tapete inferior.

As temperaturas de trabalho dos tapetes controlam a crostagem, os pontos tostados e o desenvolvimento de ampolas, e devem ser ajustadas para se obter a humidade e o “peso 10” corretos à saída do forno. A minimização dos pontos tostados nos *chips* é conseguida com o controlo da variação da temperatura ao longo da largura dos tapetes.

A crostagem, sendo a operação unitária estudada no presente trabalho, será abordada com maior detalhe no subcapítulo 1.2, página 8.

Depois da crostagem, os *chips* são transportados num tapete elevador para o condicionador (*proofers*), que os prepara para a fritura. O condicionador é constituído por três tapetes

transportadores e permite que os *chips* arrefeçam e estabilizem o teor de humidade, durante um tempo de residência adequado, não realizando qualquer processamento adicional sobre o produto. Os tapetes são progressivamente mais lentos para evitar a acumulação no tapete superior, onde o produto ainda está quente.

1.1.8. Fritura

Os objetivos da fritura são produzir *chips* com teores de humidade e óleo finais corretos, e textura crocante formada pelas ampolas iniciadas no forno.

A fritadeira é constituída pela cuba que contém o óleo, pelos transportadores de produto, pela tampa e pela chaminé que permite a saída de fumos e a sua ventilação.

Os *chips* pouco crostados no forno terão uma textura final quebradiça, enquanto os demasiado crostados terão uma textura dura.

A qualidade do óleo afeta o sabor e a frescura do produto embalado, e o seu próprio rendimento. Antes de cada utilização a qualidade do óleo é verificada, uma vez que se degrada com o calor, a humidade, o oxigénio e o tempo, e quando necessário, óleo novo é misturado com o usado para maximizar a sua utilização.

O tempo de residência do produto na fritadeira e a temperatura do óleo estão relacionados diretamente com o teor final de óleo nos *chips* e inversamente com o teor final de humidade.²⁸⁻²⁹ O teor final de óleo é afetado pelo tipo de milho utilizado, pelos procedimentos na cozedura, pela granulometria obtida na moagem, pela espessura resultante da laminagem (“peso 10”), pelos tempos de residência no forno, no condicionador e na fritadeira, pela qualidade e temperatura do óleo utilizado e, principalmente, pelo teor de humidade dos *chips* antes da fritura.^{28,30} Primeiramente, o óleo entra nos espaços vazios da estrutura dos *chips*, mas à medida que a evaporação da água existente progride, criam-se novos espaços (com pressão negativa) que forçam a entrada de mais óleo.³¹

1.1.9. Arrefecimento e aromatização

Os objetivos do arrefecimento e da aromatização são, respetivamente, o controlo da temperatura dos *chips* e a aplicação, de forma uniforme e consistente, da quantidade de aroma correta para alcançar as características que se pretendem nos *chips* finais.

Os *chips* saídos da fritadeira são arrefecidos num *cooler* com ar ambiente da fábrica, que atravessa verticalmente o tapete do transportador, para permitir que os conteúdos de óleo e de humidade estabilizem. Estes são determinados por um sensor que utiliza luz infravermelha, podendo o produto ser automaticamente rejeitado se os valores se encontrarem fora de especificação.

A aromatização é a última operação unitária antes da embalagem e consiste na aplicação de aroma nos *chips*, num tambor de aromatização, sendo o tempo de residência ajustado pela inclinação do mesmo. O aroma é aplicado com uma fina névoa de óleo pulverizado (*spray*) para incentivar a adesão à superfície dos *chips* e melhorar a eficiência da aromatização.

1.2. CROSTAGEM

1.2.1. Objetivos

Os objetivos da operação de crostagem são os seguintes:

- Aumentar a resistência estrutural dos *chips* crus, para manterem a forma e evitar que se dobrem ou enrolem;
- Crostar corretamente as duas superfícies dos *chips*, aprisionando alguma água no interior;
- Criar ampolas nos *chips*;
- Produzir *chips* sem pontos tostados;
- Produzir *chips* sem marcas de queimaduras.

1.2.2. Qualidade dos *chips*

A crostagem influencia as características das *tortilla chips* em três parâmetros:

- Sabor: a crostagem enaltece o sabor alcalino dos *chips* e influencia a quantidade de óleo absorvido na fritadeira;
- Textura: a crostagem cria ampolas nos *chips*, que originam uma textura estaladiça;
- Aparência: a crostagem dá à massa firmeza estrutural, ajudando a manter a forma plana dos *chips* e evitando que se dobrem ou enrolem.

1.2.3. Equipamento

A crostagem dos *chips* é realizada num forno com um *heat input* de 3 900,0 MBTU/h (4 113,0 MJ/h) para uma pressão de gás natural de entrada de 21 inH₂O (5226 Pa).

A estrutura exterior do forno é em aço inoxidável polido, encontrando-se as portas e o teto isolados, e os três tapetes transportadores são de aço com alto teor em carbono, de forma a serem resistentes a altas temperaturas e à utilização intensiva. O forno exhibe duas chaminés de exaustão, contrapesos para manter os tapetes tensos, um tabuleiro de recolha de *chips* rejeitados à saída (*catch pan*) e um sistema que permite elevar a tampa e aceder aos queimadores infravermelhos.

Para o forno funcionar corretamente — uma média de 20 horas por semana durante todo o ano — as seguintes características devem obrigatoriamente ser garantidas durante a sua operação e a sua manutenção³²:

- Manter as temperaturas de cada tapete próximas do *set point*;
- Manter os tapetes centrados;
- Variação mínima da temperatura ao longo da largura dos tapetes;

- Fornecer calor suficiente para a capacidade programada;
- Tempo de residência adequado ao produto;
- Sistema de pilotos fiável;
- Fácil acesso aos queimadores para reparação ou substituição.

O forno contém queimadores tubulares, distribuídos por debaixo de cada um dos três tapetes, e queimadores infravermelhos, distribuídos por cinco filas, localizados por cima do tapete superior. Conjuntamente com os restantes aspetos técnicos do forno, os sistemas de queimadores e de pilotos serão abordados com maior detalhe no Capítulo 2, página 13.

O forno trabalha em pressão negativa para impedir que os gases de combustão saiam da estrutura e entrem na zona de operação, podendo representar riscos para a saúde dos operadores.

1.2.3.1. Ajustes nos tapetes e nas temperaturas

Para que os todos os *chips* sejam corretamente crostados, os tapetes do forno devem permanecer constantemente centrados, com a ajuda de guias cerâmicas ou guias de rolamentos, nas chamas dos queimadores tubulares.

O aquecimento dos três tapetes tem como origem principal o calor fornecido pelos queimadores tubulares existentes debaixo de cada um deles e como origem secundária o calor transferido por convecção, de baixo para cima, e por radiação, a partir dos queimadores infravermelhos. Se a temperatura do tapete superior é elevada, os *chips* produzidos podem ter muitos pontos tostados, a superfície inferior muito crostada e ausência de ampolas; se é baixa, os *chips* crus podem-se colar ao tapete, enrolar ou carbonizar e aumentar a rejeição de produto à saída do forno. Se a temperatura do tapete médio é elevada, os *chips* podem ter poucas e pequenas ampolas, a superfície superior muito crostada e marcas de queimaduras, que podem resultar num mau sabor; se é baixa, os *chips* podem ter ampolas disformes e a superfície superior pouco crostada. Se a temperatura do tapete inferior é elevada, os *chips* podem ter ampolas em excesso, marcas de queimaduras e a superfície inferior muito crostada; se é baixa, os *chips* podem ter poucas ampolas e a superfície inferior pouco crostada.

A variação de temperaturas ao longo da largura de cada tapete deve ser inferior a 12 °C.

1.2.3.2. Ajustes na intensidade dos infravermelhos

Se a intensidade dos infravermelhos é elevada, os dois lados dos *chips* podem ter pontos tostados; se é baixa, a superfície superior pode ficar pouco crostada e os *chips* podem colar-se no primeiro volteador, podendo causar aglomerados e aumentar a rejeição de produto à saída do forno.

1.2.3.3. Tempos de residência e de exposição

Os três tapetes são controlados por um motor comum, não podendo a sua velocidade ser ajustada individualmente, mas apenas o total combinado. O tapete inferior (TI) tem uma velocidade 10% superior à do tapete médio (TM) e a deste é 10% superior à do tapete superior (TS).

Tabela 1.1. Dimensões e características dos tapetes do forno.

Tapete	Largura (m)	Comprimento (m)	N.º de dentes ^a	t_{resid}^b (s)	r.p.m.	v_{tap}^c (m/s)
TS	1,07	5,75	30	6,6	52,6	0,9
TM	1,07	5,70	27	5,9	58,0	1,0
TI	1,07	5,70	24	5,2	65,2	1,1
Total				17,7		

^aNúmero de dentes da roda dentada de cada tapete.

^bTempo de residência de produto em cada tapete.

^cVelocidade de cada tapete.

Tabela 1.2. Dimensões do sistema de queimadores infravermelhos e tempo de exposição.

Largura (m)	Comprimento (m)	t_{expo}^c (s)
1,06	2,85	3,3

^cTempo de exposição do produto aos queimadores infravermelhos.

Na Tabela 1.1 o tempo de residência do tapete superior foi determinado com uma média de observações e os dos demais tapetes com base no rácio entre o número de dentes da roda movida e o da roda motora. A velocidade dos tapetes e as r.p.m. foram determinadas com base no comprimento dos tapetes e nos tempos de residência anteriormente obtidos. Na Tabela 1.2 o tempo de exposição foi determinado com base na relação entre o comprimento do tapete superior e o comprimento do sistema de queimadores infravermelhos.

Se os tempos de residência e de exposição do produto forem elevados, os *chips* podem ficar muito crostados, o que inibe a formação de ampolas, e ter marcas de queimaduras; se forem baixos, os *chips* podem ficar pouco crostados, o que resulta na ausência de ampolas e em maior absorção de óleo na fritadeira, uma vez que os *chips* têm maior teor de humidade.

Por questões de segurança, desde o arranque, o movimento dos tapetes é constantemente detetado por sensores óticos, sendo o forno automaticamente desligado em caso de anomalia.

1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO

O presente trabalho insere-se num quadro de otimização regular das variações de temperaturas ao longo da largura dos três tapetes do forno, uma vez que o seu controlo está diretamente relacionado com a qualidade da crostagem e do produto final. Optou-se, no entanto, por expandir o trabalho para uma otimização geral do forno, abrangendo resultados a nível técnico, económico e ambiental. Os objetivos do trabalho são, por isso, os seguintes:

- Acerto das temperaturas ao longo da largura dos tapetes;
- Diminuição de pontos tostados;
- Melhorar a caracterização do forno;
- Melhorar a monitorização e manutenção do forno;
- Análise e otimização energética;
- Introdução e sugestão de novas ferramentas de operação;
- Análise multivariada de dados existentes.

CAPÍTULO 2. FORNO

(...) que me aproximo, (...) a cálculo lírico infundido nas lides de ar e fogo, (...) ³³

Herberto Helder em *A Faca Não Corta o Fogo*

2.1. COMBUSTÃO

2.1.1. Gás natural

O forno utiliza como combustível o gás natural (GN). A composição e as propriedades do gás natural fornecido à fábrica são disponibilizadas diariamente no sítio da REN³⁴. Como os balanços mássico e entálpico ao forno foram determinados nas condições obtidas no dia 11 de abril de 2014, os dados consultados são referentes a esse dia.

Tabela 2.1. Composição do gás natural fornecido à fábrica, no dia 11 de abril de 2014.

Composto	mol %
metano (CH ₄)	91,99
etano (C ₂ H ₆)	5,97
propano (C ₃ H ₈)	1,34
isobutano (C ₄ H ₁₀)	0,22
n-butano (C ₄ H ₁₀)	0,22
neopentano (C ₅ H ₁₂)	0,00
isopentano (C ₅ H ₁₂)	0,03
n-pentano (C ₅ H ₁₂)	0,01
N ₂	0,23
CO ₂	0,00
Total	100,00

Tabela 2.2. Propriedades do gás natural fornecido à fábrica, no dia 11 de abril de 2014.

Propriedade	Valor
PCS ^a	11,9 kWh/Nm ^{3c}
PCI ^b	10,7 kWh/Nm ³
Densidade normal	0,78 kg/Nm ³
Densidade relativa	0,61

^aPoder calorífico superior.

^bPoder calorífico inferior.

^cN é de condições PTN: 101 325 Pa; 0,0 °C.

O PCS é a energia máxima libertada pela combustão completa de um combustível, neste caso gás natural, a 25,0 °C, considerando a água dos produtos de reação no estado gasoso, enquanto o PCI considera a água no estado líquido.

Para a composição apresentada na Tabela 2.1, o gás natural tem uma massa molar de 17,48 g/mol e uma temperatura teórica de chama de 2068,6 °C.

Por especificação, o gás natural deve entrar no forno com uma pressão mínima de 21,0 inH₂O (106 551 Pa). No dia 11 de abril de 2014 a pressão do gás natural era de 107 048 Pa.

O custo do gás natural fornecido é de 0,47 €/m³ (média de 2013), com o volume nas condições do fornecedor (101 325 Pa; 15,0 °C).

2.1.2. Ar

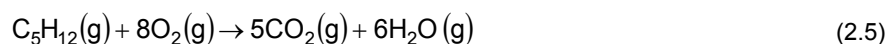
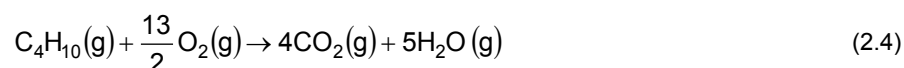
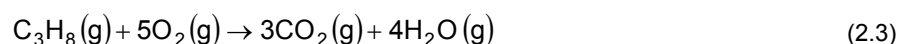
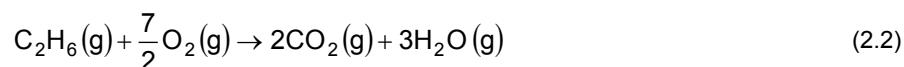
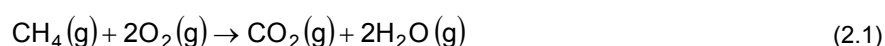
A composição do ar “puro” e seco é constante, e é dada na seguinte tabela para os dois principais constituintes:

Tabela 2.3. Composição do ar “puro” e seco.³⁵

Composto	mol %
O ₂	20,95
N ₂	78,08

2.1.3. Reações

O processo de combustão foi simplificado, tendo-se utilizando apenas as reações completas dos hidrocarbonetos constituintes do gás natural:



O rácio estequiométrico de Ar/GN é 10,3 kmol Ar/kmol GN e foi determinado pela expressão seguinte, com base nos valores apresentados na Tabela 2.1 e na Tabela 2.3:

$$\text{Ar/GN}_{\text{esteq}} = \frac{2(\% \text{CH}_4)_{\text{GN}} + 7/2(\% \text{C}_2\text{H}_6)_{\text{GN}} + 5(\% \text{C}_3\text{H}_8)_{\text{GN}} + 13/2(\% \text{C}_4\text{H}_{10})_{\text{GN}} + 8(\% \text{C}_5\text{H}_{12})_{\text{GN}}}{(\% \text{CH}_4)_{\text{GN}} + (\% \text{C}_2\text{H}_6)_{\text{GN}} + (\% \text{C}_3\text{H}_8)_{\text{GN}} + (\% \text{C}_4\text{H}_{10})_{\text{GN}} + (\% \text{C}_5\text{H}_{12})_{\text{GN}}} \cdot \frac{1}{(\% \text{O}_2)_{\text{Ar}}} \quad (2.6)$$

2.2. SISTEMAS DE QUEIMADORES E PILOTOS

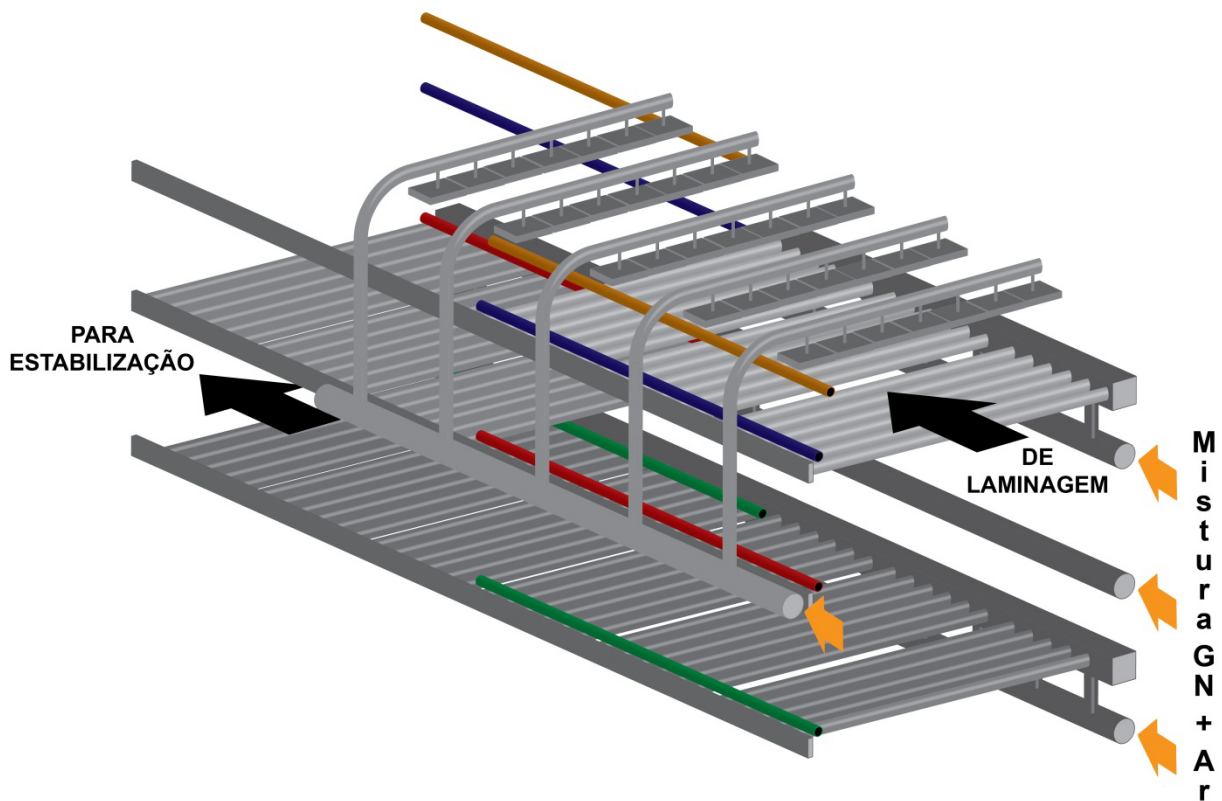


Figura 2.1. Visualização 3D das estruturas dos sistemas de queimadores e pilotos do forno.

2.2.1. Queimadores infravermelhos

Os queimadores infravermelhos do forno estão localizados por cima do tapete superior. Estes designam-se *Metal Fibre Burner (MFB)* e consistem, em termos gerais, numa estrutura de aço inoxidável com uma entrada para o gás natural pré-misturado com o ar e uma fibra permeável na superfície de uma liga de aço refratário

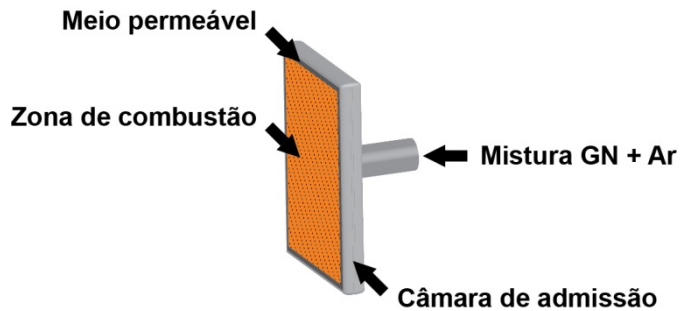


Figura 2.2. Constituição dum queimador infravermelho MFB.

(emissividade de 0,7). A combustão, que ocorre em toda a superfície devido a um sistema de distribuição interna da mistura gás natural-ar, aquece a fibra porosa até à incandescência (cor vermelho-alaranjada) e parte da energia introduzida é emitida como radiação térmica. Este modo radiante acontece até uma intensidade de radiação de 800 kW/m^2 .

As vantagens da utilização deste tipo de queimadores na indústria alimentar, principalmente na de *tortilla chips*, são a resistência à oxidação a altas temperaturas, a rapidez de aquecimento/arrefecimento, as baixas emissões de gases de combustão nocivos e o baixo comprimento de onda da radiação infravermelha, que não consegue penetrar nos *chips* e seca apenas a sua superfície, aprisionando água no seu interior.

Os queimadores infravermelhos necessitam de ser substituídos quando surgem áreas escuras

na fibra durante o funcionamento ou quando esta se danificar.

A entrada da mistura gás natural-ar no sistema de queimadores infravermelhos é realizada pelo lado esquerdo do forno (Figura 2.1), em relação ao fluxo do produto.

Tabela 2.4. Dimensões dos componentes dos queimadores infravermelhos *MFB*.

Componente	Largura (cm)	Comprimento (cm)	A _s ^a (cm ²)
Estrutura	14,6	19,6	—
Fibra	13,4	18,4	246,6

^aÁrea da superfície dos queimadores *MFB*.

2.2.2. Queimadores tubulares

Os queimadores tubulares do forno estão localizados debaixo de cada tapete. As chamas devem ser cónicas, firmes e bem definidas, de cor azul-clara, e ter um cone interior azul-esverdeado com 1/3 da sua altura, sendo a dimensão variável de acordo com a quantidade de combustível fornecido. Estas características das chamas devem-se à utilização no forno de combustível pré-misturado com ar. Pontualmente poderão surgir algumas chamas amarelas na abertura dos queimadores.

Por especificação, os queimadores tubulares são orientados num ângulo de 45° no sentido da deslocação do tapete que aquecem, de forma a evitar que as chamas toquem no mesmo ou entrem em contacto direto com o produto, o que poderia aumentar a intensidade dos pontos tostados ou as marcas de queimaduras nos *chips*.

Para funcionarem corretamente os queimadores tubulares devem obedecer às seguintes características³⁶:

- Queimar completamente o gás natural;
- Distribuição uniforme da chama ao longo do queimador;
- Boa ignição e rápida propagação da chama ao longo do queimador;
- Evitar a interrupção ou o retorno da chama (*flashback*);
- Evitar que a chama se propague para longe da abertura do queimador;
- Construção robusta, capaz de resistir a aquecimentos e arrefecimentos intensos.

As alterações na composição do gás natural e nas suas propriedades não devem condicionar o funcionamento dos queimadores tubulares.

Os queimadores tubulares repartem-se por três sistemas independentes, um por cada tapete, com linhas e fluxos autónomos de gás natural e de ar (ver subcapítulo 2.3.3, página 19), o que garante maior controlo da crostagem dos *chips* e melhor operacionalidade do forno.

Os queimadores tubulares do tapete superior localizam-se apenas na primeira metade do forno, os do tapete médio apenas na segunda metade do forno e os do tapete inferior encontram-se

dispostos por todo o comprimento do forno (Figura 2.1).

2.2.2.1. Guias e limitadores

O controlo das variações de temperaturas ao longo da largura dos três tapetes do forno garante que os objetivos da operação de crostagem sejam cumpridos e também a boa qualidade do produto final.

O primeiro método utilizado para controlar a variação de temperaturas ao longo da largura dos tapetes consistia em soldar as aberturas dos queimadores tubulares nas zonas onde a temperatura fosse superior, de forma a reduzi-la. Com o tempo, estas pequenas soldaduras ficavam danificadas devido ao intenso aquecimento e arrefecimento, resultando numa variação térmica dos tapetes fora de especificação (superior a 12 °C) e na necessidade de refazer todo o processo.

Atualmente, o método preferido para regular a variação de temperaturas dos tapetes baseia-se na introdução de guias e limitadores dentro dos queimadores tubulares, para controlar o fluxo de combustível nos mesmos. Se a temperatura é superior no lado direito do forno, que é o lado de entrada da mistura gás natural-ar para os queimadores tubulares, devem ser introduzidas guias para conduzi-la para o lado esquerdo e limitar o aquecimento do lado da entrada; se a temperatura é inferior no lado direito, devem ser introduzidos limitadores para moderar a quantidade de mistura que chega ao lado esquerdo e aumentá-la no lado da entrada (ver subcapítulo 3.2, página 29).

Estas intervenções estruturais têm a mesma durabilidade que os queimadores tubulares e a vantagem, em relação ao método anteriormente utilizado, de não os danificar com a utilização de soldaduras.

2.2.3. Pilotos

Durante o arranque, a chama dos pilotos, que é iniciada por uma faísca, promove a ignição das chamas dos queimadores tubulares e infravermelhos.

Os oito pilotos estendem-se ao longo do forno e de todos os queimadores (tubulares e infravermelhos), mas dividem-se em duas zonas: na primeira metade do forno, localizam-se quatro pilotos no lado esquerdo; na segunda metade, localizam-se outros quatro no lado direito (Figura 2.1).

É importante referir que a ignição segura e imediata dos queimadores está intimamente relacionada com a correta localização dos pilotos em relação aos mesmos. No entanto, o local escolhido deve evitar que sejam danificados pelas chamas dos queimadores.

Por questões de segurança, as chamas dos oito pilotos mantêm-se ligadas durante a produção e são constantemente detetadas por sensores óticos, sendo o forno automaticamente desligado em caso de anomalia.

2.3. SISTEMAS DE MEDIÇÃO E CONTROLO

2.3.1. Medidor principal de caudal de gás natural

O medidor principal de caudal de gás do forno é do tipo vórtice cadente. No seu interior existe uma obstrução que provoca a divisão do fluxo em duas partes, causando instabilidades e formando vórtices à sua volta. Depois do obstáculo, a frequência destes vórtices é determinada por variações periódicas da pressão e é proporcional à velocidade do fluido, sendo o *K-factor* a constante que relaciona essa proporcionalidade. Este apenas depende das geometrias do obstáculo e do interior do medidor.

Os medidores de vórtice são muito versáteis porque, apesar de serem calibrados com água, podem ser utilizados com gás, vapor ou líquido, uma vez que o *K-factor* é independente da densidade ou do tipo de fluido utilizado e, por isso, o seu valor será constante para o mesmo medidor.

Tabela 2.5. Características do medidor de caudal de gás natural do forno.³⁷

D_{int}^a (mm)	v_{min} (m/s)	$q_{v,min}$ (m ³ /h)	$v_{máx}$ (m/s)	$q_{v,máx}$ (m ³ /h)	<i>K-factor</i> (pulsos/L)	<i>K-factor</i> [Hz/(m ³ /h)]
25,7	7,7	14,3	80,0	149,4	68,0	19,8

^aDiâmetro interior do medidor principal de caudal.

O intervalo de velocidade apresentado corresponde à escala em que o medidor consegue transmitir sinal analógico. Todavia, o medidor tem uma escala de utilização máxima de 0-6292 ft³/h (0,0-178,2 m³/h), inscrita na lateral do aparelho.

Os caudais volumétricos apresentados na Tabela 2.5 foram determinados pela equação (2.8) e resultam da multiplicação entre a velocidade do fluido dentro do medidor (constante) e a área perpendicular à direção do fluxo, A_p :

$$q_v = vA_p \quad (2.7)$$

e

$$= v \frac{\pi D_{int}^2}{4} \quad (2.8)$$

2.3.2. Sensores de temperatura

O forno possui três sensores de temperatura, um por cada tapete, que detetam a radiação infravermelha emitida pela superfície dos mesmos (pirómetros). Os sensores estão localizados na estrutura exterior do forno, fora da zona de aquecimento, e conseguem realizar uma medição precisa da temperatura dos tapetes porque se encontram calibrados para a sua emissividade (Tabela 3.1).

Os dados do sensor de cada tapete são transmitidos para um controlador que atua na respetiva válvula de borboleta da tubagem de entrada de ar. O regulador de pressão de gás deteta esta variação e altera o fluxo de combustível que é distribuído para os queimadores tubulares debaixo de cada tapete, de forma a manter a sua temperatura constante (ver subcapítulo 2.3.3, página 19). Esta técnica melhora o controlo das temperaturas dos tapetes e a qualidade da crostagem dos *chips*.

Uma das maiores vantagens da utilização deste tipo de termómetros na indústria alimentar é a ausência de contacto com a superfície a medir, o que elimina o risco de contaminação do produto.

2.3.3. Válvulas de borboleta e misturadores

O gás natural e o ar entram no forno em tubagens separadas até aos respetivos coletores, onde os fluxos são divididos pelos sistemas de queimadores tubulares, infravermelhos e pilotos.

Na linha de ar de cada sistema de queimadores tubulares existe uma válvula de borboleta que aumenta ou diminui o fluxo de ar, de forma a controlar a quantidade de mistura de combustível para os mesmos, com base nos dados transmitidos pelo sensor de temperatura do respetivo tapete. Se a temperatura está muito baixa, a válvula automaticamente aumenta o fluxo de ar, de modo a aumentar a mistura de combustível; se está muito elevada, a válvula diminui o fluxo de ar e o fluxo de combustível diminui. Um regulador de pressão de gás deteta o fluxo de ar na válvula de borboleta e ajusta automaticamente o fluxo de gás natural, para que o rácio Ar/GN em cada sistema de queimadores tubulares se mantenha constante.

O gás natural é, portanto, fornecido ao forno pré-misturado nos misturadores com parte do ar necessário para a combustão.

Tabela 2.6. Valores padrão de teor de oxigénio e do rácio de ar-gás natural de cada sistema de queimadores.

Sistema de queimadores	O_{2,mg} (% mol)	Rácio Ar/GN (kmol Ar/kmol GN)
IV	O _{2,mg,IV}	9,4-10,5
TS	O _{2,mg,TS}	8,1-9,4
TM	O _{2,mg,TM}	7,7-8,9
TI	O _{2,mg,TI}	7,4-8,5

O rácio Ar/GN é ajustado nos quatro misturadores, e nos pilotos respetivos de cada sistema de queimadores, com base nos valores padrão da Tabela 2.6. Para isso utiliza-se um analisador de gases da marca Testo, modelo 300XL.

Ao contrário dos queimadores tubulares, os infravermelhos recebem fluxos fixos de combustível e de ar, não modulados, que mantêm a sua temperatura constante. Os pilotos recebem também fluxos de gás natural e de ar não modulados, mas o caudal de combustível é variável e dependente do consumo dos sistemas de queimadores. Ou seja, quando os queimadores tubulares se encontram em chama baixa (válvulas de borboleta a 0%) também o caudal da mistura gás natural-ar fornecida aos pilotos é reduzido.

Ao comparar o rácio estequiométrico de Ar/GN determinado anteriormente no subcapítulo 2.1.3 (10,3 kmol Ar/kmol GN) com os valores padrão da Tabela 2.6 conclui-se que a quantidade de ar misturado não é suficiente para atingir a estequiometria da combustão completa do gás natural e que, por isso, a mistura fornecida aos queimadores é rica em combustível. O ar em falta entra no forno pelas aberturas existentes no fundo e participa na combustão misturando-se nas chamas dos

queimadores logo após a ignição. Este ar denomina-se secundário, enquanto o ar de mistura se denomina primário. Os teores de oxigénio são tanto mais baixos quanto mais próximo os respetivos sistemas de queimadores se encontram das aberturas do fundo do forno.

O teor estequiométrico de oxigénio numa mistura de Ar/GN é, portanto, de 19,3%.

2.4. SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO DE AR E EXAUSTÃO DE GASES

2.4.1. Ventilador de alimentação de ar

O ventilador utilizado para alimentar o ar primário para a combustão é do tipo centrífugo. O motor instalado tem uma potência de 7,5 hp, 2850 r.p.m. e eficiência nominal de 86,5%.

O ar primário é obtido no telhado da fábrica e limpo à entrada da tubagem numa grelha porta-filtro.

2.4.2. Ventiladores de exaustão de gases

O forno possui dois ventiladores, um por cada chaminé, para a extração dos gases de combustão. Os ventiladores incluem acionadores de frequência variável, sendo o seu funcionamento controlado no processo com base neste parâmetro (%).

Por especificação, o diferencial de pressão nas duas chaminés de exaustão é negativo e equivale a uma frequência de funcionamento dos ventiladores de 29,0-33,0%.

CAPÍTULO 3. ACERTO DAS TEMPERATURAS NOS TAPETES

*O irradiador aceso espalhava por todo ele uma temperatura deliciosa.*³⁸

Florbela Espanca em *À Margem Dum Soneto*

O processo de acerto das temperaturas ao longo da largura dos tapetes implica, primeiramente, a medição das mesmas com o forno em funcionamento. A única forma de a realizar, com precisão, exatidão, rapidez e segurança, é através da utilização de um termómetro que deteta radiação infravermelha (pirómetro), uma vez que funciona sem contacto com a superfície. Antes da medição, introduziu-se no aparelho utilizado, da marca Fluke, modelo 566, a emissividade do material que compõe a superfície dos tapetes do forno.

Tabela 3.1. Emissividades utilizadas no termómetro de infravermelhos.³⁹⁻⁴⁰

Superfície	Material	ϵ	Gama de temperaturas (°C)
Estrutura do forno	Aço inoxidável, polido	0,30	25
Tapete do forno	Aço com alto teor em carbono, oxidado	0,90	315-1090
<i>Tortilla chips</i>	Comida	0,95	—

Para que a medição da temperatura com o termómetro de infravermelhos seja correta, deve-se proceder de acordo com as seguintes indicações⁴⁰:

- Utilizar um valor de emissividade correto para o material a medir;
- Medir o mais próximo possível da superfície, para evitar a influência de gases ou poeiras no trajeto do infravermelho;
- Medir apenas com a lente do aparelho limpa, evitando a utilização quando existe vapor de água condensado no interior;
- Manter o *laser* apontador, que indica o local e a área de medição, apenas na superfície que se pretende medir;
- Para comparar medições deve-se utilizar sempre a mesma distância e o mesmo ângulo com a superfície.

Para aceder aos três tapetes teve que se retirar parte da estrutura frontal do forno — removível para o efeito —, localizada na saída para a estabilização.

Para comparar as temperaturas registadas criaram-se perfis em cada tapete: os intervalos entre os *chips* (zonas onde se consegue medir a temperatura da superfície) foram numerados da esquerda para direita do forno, no sentido do fluxo do produto (Figura 3.1) e representados com a respetiva temperatura média num gráfico. No tapete médio, devido à ausência de *chips* na zona de medição, por causa do primeiro volteador, optou-se por criar intervalos seguindo uma linha vertical a

partir dos existentes no tapete superior.

As medições foram efetuadas durante a produção de *chips* sem defeitos e a ocuparem toda a largura dos tapetes.

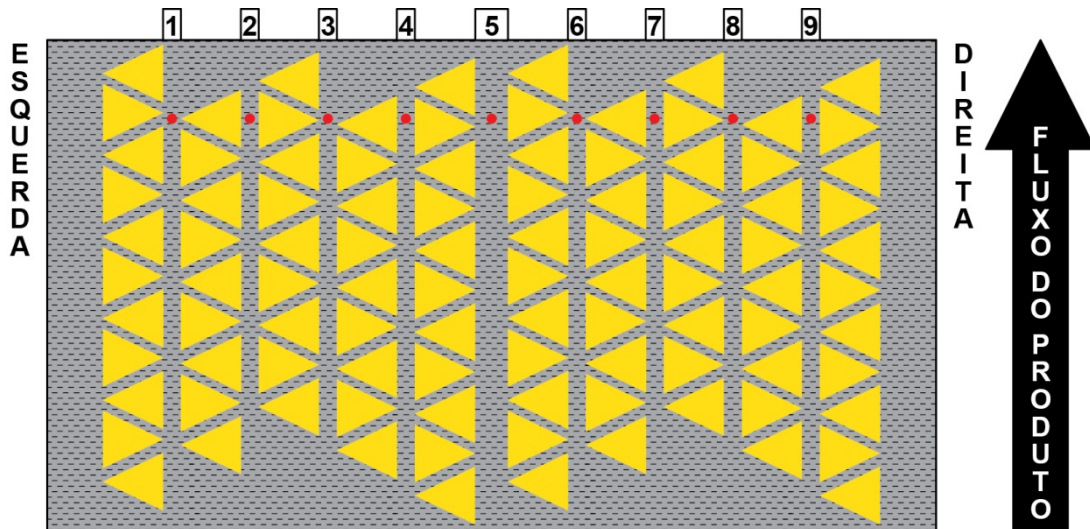


Figura 3.1. Numeração das zonas de medição em relação ao fluxo do produto no forno.

O processo total de acerto de temperaturas foi realizado em 17 intervenções, correspondendo a 17 perfis, e foi dividido em duas fases, consoante o tipo de intervenção realizada no forno:

- 1. Intervenções exteriores (1.º-8.º perfis de temperaturas):** nesta fase deu-se importância à obtenção de relações entre as evoluções em cada perfil de temperaturas obtido e as intervenções de carácter prático e pouco invasivo, como a substituição de queimadores infravermelhos ou melhorias na limpeza do forno;
- 2. Intervenções estruturais (9.º-17.º perfis de temperaturas):** nesta fase valorizaram-se as relações entre as evoluções em cada perfil de temperaturas e as intervenções estruturais no forno (introdução/remoção de guias e limitadores), de forma a desenvolver uma metodologia para a sua aplicação.

Foram também registadas, à entrada e à saída, na zona esquerda, central e direita do forno, as variáveis que estão relacionadas com esta operação unitária: pontos tostados, “peso 10” e humidade (b.h.).

Os dados obtidos nos perfis de temperaturas encontram-se no Anexo A, página A.1.

3.1. INTERVENÇÕES EXTERIORES

3.1.1. Perfil inicial

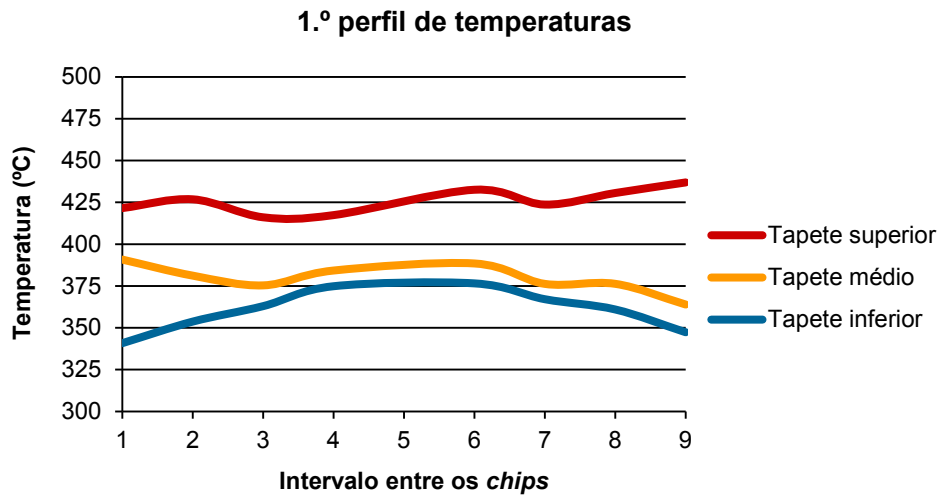


Figura 3.2. Representação das médias das temperaturas observadas no 1.º perfil de cada tapete, em função do intervalo entre os *chips*.

Para garantir a fiabilidade dos resultados, optou-se por uma média de cinco medições de temperatura em cada intervalo.

Tabela 3.2. Resultados obtidos no 1.º perfil de temperaturas.

Tapete	Δ médias ^a (°C)									\bar{t}_{tap} ^b (°C)	$t_{\text{máx}}$ (°C)	$t_{\text{mín}}$ (°C)	Δt (°C)
	Esquerda			Centro			Direita						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Superior	-4,1	1,1	-9,6	-8,3	24,7	6,8	-2,0	4,9	11,2	425,7	436,9	416,1	20,8
Médio	11,2	1,6	-4,2	4,7	18,6	8,9	-3,3	-3,3	-15,6	379,6	390,8	363,9	26,9
Inferior	-19,7	-6,8	2,4	14,3	24,1	16,0	6,6	0,4	-13,2	360,5	376,6	340,8	35,7

^aDiferença entre a temperatura média de cada intervalo e a média de cada tapete.

^bTemperatura média de cada tapete.

3.1.1.1. Pontos tostados

Os pontos tostados foram classificados numa escala (0 a 4) desenvolvida com base na área que ocupam nos *chips* e na sua intensidade (Figura 3.3). Os pontos tostados foram também classificados segundo a sua forma (Figura 3.4).

No final desta 1.ª fase relacionaram-se os dados classificados anteriormente com diferentes temperaturas de trabalho do tapete superior.

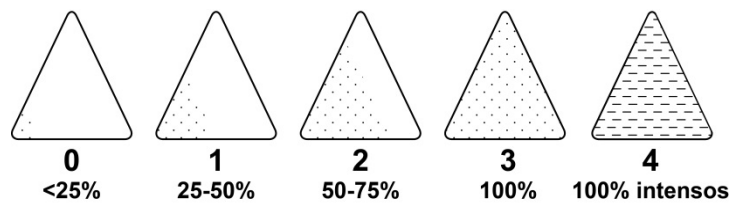


Figura 3.3. Escala de pontos tostados utilizada.

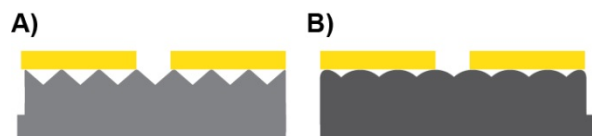


Figura 3.4. Efeito do desgaste do tapete superior do forno na forma dos pontos tostados: A) tapete novo, pontos circulares; B) tapete gasto, pontos largos.

Tabela 3.3. Distribuição (%) da área ocupada pelos pontos tostados numa amostra de 20 *chips* por lado. Resultados respeitantes à 1.^a medição.

Avaliação	Esquerda	Centro	Direita
0	0%	0%	0%
1	0%	15%	0%
2	15%	65%	30%
3	70%	20%	40%
4	15%	0%	30%
Total	100%	100%	100%

Tabela 3.4. Distribuição (%) da forma do ponto tostado numa mostra de 20 *chips* por lado. Resultados respeitantes à 1.^a medição.

Forma	Esquerda	Centro	Direita
Circular	90%	85%	65%
Larga	10%	15%	35%
Total	100%	100%	100%

3.1.1.2. “Peso 10”

As pesagens dos 10 *chips* foram realizadas numa balança de precisão da marca Kern, modelo FKB.

Tabela 3.5. Valores médios de “peso 10” à entrada e saída do forno, e respetiva variação, na 1.^a medição.

Zona	Massa de 10 <i>chips</i> (g)		
	Esquerda	Centro	Direita
Entrada	$P10_i$	$P10_i$	$P10_i$
Saída	$P10_f$	$P10_f$	$P10_f$
$\Delta P10$	$\Delta P10_1$	$\Delta P10_1$	$\Delta P10_1$

3.1.1.3. Humidade

A humidade (b.h.) dos *chips* foi determinada numa balança de secagem da marca Mettler Toledo, modelo HB43.

Tabela 3.6. Valores médios de humidade (b.h.) à entrada e saída do forno, e respetiva variação, na 1.^a medição.

Zona	Humidade (b.h., %)		
	Esquerda	Centro	Direita
Entrada	W_i	W_i	W_i
Saída	W_f	W_f	W_f
ΔW	ΔW_1	ΔW_1	ΔW_1

Assim como a partir do aspeto dos *chips* à saída do forno (ver subcapítulo 1.2.3.1, página 9) se podia deduzir que a temperatura de cada tapete era elevada ou baixa, também a partir da comparação das variações de “peso 10” e de humidade (b.h.) entre a entrada e a saída, em cada um dos lados, se podem obter conclusões semelhantes.

Na Tabela 3.5 a comparação da variação de “peso 10” em cada um dos lados do forno permite concluir que os *chips* perdem, durante a crostagem, mais massa no lado direito. Isto é um reflexo de que as temperaturas são mais elevadas no lado direito do forno e mais baixas no lado esquerdo.

Na Tabela 3.6 a comparação da variação de humidade (b.h.) em cada um dos lados do forno permite as mesmas conclusões efetuadas para a Tabela 3.5: o lado direito do forno é mais quente que o lado esquerdo.

Comparando os resultados da Tabela 3.5 com os da Tabela 3.6 demonstra-se que a variação de “peso 10” dentro do forno é proporcional à perda de humidade dos *chips*.

3.1.2. Medidas corretivas e metodologia

Observando o perfil resultante da 1.^a medição (Figura 3.2), nota-se imediatamente que os três tapetes se encontram fora de especificação da variação máxima de temperaturas. Repare-se na existência de “zonas frias” comuns aos três tapetes, caracterizadas por serem, geralmente, os mínimos relativos da função temperatura (intervalos 3 e 7) e nas zonas onde a amplitude de temperaturas é maior, como o intervalo 1 e o 9, caracterizadas por serem, geralmente, os máximos e mínimos absolutos da função temperatura.

Para complementar a informação visual transmitida pelos gráficos, desenvolveu-se um método rápido e eficiente para comparar as variações das temperaturas nos intervalos estudados (Tabela 3.2). Calculou-se a diferença entre a temperatura registada em cada intervalo e a média do respetivo tapete; depois, coloriu-se a cor de laranja os intervalos com diferença positiva (“zonas quentes”) e a azul os intervalos com diferença negativa (“zonas frias”). O jogo de cores, além de imediatamente indicar os intervalos onde a temperatura é baixa e necessita de ser aumentada, e onde a temperatura é elevada e necessita de ser reduzida, consegue mostrar o perfil de convecção do ar dentro do forno, desde o fundo até ao topo. Na mesma tabela, incluem-se também as temperaturas máximas e mínimas registadas em cada tapete, e o seu diferencial, que é o que se pretende corrigir.

Os dados do intervalo 5 foram rejeitados para a criação dos perfis de temperaturas e para a determinação da variação das mesmas ao longo da largura dos tapetes. Isto relaciona-se com a influência que a largura do espaçamento do intervalo 5, que é quase o dobro da dos outros, tem na temperatura registada e, conseqüentemente, nas comparações dos resultados.

Nesta primeira fase, começou-se por dar prevalência às intervenções no forno menos invasivas e evoluiu-se no sentido da complexidade em termos da necessidade de material e de mão de obra:

1. Ajuste da orientação de todos os queimadores tubulares para um ângulo de 45° no sentido da deslocação do tapete que aquecem;

2. Limpeza exterior, em proximidade, de todos os queimadores tubulares e pilotos;
3. Ajuste dos valores de frequência dos ventiladores das chaminés, para corresponderem à especificação;
4. Substituição de todos os queimadores infravermelhos danificados, ou seja, que apresentavam manchas escuras na fibra durante o funcionamento ou em que a mesma estava danificada.

Os queimadores tubulares foram limpos exteriormente com recurso a uma vareta metálica com um escovilhão de metal na ponta e os pilotos foram limpos com papel de lixa.

Os queimadores infravermelhos foram numerados da direita para a esquerda, no sentido do fluxo do produto. Na primeira intervenção detetaram-se 13 queimadores infravermelhos danificados (37% do total). Até ao final da 1.^a fase foram substituídos mais 6 queimadores.

3.1.3. Perfil final

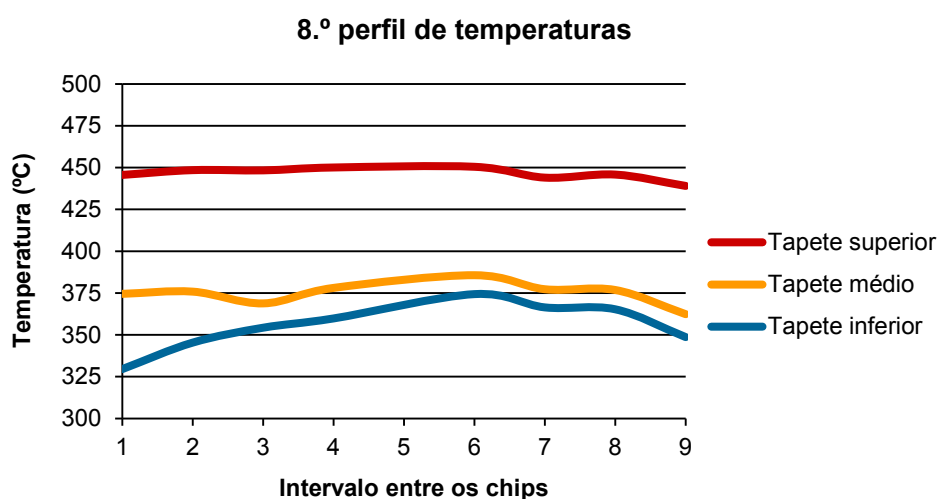


Figura 3.5. Representação das médias das temperaturas observadas no 8.º perfil de cada tapete, em função do intervalo entre os *chips*.

1.º e 8.º perfis de temperaturas

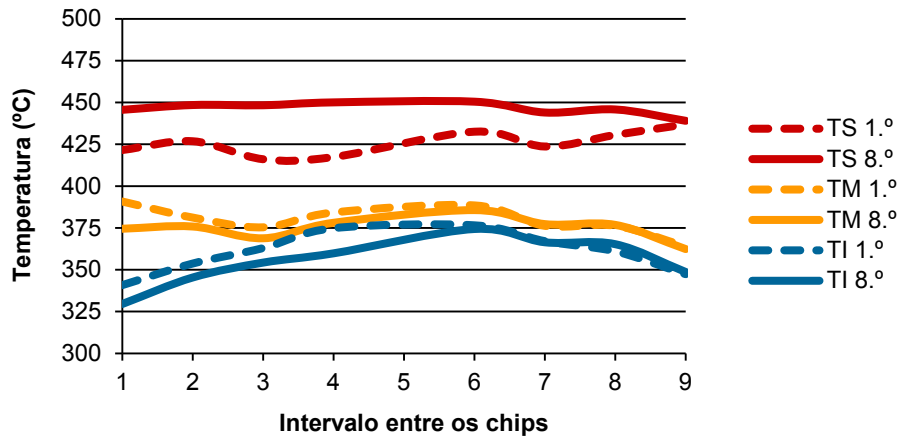


Figura 3.6. Comparação entre o 1.º e o 8.º perfil de temperaturas.

Tabela 3.7. Resultados obtidos no 8.º perfil de temperaturas.

Tapete	Δ médias (°C)									\bar{t}_{tap} (°C)	$t_{\text{máx}}$ (°C)	$t_{\text{mín}}$ (°C)	Δt (°C)
	Esquerda			Centro			Direita						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Superior	-0,9	2,0	1,9	3,6	37,8	4,0	-2,5	-0,7	-7,4	446,5	450,5	439,0	11,4
Médio	-0,4	0,9	-6,1	3,2	22,8	10,7	2,4	1,9	-12,6	374,9	385,7	362,4	23,3
Inferior	-25,9	-10,1	-1,2	4,4	25,1	18,9	11,0	9,8	-6,8	355,5	374,4	329,5	44,8

Observando a figura e a tabela *supra* é notória a correta evolução dos perfis de temperaturas desde a 1.ª medição, nomeadamente no tapete superior, que se encontra já dentro do valor máximo aceitável para a variação (inferior a 12 °C). Estes resultados positivos foram atingidos com a conjugação de todas as intervenções já realizadas, mas são devidos principalmente à substituição de 54% dos queimadores infravermelhos até ao final da 1.ª fase. O acerto de temperaturas dos outros tapetes será conseguido com as modificações estruturais no forno (ver subcapítulo 3.2, página 29).

Com base nos efeitos de cada intervenção da 1.ª fase do acerto de temperaturas dos tapetes do forno, foi possível organizá-las por importância decrescente:

- 1. Substituição de queimadores infravermelhos danificados:** cada um afeta, em média, 3 °C em cada intervalo do tapete superior que é atingido pela radiação;
- 2. Limpeza exterior dos queimadores tubulares e dos pilotos:** melhora ligeiramente o arranque do forno e a distribuição de temperaturas ao longo da largura dos tapetes;
- 3. Ajuste das frequências dos ventiladores de exaustão para os valores especificados:** influencia o perfil de convecção de ar dentro do forno, aquecendo certas zonas dos tapetes e arrefecendo outras;
- 4. Ajuste do ângulo dos queimadores tubulares:** registaram-se variações bimensais devido à vibração constante durante a operação do forno, mas são restringidas às zonas próximas das estruturas interiores que dividem os queimadores em grupos (Figura 2.1).

3.1.3.1. Pontos tostados

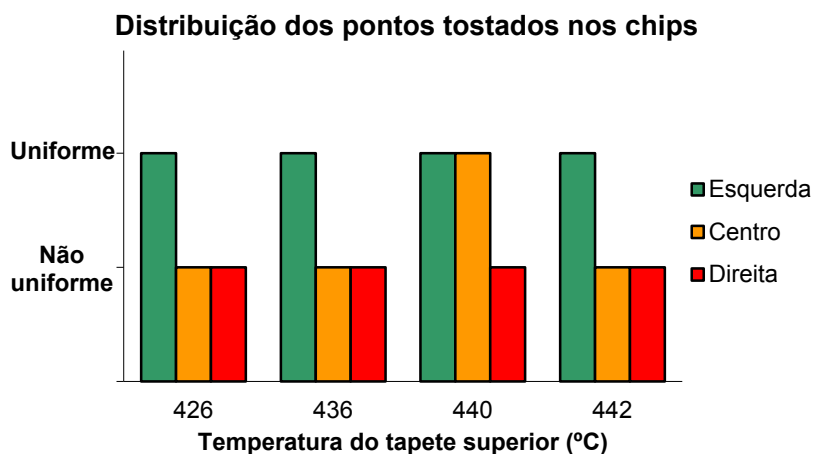


Figura 3.7. Distribuição dos pontos tostados na superfície dos *chips* em função da temperatura de trabalho do tapete superior.

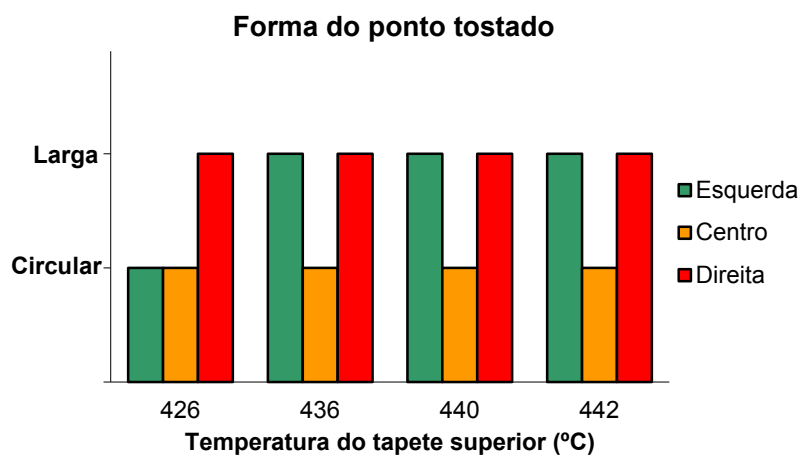


Figura 3.8. Formas dos pontos tostados dos *chips* em função da temperatura do tapete superior.

Na Figura 3.7 considerou-se que uma percentagem de *chips* superior a 50% era representativa do tipo de distribuição. Na distribuição não uniforme incluem-se as avaliações em que os pontos tostados não cobrem a totalidade da área dos *chips* (0 a 2) e na distribuição uniforme as restantes. Na mesma figura não se notam alterações na distribuição dos pontos tostados com o aumento de temperatura do tapete superior. No entanto, os resultados diferentes em cada lado do forno permitem identificar aquecimentos desiguais do tapete, quer devido à má distribuição da chama nos queimadores tubulares, resultante de anteriores intervenções estruturais agora desajustadas, quer devido ao contato intermitente da chama do piloto direito na malha, debaixo dos *chips*.

Na Figura 3.8 considerou-se que uma percentagem de *chips* superior a 30% era representativa da forma de ponto tostado larga, pelo impacto visual que causa no consumidor. Na mesma figura nota-se uma alteração da forma circular para a forma larga, com o aumento da temperatura do tapete superior. Isto deve-se ao aumento da intensidade da chama, que corresponde a uma maior quantidade de calor transferido por condução da malha do tapete para os *chips*. Contudo, o constante aparecimento de pontos tostados largos, independentemente da temperatura, indica, muito

provavelmente, que o tapete superior está gasto e necessita de ser substituído o mais rápido possível, como acabou por suceder no final da 1.^a fase. Esta última situação será abordada com detalhe no subcapítulo 4.3, página 47.

Em conclusão, o aumento da temperatura do tapete superior torna os pontos tostados mais intensos e não mais dispersos na superfície dos *chips*.

3.2. INTERVENÇÕES ESTRUTURAIS

Na 2.^a fase de intervenções deu-se primazia às alterações estruturais no forno e ao desenvolvimento de uma metodologia simples e de fácil aplicação para a sua instalação.

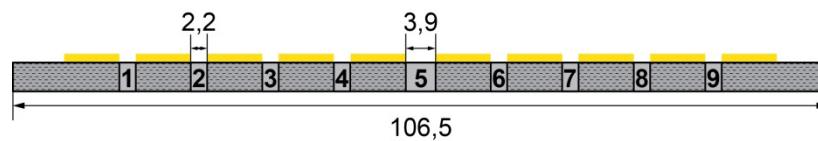


Figura 3.9. Largura dos tapetes do forno, dos intervalos e dos *chips* (a cor amarela), em centímetros.

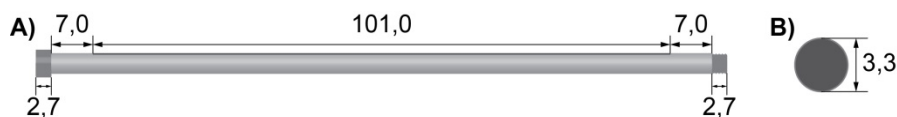


Figura 3.10. Dimensões dos queimadores tubulares, em centímetros: A) vista lateral; B) vista frontal.

Os queimadores tubulares foram numerados no sentido da deslocação do tapete que aquecem.

Uma vez que não existiam registos fidedignos das últimas intervenções realizadas a nível estrutural, todos os queimadores tubulares tiveram que ser retirados da estrutura do forno e inventariados. Durante o processo, o interior de todos os queimadores tubulares foi limpo com ar comprimido, removendo-se, também, o máximo de soldaduras do antigo método de controlo das chamas.

À medida que as alterações estruturais progrediam, ou seja, se introduziam ou removiam guias e limitadores pela observação dos resultados de cada perfil de temperaturas, todos os queimadores tubulares intervencionados eram novamente limpos no exterior e no interior com ar comprimido.

3.2.1. Perfil inicial

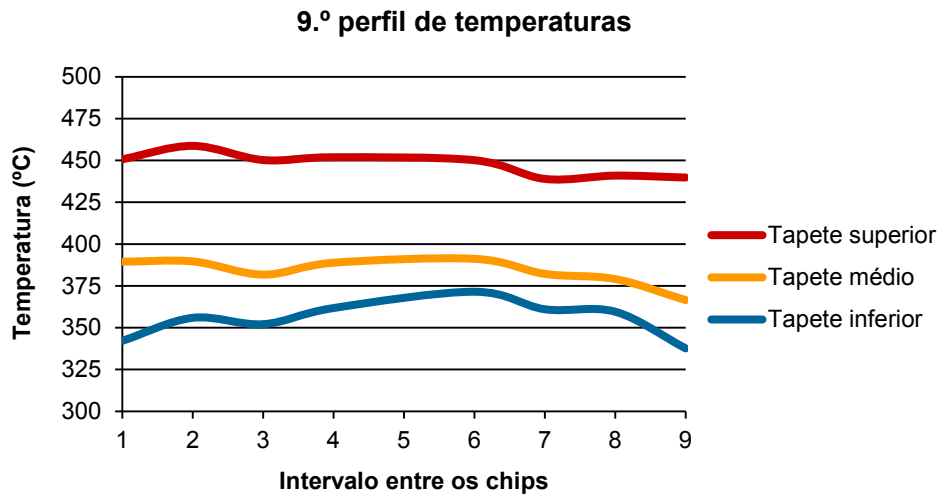


Figura 3.11. Representação das médias das temperaturas observadas no 9.º perfil de cada tapete, em função do intervalo entre os *chips*.

Tabela 3.8. Resultados obtidos no 9.º perfil de temperaturas.

Tapete	Δmédias (°C)									\bar{t}_{tap} (°C)	$t_{\text{máx}}$ (°C)	$t_{\text{mín}}$ (°C)	Δt (°C)
	Esquerda			Centro			Direita						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Superior	3,0	11,0	2,6	4,2	29,6	2,5	-8,7	-6,7	-7,9	447,7	458,7	438,9	19,8
Médio	5,9	6,0	-1,8	5,3	22,3	7,6	-1,4	-4,5	-17,1	383,6	391,2	366,5	24,7
Inferior	-13,0	0,7	-3,1	6,6	27,0	16,3	5,8	4,3	-17,6	355,2	371,5	337,6	33,9
	Soma de Δmédias (°C)									Desvio de temperatura ^a (°C)	N.º de materiais ^b		
	Lado esquerdo				Lado direito								
Superior	20,9			—	-20,9			-10,4	3				
Médio	15,4			—	-15,3			-7,7	2				
Inferior	-8,9			—	8,9			4,4	1				

^aDesvio à temperatura de equilíbrio entre os lados de cada tapete.

^bNúmero de guias ou limitadores a introduzir em cada tapete.

No 9.º perfil de temperaturas voltaram a registrar-se, nos três tapetes, variações de temperaturas fora da especificação. Isto deveu-se ao processo de limpeza interior dos queimadores tubulares aquando da inventariação dos mesmos. Os resultados obtidos depois deste tipo de limpeza, que apenas é realizada anualmente por ser bastante demorada, expõem claramente a influência que a acumulação de resíduos dentro dos queimadores tubulares exerce na variação de temperaturas dos tapetes (Tabela 3.8).

O processo de introdução de guias e limitadores nos queimadores tubulares assenta, em termos gerais, na “transferência” de calor das zonas quentes para as zonas frias de cada tapete até se atingir o equilíbrio térmico no forno.

Para compreender melhor o efeito das intervenções estruturais, calcularam-se as somas da diferença das médias nos dois lados do forno (Tabela 3.8). Estas somas, sendo coloridas da mesma forma que a diferença das médias, transmitem rapidamente a informação de qual o lado quente e

qual o lado frio do forno, ou seja, de onde se tem de retirar calor e onde se tem de introduzir. Acrescentou-se também o desvio de temperatura e o número de materiais de controlo da chama a introduzir. O primeiro dá-nos a quantificação do desvio (°C) à temperatura de equilíbrio entre os lados de cada tapete e é determinado dividindo a soma da diferença das médias do lado direito (entrada de mistura de gás natural-ar) por 2; o segundo dá-nos o número de guias ou limitadores a introduzir nos queimadores tubulares: cada intervenção corresponde a 10/3 °C de desvio de temperatura. Se o desvio de temperatura for negativo, introduzem-se limitadores (ou removem-se guias existentes), se for positivo, introduzem-se guias (ou removem-se limitadores existentes).

3.2.2. Medidas corretivas e metodologia

No que diz respeito às intervenções estruturais para controlo da variação de temperaturas ao longo da largura dos tapetes, o manual de operação e manutenção do forno apenas faz referência ao método antigo de limitação da chama, com base na soldadura da abertura dos queimadores tubulares. Todavia, refere procedimentos gerais para as intervenções estruturais:

- Intervir em 3 queimadores de cada vez, não contínuos e igualmente espaçados, para garantir que o efeito nas temperaturas é notado e distribuído;
- Iniciar as intervenções pelo tapete inferior, depois prosseguir para o tapete médio e por último para o tapete superior;
- Cada intervenção (em 3 queimadores) produz um efeito aproximado de 10 °C na temperatura dos tapetes.

Foi com base neste último ponto que o número de materiais foi associado ao desvio de temperatura na Tabela 3.8.

Durante o processo de acerto de temperaturas dos tapetes verificou-se que os procedimentos referidos anteriormente, apesar de serem um excelente ponto de partida, não eram adequados para a utilização num forno que tivesse no início queimadores tubulares já intervencionados. Também não se revelaram aptos para situações em que os resultados das intervenções no forno apenas podiam ser observados durante a produção, arriscando-se a ser a causa de perdas consideráveis de produto.

Assim, com base nos resultados dos perfis de temperaturas desenvolveu-se a seguinte metodologia para as intervenções estruturais no forno:

1. Intervir no número de queimadores que se pretenda, desde que sejam igualmente espaçados e não sejam contínuos. Tomar em consideração a existência de limitadores e guias no forno, para que a instalação seja alternada nos queimadores tubulares;
2. Intervir, de preferência, na 2.^a metade do forno (com exceção dos queimadores do tapete superior) para que os efeitos sejam mais perceptíveis nos perfis de temperaturas;
3. Iniciar as intervenções nos queimadores do tapete inferior e depois prosseguir para os de cima. As modificações realizadas nos queimadores do tapete médio são

acompanhadas por compensações nos do tapete superior, para evitar que a alteração da variação de temperaturas afete a produção;

4. Introduzir guias e limitadores (ou remover o material existente) até que o desvio de temperatura seja o mínimo possível;

5. Introduzir guias e limitadores para corrigir as temperaturas dos intervalos laterais dos tapetes (Tabela 3.9), tendo em conta o jogo de cores da diferença entre as médias.

A zona de atuação do material é definida como no exemplo da Figura 3.12. Nas guias a zona é definida desde o ponto de atuação até ao final dos queimadores tubulares, no lado esquerdo, enquanto nos limitadores, é definida deste ponto de atuação até à entrada de gás, no lado direito.

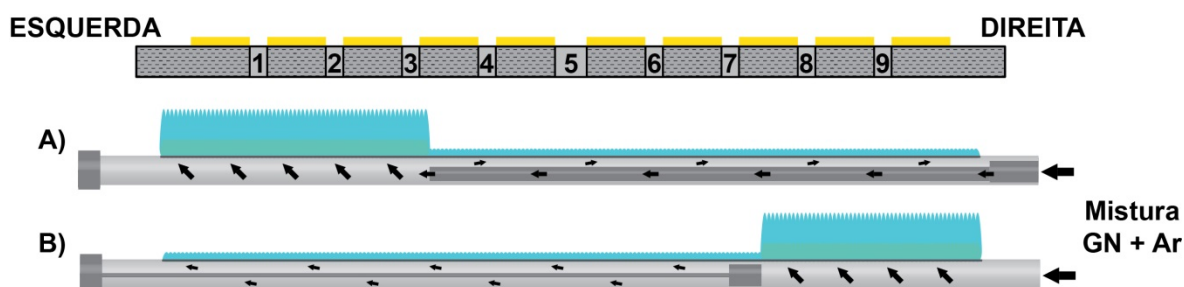


Figura 3.12. Efeitos na chama das intervenções estruturais nos queimadores tubulares: A) guias e B) limitadores. Por cima dos queimadores, encontra-se o tapete do forno dividido nos respetivos intervalos, com os chips a cor amarela.



Figura 3.13. Dimensões das guias, em centímetros: A) vista lateral; B) vista frontal.

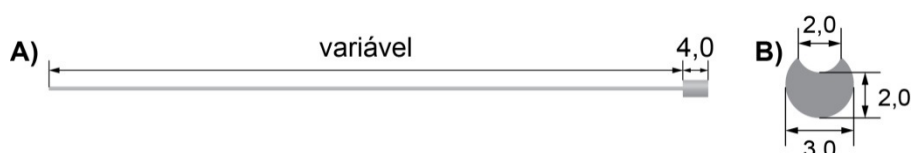


Figura 3.14. Dimensões dos limitadores, em centímetros: A) vista lateral; B) vista frontal.

Tabela 3.9. Comprimentos dos limitadores e das guias a utilizar consoante o intervalo onde se pretende atuar.

	Comprimento (cm)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
LIMITADOR	—	—	—	—	—	—	78,5	87,8	97,2
	86,8	77,4	68,1	—	—	—	—	—	—
									GUIA

De forma a aproveitar ao máximo o comprimento dos limitadores, estes devem ser introduzidos pelo lado esquerdo do forno e fixados com uma pequena solda à ponta interior do queimador tubular.

A sua aplicação é recomendada para os intervalos 7, 8 e 9, devendo cortar-se a vareta metálica do limitador com o comprimento adequado. Por exemplo, se se pretender aumentar a temperatura do intervalo 8, o limitador deve ter um comprimento total de 87,8 cm e a zona de atuação incluirá também o intervalo 9. As chamas dos queimadores tubulares com limitadores poderão ultrapassar a malha do tapete quando as válvulas de borboleta estiverem totalmente abertas (100%) mas o efeito é completamente eliminado quando o forno estiver em funcionamento estável.

As guias devem introduzir-se pelo lado direito do forno, que é o lado da entrada de mistura gás natural-ar. A sua aplicação é recomendada, de forma geral, para os intervalos laterais esquerdos do forno. Contudo, assim como para os limitadores, é também possível localizar o efeito da chama em intervalos desejados: para atuar localmente nos intervalos 1 ou 2 tem que se soldar uma tubagem extra à guia, para atuar no intervalo 3 tem que se cortar o material. Por exemplo, se se pretender aumentar a temperatura do intervalo 3, cortam-se 6,9 cm da guia e a zona de atuação incluirá também os intervalos 1 e 2.

As dimensões dos materiais foram determinadas para definirem a zona de atuação a partir de meia distância do intervalo anterior ao desejado, para que o seu efeito se note em pleno.



Figura 3.15. Visualização 3D do queimador tubular e do material para as intervenções estruturais.

Com base nos resultados de cada intervenção da 2.^a fase no acerto de temperaturas dos tapetes do forno, foi possível definir os efeitos aproximados da introdução de uma guia e de um limitador. Na sua remoção, o efeito nas temperaturas será contrário.

- **Guia:** nos intervalos dentro da zona de atuação aumenta 2 °C no mesmo tapete e 2/3 °C no tapete superior; reduz 2 °C nos intervalos 8 e 9 e 1 °C no centro (4, 5 e 6);
- **Limitador:** nos intervalos dentro da zona de atuação aumenta 3 °C no mesmo tapete e 1 °C no tapete acima; fora da zona reduz 1 °C no geral e 1/3 °C no centro.

3.2.3. Perfil final

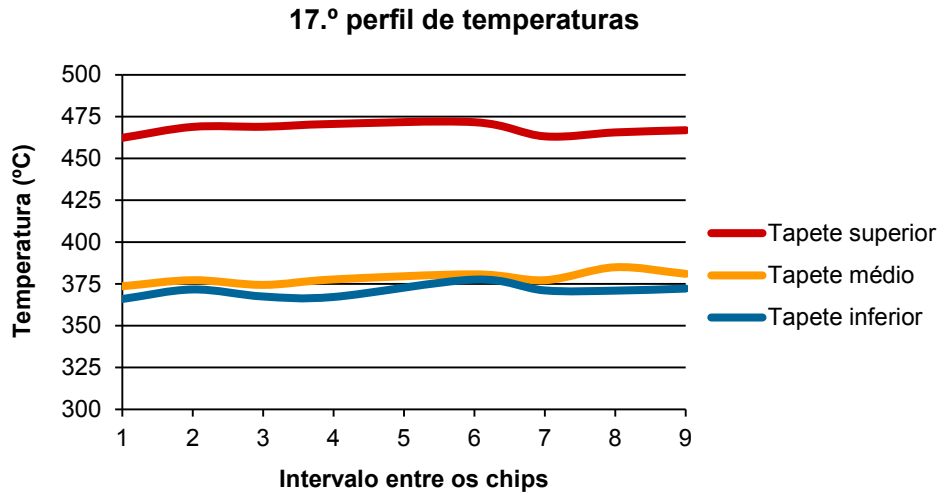


Figura 3.16. Representação das médias das temperaturas observadas no 17.º perfil de cada tapete, em função do intervalo entre os *chips*.

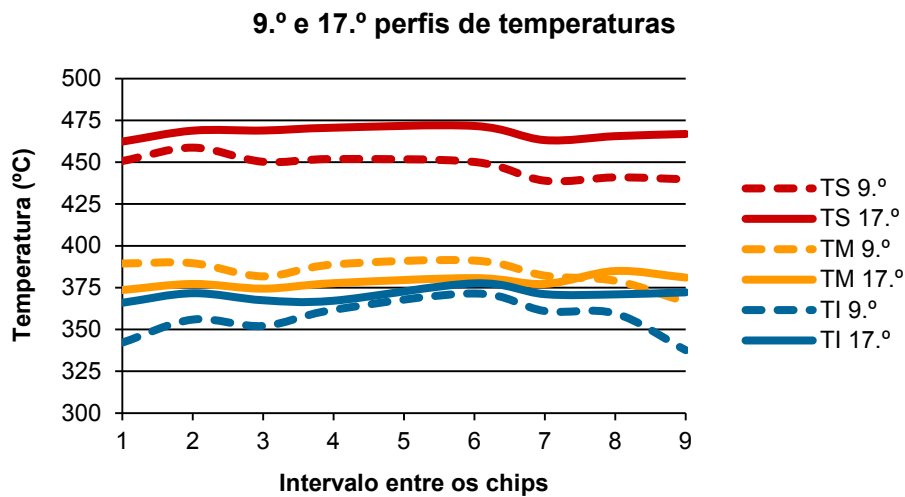


Figura 3.17. Comparação entre o 9.º e o 17.º perfil de temperaturas.

Tabela 3.10. Resultados obtidos no 17.º perfil de temperaturas.

Tapete	Δ médias (°C)									\bar{t}_{tap} (°C)	$t_{\text{máx}}$ (°C)	$t_{\text{mín}}$ (°C)	Δt (°C)
	Esquerda			Centro			Direita						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Superior	-4,9	1,6	1,7	3,4	33,7	4,4	-4,1	-1,7	-0,4	467,3	471,7	462,3	9,3
Médio	-4,8	-1,1	-3,9	-0,7	18,2	2,4	-1,1	6,6	2,7	378,3	384,9	373,6	11,4
Inferior	-4,5	1,1	-3,1	-3,3	20,2	7,1	0,6	0,4	1,7	370,5	377,6	366,0	11,6
	Soma de Δ médias (°C)									Desvio de temperatura (°C)	N.º de materiais		
	Lado esquerdo				Lado direito								
Superior	1,7			—	-1,7			-0,9		0			
Médio	-10,5			—	10,5			5,3		1			
Inferior	-9,8			—	9,8			4,9		1			

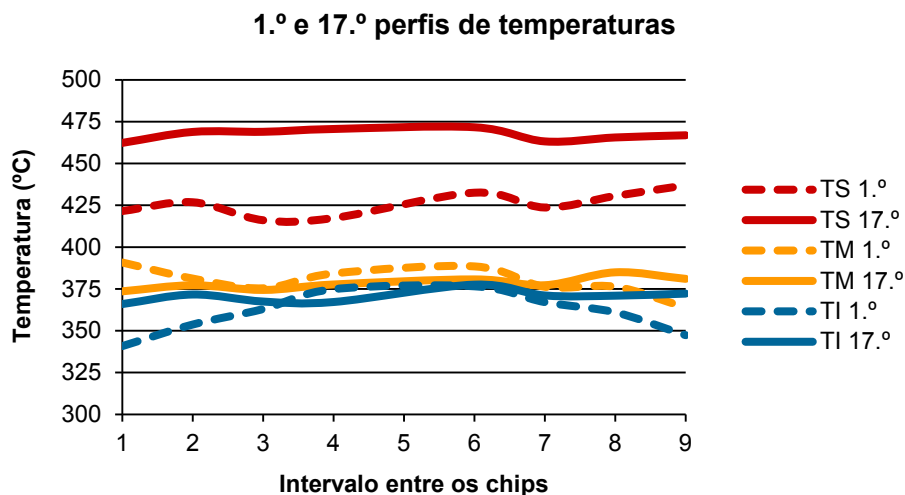


Figura 3.18. Comparação entre o 1.º e o 17.º perfil de temperaturas.

Pela observação dos resultados obtidos é notória a correta evolução do perfil de temperaturas nos três tapetes, tendo-se conseguido acertar as variações térmicas para o valor de especificação (Tabela 3.10). Os materiais restantes não são obrigatórios, porque basta que o objetivo das intervenções estruturais seja cumprido. Não obstante, se desejável, pode manter-se o processo até à uniformização máxima ou variação mínima das temperaturas ao longo da largura dos três tapetes.

Para além das alterações estruturais da 2.ª fase, contribuíram também para este resultado positivo a continuação das intervenções implementadas na 1.ª fase, como a limpeza exterior dos queimadores tubulares, a sua reorientação para 45º e a substituição dos queimadores infravermelhos. Até ao final da 2.ª fase foram substituídos 25 queimadores infravermelhos (71% do total).

3.2.3.1. Pontos tostados

Tabela 3.11. Distribuição (%) da área ocupada pelos pontos tostados numa amostra de 60 *chips* por lado. Resultados respeitantes à 17.ª medição.

Avaliação	Esquerda	Centro	Direita
0	0%	0%	0%
1	0%	3%	8%
2	17%	35%	45%
3	75%	57%	43%
4	8%	5%	3%
Total	100%	100%	100%

Tabela 3.12. Distribuição (%) da forma do ponto tostado numa amostra de 60 *chips* por lado. Resultados respeitantes à 17.ª medição.

Forma	Esquerda	Centro	Direita
Circular	72%	87%	78%
Larga	28%	13%	22%
Total	100%	100%	100%

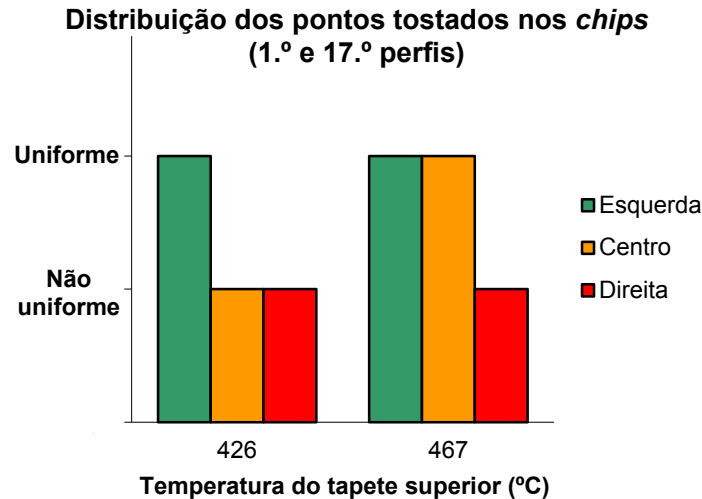


Figura 3.19. Comparação da distribuição dos pontos tostados obtidos no 1.º e no 17.º perfil de temperaturas.

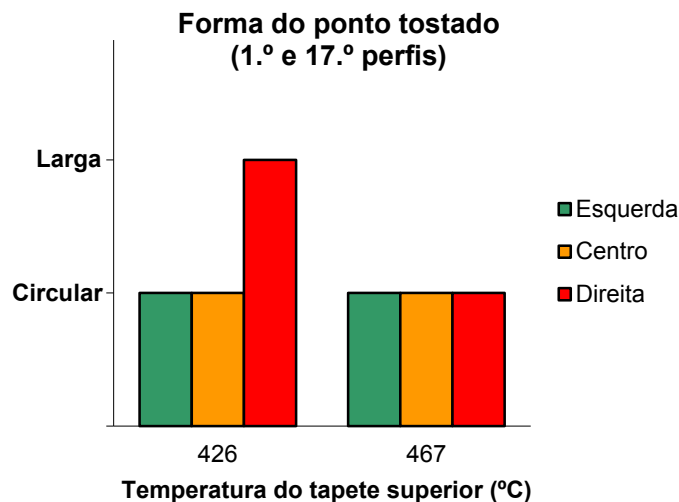


Figura 3.20. Comparação da forma dos pontos tostados obtidos no 1.º e no 17.º perfil de temperaturas.

Na observação das duas figuras anteriores nota-se que os pontos tostados estão distribuídos da mesma forma no 1.º e no 17.º perfil de temperaturas, nos mesmos lados do forno, e que no centro estão agora uniformemente distribuídos. Apesar de as temperaturas ao longo da largura do tapete superior terem sido uniformizadas no 17.º perfil, o problema do contato intermitente da chama do piloto direito na malha persiste e pode ser a causa da diferença registada. Uma possível solução para esta situação será abordada no subcapítulo 5.2.1, página 62. Quanto à forma, nota-se a existência de apenas pontos tostados circulares no 17.º perfil, ao longo de todo o tapete, mesmo sendo a sua temperatura superior. A substituição do tapete superior e, principalmente, a uniformização das temperaturas ao longo da sua largura contribuíram positivamente para a obtenção destes resultados.

Não foi possível eliminar por completo a existência dos pontos tostados nos *chips*, no entanto conseguiu-se minimizar o impacto visual com a prevalência da forma circular, que permite a sua melhor dissimulação com a aplicação do aroma durante a aromatização.

3.2.3.2. “Peso 10”

Tabela 3.13. Valores médios de “peso 10” à entrada e saída do forno, na 17.^a medição.

Zona	Massa de 10 chips (g)		
	Esquerda	Centro	Direita
Entrada	$P10_i$	$P10_i$	$P10_i$
Saída	$P10_f$	$P10_f$	$P10_f$
$\Delta P10$	$\Delta P10_{17}$	$\Delta P10_{17}$	$\Delta P10_{17}$

Perda de “peso 10” dos chips

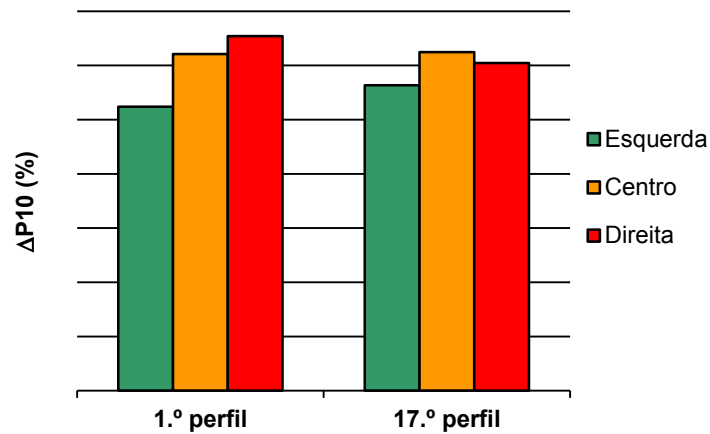


Figura 3.21. Comparação das variações de “peso 10” entre a saída e a entrada, e em cada zona do forno, obtidas no 1.º e no 17.º perfil de temperaturas.

3.2.3.3. Humidade

Tabela 3.14. Valores médios de humidade (b.h.) à entrada, no final do tapete superior e à saída do forno, na 17.^a medição.

Zona	Humidade (b.h., %)		
	Esquerda	Centro	Direita
Entrada	W_i	W_i	W_i
TS	W_{TS}	W_{TS}	W_{TS}
Saída	W_f	W_f	W_f
ΔW_{TS}	ΔW_{TS}	ΔW_{TS}	ΔW_{TS}
ΔW_{total}	ΔW_{17}	ΔW_{17}	ΔW_{17}

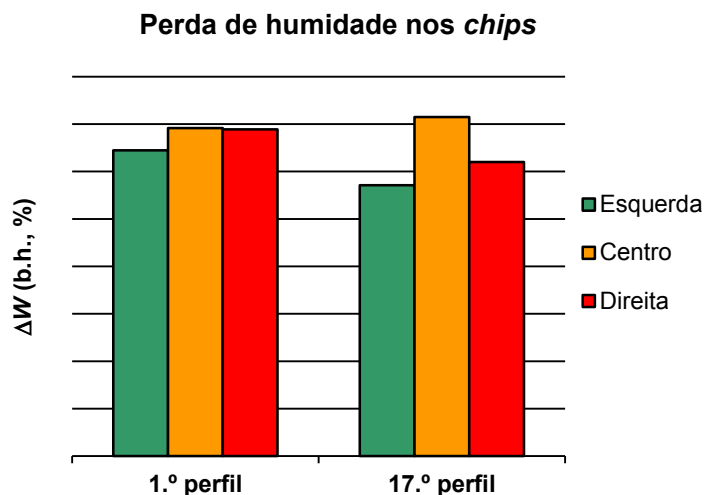


Figura 3.22. Comparação das variações de humidade (b.h.) entre a saída e a entrada, e em cada zona do forno, obtidas no 1.º e no 17.º perfil de temperaturas.

Pela observação da Figura 3.21 e da Figura 3.22 confirma-se a relação direta entre a variação de “peso 10” e a redução da humidade nos *chips*, já sustentada pelos resultados obtidos anteriormente na comparação da Tabela 3.5 com a Tabela 3.6.

Quanto à variação do “peso 10” na Tabela 3.13 e na Figura 3.21 nota-se que a diferença entre os lados do forno é menor 69% do que no início das intervenções, o que mostra a evolução correta do perfil de temperaturas nos três tapetes, apesar de o lado direito ser o mais quente no interior do forno, como se demonstra pelos resultados finais obtidos (Tabela 3.10).

Na Tabela 3.14 acrescentaram-se os registos de humidade (b.h.) efetuados à saída do tapete superior — apesar de serem de difícil recolha —, de forma a aprofundar o conhecimento sobre o interior do forno. Assim, pela observação da variação da humidade na Tabela 3.14 e na Figura 3.22 nota-se que o tapete superior é mais quente no lado esquerdo e os restantes no lado direito, como também se observa no perfil de temperaturas final (Tabela 3.10).

O registo das variações de “peso 10” e de humidade (b.h.) entre a entrada e a saída do forno, na zona esquerda, central e direita, pode representar, pelos resultados obtidos, um método mais rápido para a obtenção de resultados gerais semelhantes aos dos demorados perfis de temperaturas, principalmente se as medições à saída do tapete superior também forem incluídas. No entanto, não pode ser considerado um método alternativo, devido à quantidade e à qualidade da informação que os perfis de temperaturas conseguem transmitir sobre o interior do forno.

CAPÍTULO 4. MELHORAMENTOS NO FORNO

*Olhar para o mesmo de maneira diferente.*⁴¹

Gonçalo M. Tavares em *Aprender a rezar na Era da Técnica*

4.1. MONITORIZAÇÃO

4.1.1. Correções no consumo de gás natural

O sinal analógico (4-20 mA) do medidor principal de caudal do forno era convertido numa percentagem da escala de frequências (0-10 000 Hz) dos vórtices (ver subcapítulo 2.3.1, página 18). Este valor percentual era erradamente transmitido ao processo como correspondendo ao valor total de caudal volumétrico lido pelo aparelho. Ou seja, os consumos de gás natural do forno, quer instantâneos, quer totais, estavam a ser lidos e registados de forma errada. Justificava-se, por isso, uma correção urgente desta situação, uma vez que todas as otimizações energéticas do forno estavam, estão e estarão dependentes do registo fiável dos consumos desta utilidade no mesmo. Assim, começou-se por corresponder o sinal analógico à escala de utilização de caudais volumétricos do aparelho, inscritos na lateral do medidor de caudal: 0-6292 ft³/h (0,0-178,2 m³/h). No entanto, como o medidor apenas consegue transmitir sinais dentro da escala de velocidades anteriormente apresentada na Tabela 2.5, houve necessidade de fazer uma correção adicional:

$$K_{q_{v,GN}} = \frac{10\,000\text{ Hz}}{19,8\text{ Hz}/(\text{m}^3/\text{h})} \frac{1}{178,2\text{ m}^3/\text{h}} \frac{149,4\text{ m}^3/\text{h}}{178,2\text{ m}^3/\text{h}} = 2,38 \quad (4.1)$$

Este fator multiplicador deve ser sempre aplicado ao valor que é transmitido pelo aparelho.

Se se pretender converter o caudal volumétrico obtido para diferentes condições de pressão e temperatura, deve recorrer-se às leis de Charles e de Boyle aplicadas ao mesmo fluido (gás perfeito) e para o mesmo número de moles:

$$\frac{V_2 P_2}{T_2} = \frac{V_1 P_1}{T_1} \quad (4.2)$$

tem-se:

$$V_2 = \frac{V_1 P_1}{T_1 P_2} T_2 \quad (4.3)$$

$$= V_1 K_{q_{v,PT}} \quad (4.4)$$

sendo $K_{q_{v,PT}}$ o fator de correção devido à pressão e à temperatura e V_1 o caudal volumétrico corrigido com o fator $K_{q_{v,GN}}$.

A correção efetuada pela equação (4.4) é útil para obter o correspondente caudal volumétrico nas condições do fornecedor e assim poder determinar o custo do gás natural de forma correta (ver subcapítulo 2.1.1, página 13).

Tabela 4.1. Correções a efetuar no caudal volumétrico devido à pressão e à temperatura, para o dia 11 de abril de 2014.

Condição	Objetivo		Processo		$K_{q_v,PT}$
	P_2 (Pa)	t_2 (°C)	P_1 (Pa)	t_1 (°C)	
PTN	101 325	0,0	P_1	t_1	0,97
Fornecedor	101 325	15,0	P_1	t_1	1,02

4.1.2. Consumo dos queimadores e pilotos

Depois do medidor de caudal o gás natural entra no forno com as seguintes condições:

Tabela 4.2. Condições do gás natural à entrada do forno, no dia 11 de abril de 2014.

P (Pa)	t (°C)	ρ (kg/m ³)	μ (Pa·s)	q_v (m ³ /h)	$q_v^{PTN\ a}$ (m ³ /h)	$q_v^{forn\ b}$ (m ³ /h)
P	t	0,76	$1,1 \times 10^{-5}$	94,5	91,4	96,5

^aCondições PTN (101 325 Pa; 0,0 °C).

^bCondições do fornecedor de gás (101 325 Pa; 15,0 °C).

A densidade do gás natural, ρ , foi determinada a partir da equação dos gases perfeitos, uma vez que se encontra a baixa pressão:

$$PV = nRT \quad (4.5)$$

obtendo-se:

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (4.6)$$

sendo P a pressão total absoluta (Pa), V o volume (m³), n a quantidade de substância (mol), M a massa molar do gás natural (g/mol), R a constante dos gases perfeitos [8,314 m³·Pa/(K·mol)] e T a temperatura do gás natural (K).

A viscosidade apresentada na Tabela 4.2 é a do metano (composto maioritário do gás natural), e foi consultada no livro de Perry⁴².

O forno, como muitos equipamentos fabris que operam com gás natural, dispõe de quatro medidores de caudal de orifício (Figura 4.1), um por cada sistema de queimadores. Estes medidores, que nunca tinham sido utilizados desde a sua instalação, revelaram-se um método simples e útil para determinar a distribuição do consumo de gás natural no forno e para detetar anomalias nos sistemas de queimadores. A desproporção encontrada entre os resultados obtidos com este método e os valores transmitidos pelo medidor principal de caudal do forno foi o ponto de partida para o ajuste efetuado no

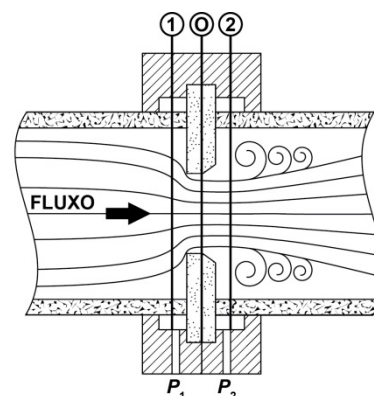


Figura 4.1. Corte lateral do suporte da placa de orifício com tomadas de canto, dividido em seções.

subcapítulo anterior.

Os medidores de caudal de orifício têm as vantagens de ser pequenos, de simples construção e de ter baixo custo, mas também a desvantagem de imporem no fluxo uma perda permanente de pressão, sendo apenas recuperada 40-50%⁴³ da pressão inicial.

Antes de iniciar o cálculo do caudal volumétrico através de um orifício, assumiram-se as seguintes aproximações:

- Fluido incompressível (pressão baixa na secção 1);
- Medidor horizontal;
- Perfil de velocidades plano entre as secções 0 e 2;
- $\rho = \rho_1 = \rho_2$;
- $v_0 = v_2$.

Com base nas aproximações enunciadas, o balanço de energia ao medidor de orifício é dado pela equação de Bernoulli simplificada:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{1}{2}v_1^2 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{1}{2}v_2^2 \quad (4.7)$$

A conservação de massa no fluxo de um fluido incompressível é dada pela equação da continuidade:

$$q_v = A_1v_1 = A_0v_0 \quad (4.8)$$

Substituindo a equação anterior na (4.7), vem:

$$q_v = C_d A_0 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)/\rho}{1 - \beta_0^4}} \quad (4.9)$$

sendo ρ a densidade mássica indicada na Tabela 4.2, β_0 o rácio entre o diâmetro do orifício e o diâmetro interior da tubagem na secção 1:

$$\beta_0 = \frac{D_0}{D_1} \quad (4.10)$$

e C_d o coeficiente de descarga, que considera as perdas por atrito devido à viscosidade do fluido e à turbulência. Este é dado pela equação de Stolz (4.11), simplificada para medidores com tomadas de canto.

$$C_d = 0,5959 + 0,312\beta_o^{2,1} - 0,184\beta_o^{8,0} + \frac{91,71\beta_o^{2,5}}{Re_o^{0,75}} \quad (4.11)$$

O número de Reynolds no orifício, Re_o , da equação anterior, foi determinado pela expressão seguinte, com os valores apresentados na Tabela 4.2:

$$Re_o = \frac{\rho D_o v_o}{\mu} \quad (4.12)$$

Pela equação (4.9), a determinação do caudal volumétrico de gás natural nas tubagens depende da medição do diferencial de pressão nas secções 1 e 2 da Figura 4.1. Para o medir recorreu-se a um manómetro da marca Comark, modelo C9505IS, nas tomadas de cada suporte de placas de orifício.

Tabela 4.3. Caudal volumétrico em cada sistema de queimadores, no dia 11 de abril de 2014.

Sistema de queimadores	ΔP (inH ₂ O)	ΔP (Pa)	D_1^a (cm)	D_o^b (cm)	β_o	C_d	q_v (m ³ /h)	% q_v
IV	0,9	224,0	D_1	D_o	0,57	0,610	24,2	25,6
TS	1,4	348,4	D_1	D_o	0,60	0,61	14,7	15,5
TM	0,4	99,5	D_1	D_o	0,60	0,62	7,9	8,4
TI	1,8	447,9	D_1	D_o	0,57	0,61	34,1	36,1
Pilotos	—	—	—	—	—	—	13,6	14,4
Total							94,5	100,0

^aDeterminado a partir do diâmetro exterior da tubagem e da tabela de dimensões de tubagens de aço inoxidável, para *schedule 40ST*.⁴⁴

^bDeterminado pelas dimensões incluídas no Boletim 8697 para medição com placas de orifício.⁴⁵

Na tabela *supra* o caudal volumétrico dos pilotos foi determinado pela diferença entre o valor corrigido do medidor de caudal do forno (Tabela 4.2) e o somatório dos quatro sistemas de queimadores.

Na observação dos resultados da Tabela 4.3 destaca-se o valor elevado de gás natural distribuído aos pilotos e o baixo caudal disponível para os queimadores tubulares do tapete médio. O primeiro está relacionado com o consumo total dos queimadores, como explicado anteriormente no subcapítulo 2.3.3, página 19; o segundo é um problema cujos efeitos se têm feito sentir desde fevereiro de 2014 (10.º perfil de temperaturas) com o abaixamento gradual do fluxo de gás natural disponível ao sistema de queimadores do tapete médio (Tabela 4.4) e a consequente redução da sua temperatura média, chegando algumas vezes a ser menor que a do tapete inferior (ver Anexo A, página A.1). Provavelmente esta situação está relacionada com o mau ajuste geral das válvulas de borboleta para as chamas máxima e mínima de cada sistema de queimadores tubulares. Por isso, propõe-se no próximo subcapítulo uma metodologia para o correto ajuste das mesmas. Este problema não chegou a ser corrigido por indisponibilidade da mão de obra especializada.

Tabela 4.4. Caudal volumétrico de gás natural em cada sistema de queimadores, no dia 30 de janeiro de 2014.

Sistema de queimadores	ΔP (inH ₂ O)	ΔP (Pa)	D_1 (cm)	D_0 (cm)	β_0	C_d	q_v (m ³ /h)	% q_v
IV	0,6	149,3	D_1	D_0	0,57	0,61	19,8	21,7
TS	1,7	423,0	D_1	D_0	0,60	0,61	16,2	17,7
TM	1,8	447,9	D_1	D_0	0,60	0,61	16,6	18,2
TI	1,6	398,1	D_1	D_0	0,57	0,61	32,2	35,3
Pilotos	—	—	—	—	—	—	6,4	7,0
Total							91,2	100,0

Considerou-se que o consumo de gás natural dos pilotos apresentado na tabela anterior era o adequado para o forno, e foi utilizado como referência para os cálculos de poupança de energia no subcapítulo 5.2.

4.2. OPERAÇÃO

4.2.1. Ajuste das válvulas de borboleta

O ajuste das válvulas de borboleta nas chamas mínima e máxima dos queimadores tubulares foi sempre realizado com recurso à observação da qualidade das mesmas. Contudo, este método revelou-se insuficiente para garantir a reprodutibilidade necessária num ajuste crítico para o correto funcionamento do forno. Assim, desenvolveu-se uma metodologia simples, com recurso à medição do diferencial de pressão em cada sistema de queimadores, de forma a complementar a informação visual transmitida pela chama. Começou-se por calcular a média anual (2013) dos poderes caloríficos do gás natural fornecido à fábrica.

Tabela 4.5. Média anual (2013) dos poderes caloríficos do gás natural fornecido à fábrica.

Propriedade	Valor (kWh/Nm ³)
PCS	11,8
PCI	10,7

Com base no poder calorífico inferior apresentado na Tabela 4.5 e sabendo que o forno tem um *heat input* de 4 113,0 MJ/h (ver subcapítulo 1.2.3, página 8), calcularam-se os consumos máximos de gás natural do equipamento através da aplicação da equação (4.3).

Tabela 4.6. Caudais máximos de gás natural no forno, determinados com as condições processuais do dia 11 de abril de 2014.

Condição	$q_{V\text{máx}}$ (m ³ /h)
Processo	110,4
PTN	106,8
Fornecedor	112,7

O ajuste geral do diferencial de pressão em todos os sistemas de queimadores foi efetuado para aproximar o caudal total determinado pela medição de orifícios do valor máximo (condições do processo) apresentado na Tabela 4.6. Considerou-se que o valor máximo poderia ser ligeiramente ultrapassado, de forma a permitir uma margem de trabalho no controlo das temperaturas durante o funcionamento do forno.

O diferencial de pressão nos queimadores infravermelhos é constante porque o seu fluxo de gás natural não é modulado (ver subcapítulo 2.3.3, página 19), mas foi ajustado para o valor de 0,9 inH₂O. Este foi o que correspondeu a um melhor funcionamento, porque a partir desse valor começaram a notar-se *flame tails* debaixo da fibra, ou seja, pequenas chamas que saem de estrutura do queimador, que podem atingir o produto e que não são desejadas. Este foi o único sistema de queimadores que foi corrigido antes do dia 11 de abril de 2014 (Tabela 4.3 e Tabela 4.4).

Os diferenciais máximos e mínimos de pressão nos queimadores tubulares foram ajustados de acordo com o rácio Ar/GN especificado para cada sistema de queimadores (Tabela 2.6).

Tabela 4.7. Valores máximos e mínimos de diferencial de pressão, com os respetivos caudais volumétricos de gás natural, para o ajuste correto das válvulas de borboleta.

Sistema de queimadores	$\Delta P_{\text{máx}}$ (inH ₂ O)	$\Delta P_{\text{máx}}$ (Pa)	$\Delta P_{\text{mín}}$ (inH ₂ O)	$\Delta P_{\text{mín}}$ (Pa)	$q_{V\text{máx}}$ (m ³ /h)	% $q_{V\text{máx}}$	$q_{V\text{mín}}$ (m ³ /h)
IV	0,9	224,0	0,9	224,0	24,2	21,7	24,2
TS	2,2	547,4	0,1	24,9	18,3	16,5	4,0
TM	2,6	746,5	0,2	49,8	19,9	17,9	5,6
TI	2,6	746,5	0,2	49,8	40,9	36,8	11,5
Pilotos	—	—	—	—	7,8	7,0	3,4
Total					111,1	100,0	48,7

As válvulas de borboleta funcionam numa escala de 0% (chama baixa) a 100%, que corresponde a uma deslocação efetiva entre 15 e 75° em relação à horizontal, de abertura da tubagem de ar. Para as ajustar deve-se começar por regular a posição mínima das válvulas com base nos valores de diferencial de pressão mínimos indicados na Tabela 4.7, tendo em atenção que os queimadores tubulares devem apresentar sempre uma chama ao longo do seu comprimento. Se isto não se verificar, com o tempo a estrutura do tubular pode deformar-se ou a chama pode mesmo

propagar-se para o interior do queimador (*flashback*). Depois, ajusta-se a posição máxima (100%) com base nos valores máximos de diferencial de pressão apresentados também na Tabela 4.7. No final, deve-se confirmar que os teores de oxigénio nas misturas de gás natural-ar estão de acordo com as especificações da Tabela 2.6.

Depois do ajuste do caudal volumétrico de gás natural para os queimadores infravermelhos, a temperatura da sua superfície sofreu um aumento de 27 °C, para 1062 °C. Este valor foi determinado a partir do caudal disponível para estes queimadores (Tabela 4.7) e do respetivo valor energético obtido pelo poder calorífico médio inferior do gás natural (Tabela 4.5). Depois, com base na área da fibra dos queimadores (Tabela 2.4), na sua emissividade (0,7) e no calor efetivamente emitido por radiação (Figura 4.3), da aplicação da lei de Stefan-Boltzmann:

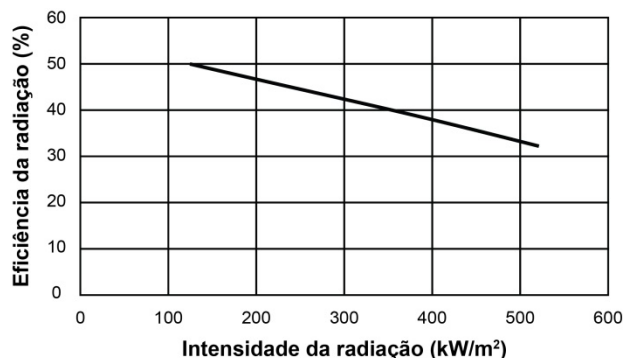


Figura 4.2. Representação da eficiência da radiação em função da intensidade da radiação, para um queimador infravermelho *MFB*.

$$Q_R = \varepsilon A_s \sigma T_s^4 \quad (4.13)$$

vem:

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{Q_R}{\varepsilon A_s \sigma}} \quad (4.14)$$

sendo Q_R o calor efetivamente emitido por radiação (W), ε a emissividade da fibra, A_s a área da sua superfície (m^2), σ a constante de Stefan-Boltzmann [$5,670 \times 10^{-8} \text{ W}/(m^2 \cdot K^4)$] e T_s a temperatura da superfície (K). Para futura referência, criou-se um guia visual para rapidamente determinar a temperatura da superfície dos queimadores infravermelhos (Figura 4.4).

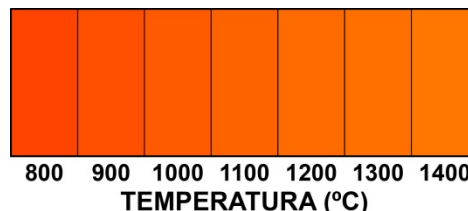


Figura 4.3. Relação da temperatura dos infravermelhos com a cor da sua superfície.[‡]

[‡] Figura realizada com base na tabela desenvolvida por Mitchell Charity, que inclui a correspondência entre valores de temperatura registada num corpo negro e a respetiva cor no espaço RGB. Disponível em: http://www.vendian.org/mncharity/dir3/blackbody/UnstableURLs/bbr_color.html (consult. 22 mai. 2014)

4.2.2. Ajuste da inclinação do primeiro volteador

A inclinação do primeiro volteador do forno foi ajustada para um ângulo de 83° em relação à vertical para melhorar a transferência de *chips* para o tapete médio. Não obstante, para se evitarem desperdícios no arranque do forno resultantes da aglomeração de *chips* no primeiro volteador ou de uma má transição do tapete superior para o médio, devem-se ter em consideração os seguintes pontos:

- Os queimadores infravermelhos têm que ser ligados 5 minutos antes da passagem do produto, de forma a aquecer o tapete superior convenientemente;
- O tapete do laminador tem que estar em funcionamento antes da passagem do produto, para que os *chips* entrem mais espaçados no forno e se evitem aglomerações no primeiro volteador.

4.2.3. Ajuste da frequência dos ventiladores de exaustão

Apesar de os ventiladores de exaustão dos gases de combustão disporem de acionadores de frequência variável, durante o arranque e funcionamento do forno trabalhavam a valores constantes de 20% e 30%, respetivamente.

Durante o arranque a frequência dos ventiladores foi reduzida para 10% e notaram-se melhorias significativas na ignição e propagação das chamas dos oito pilotos. Todavia, com esta redução o tempo de purga do forno deve ser aumentado, num trabalho futuro, de um para dois minutos por questões de segurança.

Durante a produção a frequência dos ventiladores era constante e igual a 30%. Apesar de este valor garantir a especificação do diferencial de pressão nas chaminés do forno, exigia uma mudança súbita da frequência em relação ao valor utilizado no arranque (20%), com possíveis consequências para o funcionamento correto dos ventiladores. Assim, decidiu-se efetuar um ajuste na sua frequência de forma a variar linearmente com o caudal volumétrico de gás natural, obtido nas condições do processo, que entra no forno:

$$f(\%) = 0,335q_v \quad (4.15)$$

A expressão anterior foi determinada para garantir a especificação do diferencial de pressão nas chaminés do forno, tendo por base um consumo médio de gás natural de 92,4 m³/h nas condições do processo e uma frequência média dos ventiladores de 31%.

Este ajuste teve consequências positivas para a poupança de energia durante o período de chama baixa do forno, que serão discutidas no subcapítulo 5.2.3, página 65.

4.2.4. Ajuste da orientação dos queimadores tubulares

Antes da produção do dia 11 de abril de 2014 todos os queimadores tubulares do forno foram reorientados para um ângulo de cerca de 80° com a horizontal no sentido da deslocação do tapete que aquecem, em vez do ângulo de 45° especificado. Notaram-se melhorias significativas na ignição e propagação das chamas dos queimadores tubulares a partir dos pilotos, sem afetar de modo relevante a forma e a intensidade dos pontos tostados na superfície dos *chips*. Este ajuste terá que merecer uma atenção mais cuidada no futuro, uma vez que em virtude dos resultados positivos obtidos a especificação do forno para a orientação dos queimadores tubulares terá que ser reconsiderada.

Para otimizar a ignição de todos os queimadores tubulares a partir dos pilotos deve-se repensar a localização dos segundos em relação aos primeiros, apesar das restrições espaciais causadas pela estrutura interior do forno. Esta otimização poderá ser alvo de estudo e desenvolvimento num trabalho futuro.

4.3. MANUTENÇÃO

4.3.1. Substituição do tapete superior

Todos os tapetes sofrem desgaste com o tempo de operação no forno, quer devido à fricção nos suportes de metal que os sustentam por cima dos queimadores tubulares, quer devido à intensidade das chamas destes. Porém, apenas o desgaste do tapete superior afeta negativamente a qualidade do produto final com a formação de pontos tostados largos (ver subcapítulo 3.1.1.1, página 23).

É recomendado que o tapete superior do forno seja substituído a cada 1320 horas de utilização, o que para corresponde a um ano e três meses, para uma média de 20 horas de produção semanais. Este cálculo nunca tinha sido efetuado nem a recomendação seguida, prevalecendo a observação visual do estado geral da malha do tapete superior. Em virtude dos resultados obtidos anteriormente no subcapítulo 3.1.3.1, página 28, esta informação visual pode ser substituída pela observação sistemática da forma dos pontos tostados à saída do forno: se, em qualquer zona do tapete, mais de 30% dos *chips* tiverem pontos tostados largos em 100% da sua superfície, independentemente da temperatura de trabalho, deve-se considerar a substituição do tapete superior. Este método visual deve ser complementar ao cumprimento do período de vida útil recomendado.

4.3.2. Procedimentos para limpeza correta

Depois de cada produção, os tapetes do forno eram sempre limpos com ar comprimido, mas apenas do lado direito porque a mangueira utilizada não tinha comprimento suficiente para repetir o procedimento do lado esquerdo. Este modo de atuação resultou, ao longo do tempo, na acumulação de resíduos no lado esquerdo do forno, na superfície e no interior dos queimadores tubulares, que, em consequência, provocou alterações nas variações de temperaturas ao longo da largura dos

tapetes (Figura 3.11) e na qualidade da chama. Por outro lado, a limpeza provocava a acumulação de resíduos também na superfície dos pilotos, que tendo uma abertura estreita para a saída da mistura de gás natural-ar, frequentemente apresentavam problemas na ignição e propagação da chama. Assim, definiram-se três tipos de intervenções para a limpeza do interior do forno e dos seus componentes, organizadas de acordo com a importância para o correto funcionamento do equipamento e com base nos resultados das intervenções do Capítulo 3: limpeza semanal, bimensal e semestral. Estes procedimentos encontram-se no Anexo C, página C.1.

Os objetivos da limpeza correta do interior do forno são os seguintes:

- Manter as variações de temperaturas dos tapetes nos valores de especificação;
- Garantir a correta ignição e a rápida propagação das chamas dos queimadores e dos pilotos;
- Garantir chamas azuis ao longo dos queimadores e dos pilotos;
- Evitar a acumulação de resíduos;
- Manter os tapetes limpos;
- Garantir a boa qualidade do produto.

4.3.3. Revisão das intervenções de manutenção

Em consequência dos resultados obtidos no Capítulo 3 e numa perspetiva de melhoria do funcionamento geral do forno, propuseram-se as seguintes alterações às intervenções existentes de manutenção:

- **Manutenção semanal:**
 - Queimadores infravermelhos: verificação intensa do seu estado e do aspeto geral (cor correta, manchas escuras e *flame tails*);
 - Tapetes do forno: verificação intensa da centragem;
 - Queimadores tubulares, pilotos e tapetes do forno: efetuar a limpeza exterior com ar comprimido.
- **Manutenção bimensal:**
 - Pilotos: efetuar a limpeza exterior com papel de lixa;
 - Queimadores tubulares: efetuar a limpeza exterior com escovilhão de metal;
 - Misturadores: verificação e medição do teor de oxigénio nas misturas de gás natural-ar;
 - Chaminés: verificação e medição do diferencial de pressão.
- **Manutenção semestral:**
 - Queimadores tubulares: efetuar a limpeza interior com ar comprimido.

CAPÍTULO 5. ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA

*Até que uma onda de energia o trouxe de novo ao mundo.*⁴⁶

Miguel Torga em *Os Bichos*

5.1. BALANÇOS AO FORNO

5.1.1. Balanço mássico

Para se efetuar o balanço mássico ao forno é necessário determinar a taxa de produção de *chips*, que é definida no laminador (ver subcapítulo 1.1.6, página 5), com base no rácio entre o número de dentes dos seus componentes, na produção da cortadora e nas r.p.m. do rolo dianteiro.

Tabela 5.1. Características dos componentes do laminador e produção de *chips*.

Componente do laminador	N.º de dentes	Produção <i>chips</i> /rotação	r.p.m.	Produção (<i>chips</i> /h)
Cortadora	28	80	—	—
Rolo dianteiro	75	—	45	578 571

$$\text{Produção (chips/h)} = \frac{75}{28} \times 80 \frac{\text{chips}}{\text{rotação}} \times 45 \text{ r.p.m.} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}}$$

Todas as correntes que são utilizadas no balanço mássico ao forno foram nomeadas de acordo com o esquema da Figura 5.1. Consideraram-se duas correntes de exaustão, uma para cada chaminé, porque as suas condições operatórias são diferentes (ver Tabela 5.5).

As composições das correntes de entrada e de saída de produto (*i* e *f*) foram determinadas com base nos valores médios de humidade e de “peso 10” dos *chips* obtidos durante o funcionamento do forno.

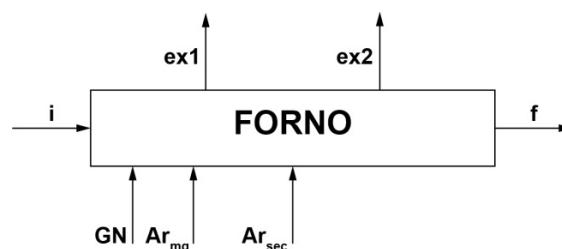


Figura 5.1. Denominação das correntes para o balanço mássico ao forno.

Tabela 5.2. Valores médios das variáveis das correntes *i* e *f*, no dia 11 de abril de 2014.

Corrente	<i>P</i> (Pa)	\bar{t} (°C)	$\overline{P10}$ (g)	\overline{W} (%)	\overline{X} (%)
<i>i</i>	<i>P_i</i>	\bar{t}_i	$\overline{P10}_i$	\overline{W}_i	\overline{X}_i
<i>f</i>	<i>P_f</i>	\bar{t}_f	$\overline{P10}_f$	\overline{W}_f	\overline{X}_f

A humidade em base seca (X) foi determinada a partir da humidade em base húmida (W) pela seguinte equação:

$$X = \frac{W}{1 - W} \quad (5.1)$$

As composições das correntes de entrada das misturas de gás natural-ar (IV, TS, TM, TI e Pil) foram determinadas com base nos teores de oxigénio em cada sistema de queimadores e nos pilotos, e na distribuição do caudal de gás natural pelos mesmos, apresentada anteriormente na Tabela 4.3.

Tabela 5.3. Composições e características das misturas de gás natural-ar, no dia 11 de abril de 2014.

Sistema de queimadores	O _{2,Ar,mg} (% mol)	N _{2,Ar,mg} (% mol)	GN (% mol)	t _{GN} (°C)	t _{Ar,mg} ^c (°C)	%q _{v,GN}
IV	O _{2,Ar,mg,IV}	N _{2,Ar,mg,IV}	GN _{IV}	t _{GN}	13,0	25,6
TS	O _{2,Ar,mg,TS}	N _{2,Ar,mg,TS}	GN _{TS}	t _{GN}	13,0	15,5
TM	O _{2,Ar,mg,TM}	N _{2,Ar,mg,TM}	GN _{TM}	t _{GN}	13,0	8,4
TI	O _{2,Ar,mg,TI}	N _{2,Ar,mg,TI}	GN _{TI}	t _{GN}	13,0	36,1
PilQT ^a	O _{2,Ar,mg,PilQT}	N _{2,Ar,mg,PilQT}	GN _{PilQT}	t _{GN}	13,0	10,6
PilIV ^b	O _{2,Ar,mg,PilIV}	N _{2,Ar,mg,PilIV}	GN _{PilIV}	t _{GN}	13,0	3,8
Total						100,0

^aPilotos dos queimadores tubulares.

^bPilotos dos queimadores infravermelhos.

^cTemperatura do ar na mistura de gases (temperatura exterior da fábrica).

Os teores de N_{2,Ar,mg} e GN em cada sistema de queimadores e pilotos da tabela anterior determinaram-se com base na proporção molar dos dois principais constituintes do ar (Tabela 2.3):

$$(\%N_2)_{Ar,mg} = (\%O_2)_{Ar,mg} \frac{78,08}{20,95}$$

$$(\%GN) = 100 - (\%N_2)_{Ar,mg} - (\%O_2)_{Ar,mg}$$

A distribuição para cada tipo de piloto na Tabela 5.3 foi determinada, de forma aproximada, pela área da abertura de saída da mistura gás natural-ar em cada um deles:

Tabela 5.4. Largura e comprimento das aberturas, e a respetiva área, em cada tipo de pilotos.

Tipo de piloto	Largura (cm)	Comprimento (cm)	N.º de pilotos	Área total (cm ²)	%Área total
QT	0,5	239,0	6	717,0	73,77
IV	0,5	255,0	2	255,0	26,23
Total			8	972,0	100,00

As composições das correntes de exaustão foram determinadas com base na análise dos gases de combustão efetuada com um analisador Testo, modelo 300XL, nas tomadas existentes em cada chaminé.

Tabela 5.5. Condições nas duas chaminés do forno, no dia 11 de abril de 2014.

Chaminé	ΔP (inH ₂ O)	P (Pa)	t_{gc}^a (°C)	$O_{2,gc}^b$ (% mol)
1	ΔP_1	P_1	$t_{gc,1}$	$O_{2,gc,1}$
2	ΔP_2	P_2	$t_{gc,2}$	$O_{2,gc,2}$

^aTemperatura dos gases de combustão.

^bTeor de oxigénio nos gases de combustão.

Os balanços molares e mássicos foram realizados com as seguintes bases, determinadas a partir das condições do gás natural na entrada do forno apresentadas anteriormente na Tabela 4.2:

Tabela 5.6. Caudais e volume molar do gás natural, no dia 11 de abril de 2014. A negrito, as bases utilizadas nos balanços ao forno.

$q_{V,GN}$ (m ³ /h)	$q_{M,GN}$ (kmol/h)	$q_{m,GN}$ (kg/h)	$V_{m,GN}$ (m ³ /kmol)
94,5	4,1	71,3	23,2

Os balanços mássicos e molares ao forno e aos compostos obedecem à expressão geral:

$$q_{M,i,entra} + q_{M,i,gerado} = q_{M,i,consumido} + q_{M,i,sai} + q_{M,i,acumulado} \quad (5.2)$$

sendo as parcelas das quantidades gerada e consumida obtidas pelo balanço às reações de combustão completas (Tabela 5.7). A parcela da acumulação foi desprezada porque se considerou o processo em estado estacionário.

Para a resolução dos balanços considerou-se, como aproximação, que os gases da combustão eram divididos de igual forma pelas duas chaminés, assim como a água evaporada das *tortilla chips*.

Neste trabalho não foi determinada a massa molar das *tortilla chips*, mas como as massas de sólido (S) nas correntes *i* e *f* são iguais esta situação não interfere na resolução do balanço molar.

Para a corrente *i* tem-se:

$$q_{m,i} = q_{m,H_2O,i} + q_{m,S,i} = \text{Produção} \frac{\text{chips}}{h} \times P10_i \frac{g}{10 \text{ chips}} \frac{1 \text{ kg}}{1000 g} = q_{m,TC,i}$$

$$q_{m,S,i} = q_{m,i} (1 - \bar{W}_i)$$

$$q_{m,H_2O,i} = q_{m,i} - q_{m,S,i}$$

$$q_{M,H_2O,i} = \frac{q_{m,H_2O,i}}{M_{H_2O}}$$

Para a corrente f tem-se:

$$q_{m,S,f} = q_{m,S,i}$$

$$q_{m,f} = q_{m,S,f} (1 + \bar{X}_f) = q_{m,TC,f}$$

$$q_{m,H_2O,f} = q_{m,f} - q_{m,S,f}$$

$$q_{M,H_2O,f} = \frac{q_{m,H_2O,f}}{M_{H_2O}}$$

A água total evaporada nas *tortilla chips* durante a crostagem determinou-se da seguinte forma:

$$q_{m,H_2O,evap,tot} = q_{m,f} - q_{m,i} = 341,7 \text{ kg/h}$$

$$q_{M,H_2O,evap,tot} = \frac{q_{m,H_2O,evap,tot}}{M_{H_2O}} = 19,0 \text{ kmol/h}$$

Com base na composição molar do gás natural (Tabela 2.1), tem-se para a corrente GN:

$$q_{M,CH_4,GN} = [(\%CH_4)_{GN} q_{M,GN}] / 100$$

$$q_{M,C_2H_6,GN} = [(\%C_2H_6)_{GN} q_{M,GN}] / 100$$

$$q_{M,C_3H_8,GN} = [(\%C_3H_8)_{GN} q_{M,GN}] / 100$$

$$q_{M,C_4H_{10},GN} = [(\%C_4H_{10})_{GN} q_{M,GN}] / 100$$

$$q_{M,C_5H_{12},GN} = [(\%C_5H_{12})_{GN} q_{M,GN}] / 100$$

$$q_{M,N_2,GN} = [(\%N_2)_{GN} q_{M,GN}] / 100$$

$$q_{M,CO_2,GN} = [(\%CO_2)_{GN} q_{M,GN}] / 100$$

Para as correntes Ar_{mg} e Ar_{sec} considerou-se a composição molar do ar (Tabela 2.3):

$$\frac{q_{M,O_2,Ar_{mg}}}{q_{M,N_2,Ar_{mg}}} = \frac{20,95}{78,08}$$

$$\frac{q_{M,O_2,Ar_{sec}}}{q_{M,N_2,Ar_{sec}}} = \frac{20,95}{78,08}$$

$$q_{M,O_2,Ar_{mg}} = \sum_{z=1}^6 \frac{(\%O_2)_z (\%q_{V,GN})_z q_{M,GN}}{(\%GN)_z 100}$$

com z representando cada um dos sistemas de queimadores e pilotos da Tabela 5.3.

Para as correntes de exaustão, ex1 e ex2, tem-se:

$$\frac{q_{M,O_2,ex1}}{q_{M,O_2,ex1} + q_{M,N_2,ex1} + q_{M,H_2O,ex1} + q_{M,CO_2,ex1}} = \frac{(\%O_2)_{gc,ex1}}{100}$$

$$\frac{q_{M,O_2,ex2}}{q_{M,O_2,ex2} + q_{M,N_2,ex2} + q_{M,H_2O,ex2} + q_{M,CO_2,ex2}} = \frac{(\%O_2)_{gc,ex2}}{100}$$

$$q_{M,H_2O,ex1} = q_{M,H_2O,ex2}$$

$$q_{M,CO_2,ex1} = q_{M,CO_2,ex2}$$

Pelas reações completas de combustão (ver subcapítulo 2.1.3, página 14), tem-se:

$$q_{M,CH_4,GN} = q_{M,CH_4,consumido}$$

$$q_{M,C_3H_8,GN} = q_{M,C_3H_8,consumido}$$

$$q_{M,C_2H_6,GN} = q_{M,C_2H_6,consumido}$$

$$q_{M,C_4H_{10},GN} = q_{M,C_4H_{10},consumido}$$

$$q_{M,C_5H_{12},GN} = q_{M,C_5H_{12},consumido}$$

$$q_{M,O_2,consumido} = 2q_{M,CH_4,GN} + \frac{7}{2}q_{M,C_2H_6,GN} + 5q_{M,C_3H_8,GN} + \frac{13}{2}q_{M,C_4H_{10},GN} + 8q_{M,C_5H_{12},GN}$$

$$q_{M,H_2O,gerado} = 2q_{M,CH_4,GN} + 3q_{M,C_2H_6,GN} + 4q_{M,C_3H_8,GN} + 5q_{M,C_4H_{10},GN} + 6q_{M,C_5H_{12},GN}$$

$$q_{M,CO_2,gerado} = q_{M,CH_4,GN} + 2q_{M,C_2H_6,GN} + 3q_{M,C_3H_8,GN} + 4q_{M,C_4H_{10},GN} + 5q_{M,C_5H_{12},GN}$$

O balanço às reações completas de combustão encontra-se resolvido na Tabela 5.7.

Tabela 5.7. Balanço às reações completas de combustão do gás natural, no dia 11 de abril de 2014.

Composto	kmol/h			
	Entra	Consumido	Gerado	Sai
CH ₄	3,8	3,8	—	—
C ₂ H ₆	0,2	0,2	—	—
C ₃ H ₈	0,1	0,1	—	—
C ₄ H ₁₀	0,0	0,0	—	—
C ₅ H ₁₂	0,0	0,0	—	—
H ₂ O	—	—	8,6	8,6
O ₂	47,1	8,8	—	38,3
N ₂	175,6	—	—	175,6
CO ₂	0,0	0,0	4,5	4,5
Total	226,8	12,9	13,1	227,0

Podem-se, então, efetuar os balanços molares aos compostos a partir da equação (5.2) e de todos os resultados anteriores, resolvendo as equações em ordem às variáveis desconhecidas:

$$q_{M,O_2,Ar_{sec}} \text{ e } q_{M,N_2,Ar_{sec}}$$

$$q_{M,H_2O,i} + q_{M,H_2O,gerado} = q_{M,H_2O,f} + q_{M,H_2O,ex1} + q_{M,H_2O,ex2}$$

$$q_{M,O_2,Ar_{mg}} + q_{M,O_2,Ar_{sec}} = q_{M,O_2,consumido} + q_{M,O_2,ex1} + q_{M,O_2,ex2}$$

$$q_{M,N_2,GN} + q_{M,N_2,Ar_{mg}} + q_{M,N_2,Ar_{sec}} = q_{M,N_2,ex1} + q_{M,N_2,ex2}$$

$$q_{M,CO_2,GN} + q_{M,CO_2,gerado} = q_{M,CO_2,ex1} + q_{M,CO_2,ex2}$$

O balanço molar geral ao forno encontra-se resolvido na tabela seguinte:

Tabela 5.8. Balanço molar geral ao forno, no dia 11 de abril de 2014.

Composto	Corrente, kmol/h						
	i	f	GN	Ar _{mg}	Ar _{sec}	ex1	ex2
CH ₄	—	—	3,8	—	—	—	—
C ₂ H ₆	—	—	0,2	—	—	—	—
C ₃ H ₈	—	—	0,1	—	—	—	—
C ₄ H ₁₀	—	—	0,0	—	—	—	—
C ₅ H ₁₂	—	—	0,0	—	—	—	—
H ₂ O	47,0	28,0	—	—	—	13,8	13,8
O ₂	—	—	—	7,0	40,1	15,1	23,2
N ₂	—	—	0,0	26,2	149,4	72,6	103,0
CO ₂	—	—	0,0	—	—	2,2	2,2
Total	47,0	28,0	4,1	33,2	189,5	103,7	142,2

A percentagem total de excesso de oxigénio na combustão é de 435% e na mistura de gás natural-ar é de -21%. O seu cálculo foi efetuado pela seguinte expressão:

$$\%O_2^E = \frac{O_{2,entra} - O_{2,esteq}}{O_{2,esteq}} \times 100 \quad (5.3)$$

Calculou-se também o balanço mássico geral ao forno (Tabela 5.9). Os valores das massas atómicas necessários para determinar as massas molares retiraram-se do *Livro Verde da IUPAC*⁴⁷.

Tabela 5.9. Balanço mássico geral ao forno, no dia 11 de abril de 2014.

Composto	Corrente, kg/h						
	i	f	GN	Ar _{mg}	Ar _{sec}	ex1	ex2
Sólido	S _i	S _f	—	—	—	—	—
CH ₄	—	—	60,2	—	—	—	—
C ₂ H ₆	—	—	7,3	—	—	—	—
C ₃ H ₈	—	—	2,4	—	—	—	—
C ₄ H ₁₀	—	—	1,0	—	—	—	—
C ₅ H ₁₂	—	—	0,1	—	—	—	—
H ₂ O	846,6	504,9	—	—	—	247,9	247,9
O ₂	—	—	—	225,0	1281,8	482,8	743,8
N ₂	—	—	0,3	734,3	4183,3	2033,1	2884,7
CO ₂	—	—	0,0	—	—	98,6	98,6
Total	i	f	71,3	959,3	5465,1	2862,4	3975,0

Como informação complementar sobre o funcionamento do forno, determinou-se a quantidade de água evaporada no tapete superior, com base nos valores de humidade (b.h.) apresentados anteriormente na Tabela 3.14.

Pela equação (5.1) tem-se para a saída do tapete superior:

$$\bar{X}_{TS} = \frac{\bar{W}_{TS}}{1 - \bar{W}_{TS}} = 79,0\%$$

Determinou-se, então, a massa de água evaporada nas *tortilla chips* no tapete superior:

$$q_{m,S,TS} = q_{m,S,i}$$

$$q_{m,TS} = q_{m,S,TS} (1 + \bar{X}_{TS})$$

$$q_{m,H_2O, \text{evap}, TS} = q_{m,TS} - q_{m,i} = 207,5 \text{ kg/h}$$

A massa de água evaporada no tapete superior corresponde a 60,7% do total perdido durante a operação de crostagem.

5.1.2. Balanço entálpico

As correntes utilizadas no balanço entálpico foram nomeadas de acordo com a Figura 5.2.

Como a entalpia é uma função de estado o seu valor absoluto não pode ser conhecido, devendo por isso ser determinada relativamente à entalpia de outra corrente ou relativamente a um estado de referência.

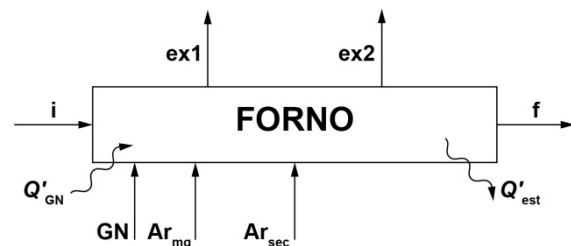


Figura 5.2. Denominação das correntes para o balanço entálpico ao forno.

Tabela 5.10. Estado de referência usado no balanço entálpico.

Pressão (P^{ref})	101 325 Pa
Temperatura (T^{ref})	298,15 K
Estado de agregação	<i>Tortilla chips</i> : sólido
	Água: líquido
	Restantes compostos: gasosos

O estado de referência escolhido é o que apresenta as condições mais adequadas para a resolução do balanço entálpico, uma vez que o estado de agregação da água é igual ao que se encontra no interior das *tortilla chips* e os poderes caloríficos do gás natural estão referenciados a 25,0 °C (298,15 K).

Sendo o estado de agregação de referência para a água líquido, considerou-se o poder calorífico superior para a determinação da energia fornecida pela combustão do gás natural, assim como o caudal volumétrico nas condições PTN, anteriormente apresentado na Tabela 4.2: 91,4 m³/h.

A equação geral do balanço entálpico é semelhante à do balanço mássico e é dada por:

$$Q'_{i,entra} + Q'_{i,gerado} = Q'_{i,consumido} + Q'_{i,sai} + Q'_{i,acumulado} \quad (5.4)$$

A parcela da acumulação de energia foi desprezada porque se considerou o processo em estado estacionário. A equação geral de conservação de energia pode então ser traduzida nas correntes da Figura 5.2:

$$\Delta H_i + \Delta H_{GN} + \Delta H_{Ar_{mg}} + \Delta H_{Ar_{sec}} + Q'_{GN} = \Delta H_f + \Delta H_{ex,1} + \Delta H_{ex,2} + Q'_{est} \quad (5.5)$$

As parcelas da equação anterior são definidas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \Delta H_i &= q_{m,S,i} \bar{C}_{p,S}^{-T^{ref},T_i} (T_i - T^{ref}) + q_{M,H_2O,i} \bar{C}_{p,H_2O,l}^{-T^{ref},T_i} (T_i - T^{ref}) \\ &= q_{m,TC,i} C_{p,TC} (T_i - T^{ref}) + q_{M,H_2O,evap} \bar{C}_{p,H_2O,l}^{-T^{ref},T_i} (T_i - T^{ref})^{\S} \\ \Delta H_f &= q_{m,S,f} \bar{C}_{p,S}^{-T^{ref},T_f} (T_f - T^{ref}) + q_{M,H_2O,f} \bar{C}_{p,H_2O,l}^{-T^{ref},T_f} (T_f - T^{ref}) \\ &= q_{m,TC,f} C_{p,TC} (T_f - T^{ref})^{\S} \\ \Delta H_{GN} &= q_{M,GN} \bar{C}_{p,GN}^{-T^{ref},T_{GN}} (T_{GN} - T^{ref}) \\ \Delta H_{Ar_{mg}} &= q_{M,O_2,Ar_{mg}} \bar{C}_{p,O_2,Ar_{mg}}^{-T^{ref},T_{Ar_{mg}}} (T_{Ar_{mg}} - T^{ref}) + q_{M,N_2,Ar_{mg}} \bar{C}_{p,N_2,Ar_{mg}}^{-T^{ref},T_{Ar_{mg}}} (T_{Ar_{mg}} - T^{ref}) \\ \Delta H_{Ar_{sec}} &= q_{M,O_2,Ar_{sec}} \bar{C}_{p,O_2,Ar_{sec}}^{-T^{ref},T_{Ar_{sec}}} (T_{Ar_{sec}} - T^{ref}) + q_{M,N_2,Ar_{mg}} \bar{C}_{p,N_2,Ar_{sec}}^{-T^{ref},T_{Ar_{sec}}} (T_{Ar_{sec}} - T^{ref}) \\ \Delta H_{ex1} &= q_{M,gc,ex1} \bar{C}_{p,gc,ex1}^{-T^{ref},T_{ex1}} (T_{ex1} - T^{ref}) + q_{M,H_2O,ex1} \left[\bar{C}_{p,H_2O,v}^{-T^{ref},T_{ex1}} (T_{ex1} - T^{ref}) + \Delta_{vap} H_{H_2O}^{T^{ref}} \right] \\ \Delta H_{ex2} &= q_{M,gc,ex2} \bar{C}_{p,gc,ex2}^{-T^{ref},T_{ex2}} (T_{ex2} - T^{ref}) + q_{M,H_2O,ex2} \left[\bar{C}_{p,H_2O,v}^{-T^{ref},T_{ex2}} (T_{ex2} - T^{ref}) + \Delta_{vap} H_{H_2O}^{T^{ref}} \right] \\ Q'_{GN} &= q_{V,GN}^{PTN} PCS \\ Q'_{est} &= \sum_{x=1}^9 h_{L,x} A_{s,x} (T_{s,x} - T_{Ar_{sec}}) \times \left(\frac{3,6 \text{ kJ}}{1 \text{ Wh}} \right) \end{aligned}$$

sendo Q'_{est} determinado pelo somatório do calor transferido por convecção nas 9 secções (x) da estrutura, $A_{s,x}$ a área de cada secção (m^2) e $T_{s,x}$ a temperatura na respetiva superfície (K). Consideraram-se apenas as secções da estrutura com perdas de calor relevantes e, por aproximação, que a tampa do forno era plana (Figura 5.3).

^{\S} Como a capacidade calorífica das *tortilla chips* depende da sua humidade (b.s.) [equação (5.15)], considerou-se que a água existente na corrente de entrada corresponde à quantidade evaporada no processo de crostagem. Ou seja, a massa de *tortilla chips* é constante e igual à da corrente de saída, e inclui a massa de água correspondente à humidade (b.s.) final (Tabela 5.2).

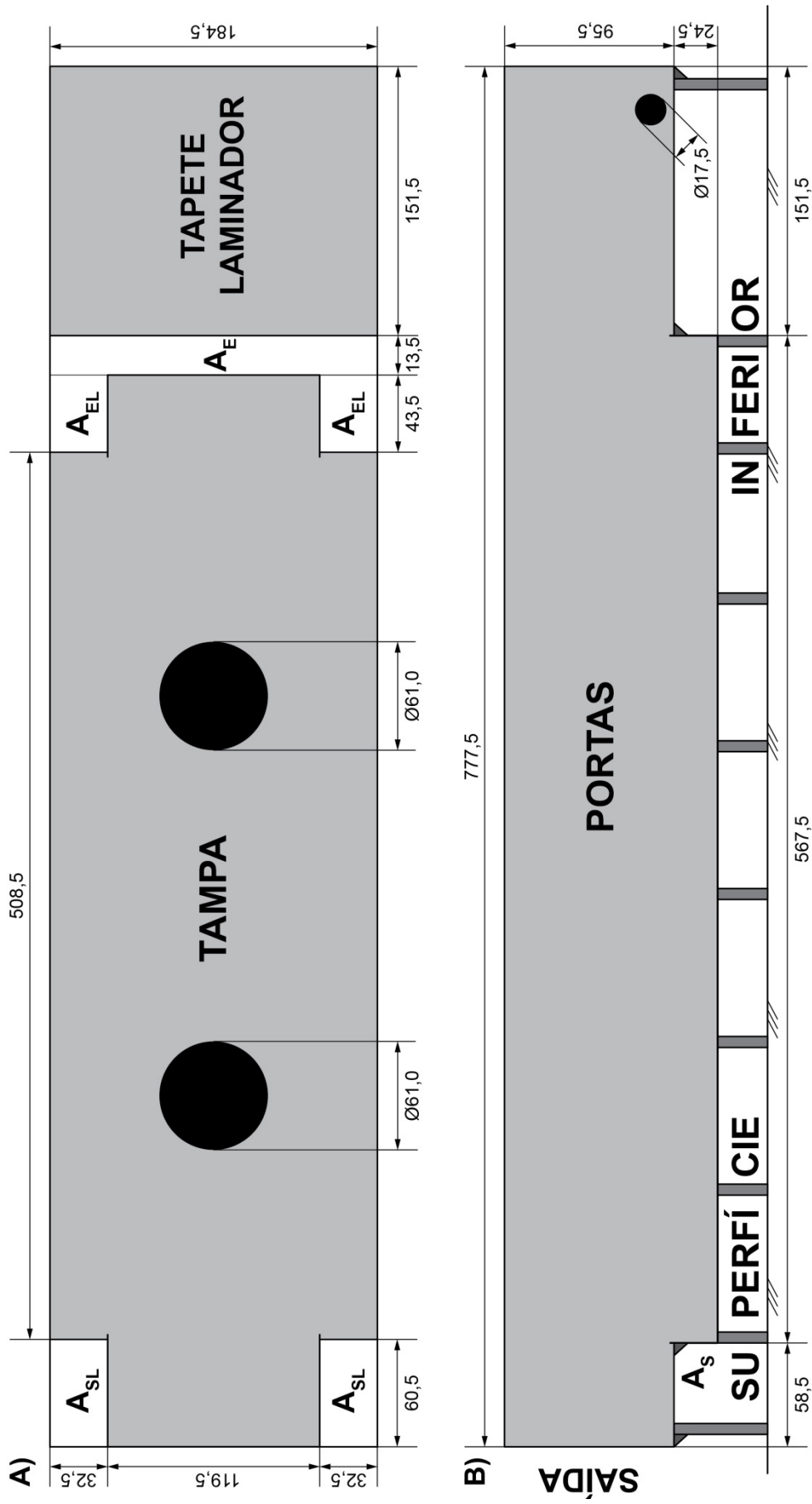


Figura 5.3. Dimensões da estrutura exterior do forno, em centímetros: A) vista de topo; B) vista lateral esquerda. Indicam-se as seções estudadas no balanço entálpico, incluindo as aberturas (A).

Para determinar o calor perdido na estrutura foi necessário calcular o coeficiente de transferência de calor entre a superfície do forno e o ar dentro da fábrica, h . Considerou-se, então, que o calor libertado pela estrutura era transferido para o ar através de convecção natural, o que implica a seguinte relação entre os números adimensionais:

$$Nu = f(Gr, Pr)$$

sendo Nu o número de *Nusselt*, Gr o número de *Grashof* e Pr o número de *Prandtl*, determinados pelas seguintes expressões:

$$Nu_L = \frac{hL}{k} \quad (5.6)$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (5.7)$$

$$Gr_L = \frac{\beta g \rho^2 L^3 (T_s - T_\infty)}{\mu^2} \quad (5.8)$$

$$Ra_L = Gr_L Pr \quad (5.9)$$

sendo h o coeficiente de transferência de calor entre a superfície do forno e o ar dentro da fábrica [$W/(m^2 \cdot K)$], L o comprimento específico da secção da superfície (m), k a condutividade térmica do ar [$W/(m \cdot K)$], C_p a capacidade calorífica do ar [$W/(kg \cdot K)$], μ a viscosidade do ar (Pa·s), β o coeficiente de expansão cúbica do ar (K^{-1}), g a aceleração da gravidade ($9,807 \text{ m/s}^2$), T_s a temperatura da superfície (K), T_∞ a temperatura longe da superfície, ou seja, $T_{Ar,sec}$ (K) e Ra o número adimensional de Rayleigh.

As propriedades do fluido, ou seja, do ar dentro da fábrica, Ar_{sec} , foram determinadas à temperatura do filme, T_f , e à pressão atmosférica, e obtidas no livro de Welty, Wicks e Wilson⁴⁸:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (5.10)$$

O mecanismo de transferência de calor por convecção natural consiste no movimento de um fluido próximo de uma superfície sólida, devido à diferença de densidades existente. Por isso, os coeficientes e as correlações de transferência de calor por convecção foram calculados segundo a geometria de cada secção x . As correlações foram consultadas no livro de Welty, Wicks e Wilson⁴⁸:

- Fluxo convectivo natural em placas verticais: determinado pela equação de Churchill e Chu (5.11), para $Ra_L < 10^9$, sendo L a altura da secção.

$$Nu_L = 0,68 + \frac{0,670 Ra_L^{1/4}}{\left[1 + (0,492 / Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (5.11)$$

- Fluxo convectivo natural em placas horizontais: determinado pelas correlações de McAdams, sendo L o rácio entre a área e o perímetro da secção.

- Superfície quente virada para cima:

$$Nu_L = 0,54Ra_L^{1/4} \quad 10^5 < Ra_L < 2 \times 10^7 \quad (5.12)$$

$$Nu_L = 0,14Ra_L^{1/3} \quad 2 \times 10^7 < Ra_L < 3 \times 10^{10} \quad (5.13)$$

- Superfície quente virada para baixo:

$$Nu_L = 0,27Ra_L^{1/4} \quad 3 \times 10^5 < Ra_L < 10^{10} \quad (5.14)$$

As temperaturas do produto e das secções da estrutura do forno foram determinadas com o termómetro de infravermelhos, utilizando as emissividades apresentadas na Tabela 3.1.

Na tabela seguinte resumem-se as temperaturas de cada corrente do balanço entálpico:

Tabela 5.11. Temperaturas das correntes do balanço entálpico.

Temperatura da corrente (°C)						
t_i	t_f	t_{GN}	$t_{Ar,mg}$	$t_{Ar,sec}$	t_{ex1}	t_{ex2}
t_i	t_f	t_{GN}	13,0	27,5	t_{ex1}	t_{ex2}

Os resultados do calor perdido pela estrutura encontram-se na Tabela 5.12.

Tabela 5.12. Resultados dos cálculos ao calor perdido na estrutura do forno.

Secção da estrutura (x)	\bar{t}_s (°C)	A_s (m ²)	h_L [W/(m ² ·K)]	Q'_{est} (MJ/h)
Tapete do laminador	55,1	2,80	5,60	1,6
Portas	31,9	13,62	2,04	0,5
		2,87	2,16	
Tampa	102,6	10,04	7,48	20,3
Superfície inferior	124,4	14,34	2,00	10,0
Saída	139,1	1,76	4,64	3,3
Abertura da entrada (A_E)	467,3	0,25	12,15	4,8
Aberturas da entrada, laterais (A_{EL})	165,6	0,28	8,67	1,2
Abertura da saída (A_S)	370,5	0,45	8,05	4,5
Aberturas da saída, laterais (A_{SL})	160,1	0,39	8,59	1,6
Total				47,8

A capacidade calorífica das *tortilla chips* foi consultada no artigo de Chen e Moreira²⁹:

$$C_{p,TC} [\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})] = 2,506 + 2,503X - 1,557X^2 \quad (5.15)$$

com $0,01 < X < 1,22$.

As capacidades caloríficas dos compostos foram determinadas a partir das equações e constantes características obtidas no livro de Perry⁴² [equações (5.16) e (5.17)]. As capacidades caloríficas molares das misturas gasosas determinaram-se com base nas frações molares e nos calores específicos dos seus constituintes.

Compostos com estado de referência líquido: $C_{p,i} = a_i + b_i T + c_i T^2 + d_i T^3 + e_i T^4 \quad (5.16)$

Compostos com estado de referência gasoso: $C_{p,i} = a_i + b_i \left[\frac{c_i/T}{\sinh(c_i/T)} \right]^2 + d_i \left[\frac{e_i/T}{\cosh(e_i/T)} \right]^2 \quad (5.17)$

A capacidade calorífica média entre as temperaturas T^{ref} e T é definida da seguinte forma:

$$\bar{C}_{p,i}^{T^{\text{ref}},T} = \frac{\int_{T^{\text{ref}}}^T C_{p,i} dT}{T - T^{\text{ref}}} \quad (5.18)$$

Tabela 5.13. Capacidades caloríficas molares médias dos compostos utilizados, entre T^{ref} e T .

Composto	$\bar{C}_{p,i}^{T^{\text{ref}},T}$ [kJ/(kmol.K)]					
	t_i	t_{GN}	$t_{\text{Ar,mg}}$	$t_{\text{Ar,sec}}$	t_{ex1}	t_{ex2}
CH ₄	—	35,68	—	—	—	—
C ₂ H ₆	—	52,40	—	—	—	—
C ₃ H ₈	—	73,48	—	—	—	—
C ₄ H ₁₀	—	98,36	—	—	—	—
C ₅ H ₁₂	—	119,81	—	—	—	—
H ₂ O _{,v}	—	—	—	—	35,50	35,18
H ₂ O _{,l}	75,33	—	—	—	—	—
O ₂	—	—	29,32	29,35	31,24	30,97
N ₂	—	29,13	29,13	29,13	29,80	29,64
CO ₂	—	37,25	—	—	44,66	43,92
GN	—	37,47	—	—	—	—
GC	—	—	—	—	31,10	30,64

A entalpia de vaporização da água à T^{ref} foi determinada a partir da equação obtida no livro de Perry⁴²: 43 869,3 kJ/kmol.

O balanço entálpico geral ao forno encontra-se resolvido na tabela seguinte:

Tabela 5.14. Balanço entálpico geral ao forno, no dia 11 de abril de 2014.

Entrada MJ/h		Saída MJ/h	
ΔH_i	49,3	ΔH_f	318,3
ΔH_{GN}	0,0	ΔH_{ex1}	2 006,4
$\Delta H_{Ar_{mg}}$	-11,6	ΔH_{ex2}	2 245 ,1
$\Delta H_{Ar_{sec}}$	13,7	Q'_{est}	47,8
Q'_{GN}	3 910,5	Total	4 617,6
Total	3 961,9		

A diferença registada entre as correntes de saída e as correntes de entrada corresponde a 16,8% da energia introduzida no forno pelo gás natural. Esta diferença poderá dever-se aos pressupostos assumidos na distribuição dos caudais de exaustão ou a erros de amostragem. Porém, a diferença obtida é aceitável e os resultados da Tabela 5.14 podem servir de base para determinar a distribuição da energia fornecida pelo gás natural, a partir das seguintes expressões:

Eficiência: $Q'_{TC} = Q'_{TC,aquecimento} + Q'_{TC,evaporação}$

Aquecimento das *tortilla chips*: $Q'_{TC,aquecimento} = \Delta H_f - \Delta H_i = q_{m,TC,f} C_{p,TC} (T_i - T_f) - q_{M,H_2O,i} \bar{C}_{p,H_2O,l}^{T_{ref},T_i} (T_i - T_{ref})$

Evaporação da humidade das *tortilla chips*: $Q'_{TC,evaporação} = q_{M,H_2O,i} \Delta_{vap} H_{H_2O}^{T_{ref}}$

Calor perdido na chaminé 1: $Q'_{chaminé1} = \Delta H_{ex1} - 1/2 (\Delta H_{Ar_{mg}} + \Delta H_{Ar_{sec}} + \Delta H_{GN}) - 1/2 (q_{M,H_2O,i} \Delta_{vap} H_{H_2O}^{T_{ref}})$

Calor perdido na chaminé 2: $Q'_{chaminé2} = \Delta H_{ex2} - 1/2 (\Delta H_{Ar_{mg}} + \Delta H_{Ar_{sec}} + \Delta H_{GN}) - 1/2 (q_{M,H_2O,i} \Delta_{vap} H_{H_2O}^{T_{ref}})$

Calor perdido na estrutura: $Q'_{est} = 47,8 \text{ MJ/h}$

Energia fornecida pelo gás natural: $Q'_{GN} = 3910,5 \text{ MJ/h}$

Como aproximação, considerou-se que a energia fornecida pelas correntes de entrada Ar_{mg} , Ar_{sec} e GN era distribuída de forma igual para cada chaminé.

A distribuição da energia fornecida pelo gás natural ao forno encontra-se representada na figura seguinte:

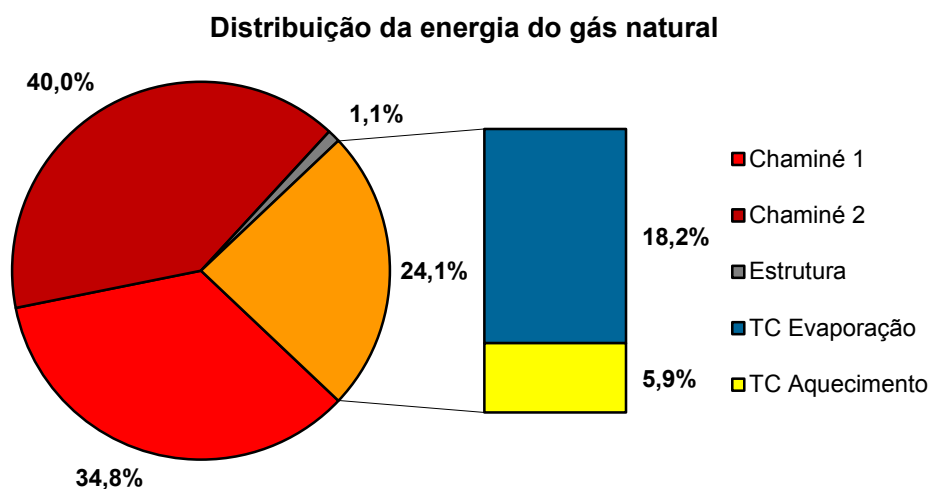


Figura 5.4. Distribuição da energia fornecida pelo gás natural ao forno.

Na observação da figura *supra* nota-se que o forno tem uma eficiência de 24,1% e que as duas chaminés são os locais por onde maior quantidade de energia fornecida é perdida. Assim, estes são os locais preferenciais para atuar numa otimização energética do forno, como se propõe no subcapítulo 5.2.2, página 63, com a recuperação de calor perdido nos gases de combustão para pré-aquecer o ar primário.

5.2. SUGESTÕES PARA POUPANÇA DE ENERGIA

5.2.1. Remoção de pilotos desnecessários

Estudou-se a possibilidade de remover dois pilotos na estrutura do forno, que não são necessários porque não lhes correspondem estruturas de queimadores tubulares que necessitem da sua chama para arrancarem. Tratam-se do piloto do lado direito do tapete superior e do piloto do lado esquerdo do tapete médio (Figura 5.5). Assim, com base na distribuição do caudal de gás natural apresentada na Tabela 4.7 e na área da abertura de cada piloto (Tabela 5.4), determina-se a poupança de energia para o consumo máximo do forno nas condições do fornecedor e com as válvulas de borboletas ajustadas.

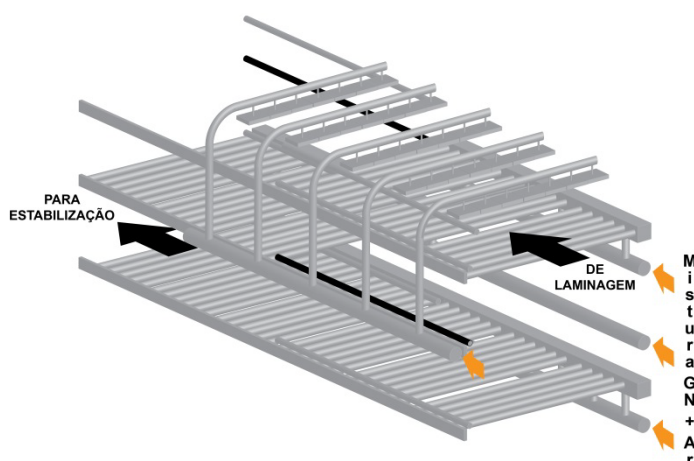


Figura 5.5. Indicação dos pilotos a remover na estrutura do forno (cor negra).

Tabela 5.15. Resultados da remoção de dois pilotos desnecessários.

Parâmetro	Com pilotos		Sem pilotos	
	q_v^{forn} (m ³ /h)	% q_v	q_v^{forn} (m ³ /h)	% q_v
IV	24,7	21,7	24,7	21,7
TS	18,7	16,5	18,7	16,5
TM	20,3	17,9	20,3	17,9
TI	41,8	36,8	41,8	36,8
Pil _{QT}	5,9	5,2	3,9	3,5
Pil _{IV}	2,1	1,8	2,1	1,8
Total	113,5	100,0	111,6	98,2
Poupança de GN (m³/h)	0,0		2,0	
Poupança de GN (€/ano)^a	0		968	

^aAssumiram-se 20 horas de produção por semana.

A poupança de gás natural registada na tabela anterior é de 2% em relação a um consumo médio de 94,3 m³/h nas condições do fornecedor, o que permite ao final do ano realizar mais uma produção de 21,5 horas.

O processo de remoção dos dois pilotos deve ser acompanhado por uma redução da intensidade da chama nos restantes, para minimizar as possíveis consequências de aquecimentos diferentes nas laterais dos tapetes superior e médio, como desvios à centragem durante o funcionamento. Esta remoção conduzirá também a melhorias no desgaste dos tapetes e à minimização dos pontos tostados de forma larga no lado direito do forno (ver subcapítulo 3.2.3.1, página 35). No geral, esta intervenção requer muito pouco material e alguma mão de obra, o que, associado aos benefícios resultantes, garante um retorno rápido do dinheiro investido sendo, portanto, uma sugestão de poupança de energia que deve merecer mais atenção no futuro.

5.2.2. Recuperação de calor

Estudou-se a possibilidade de pré-aquecer o ar primário a partir dos gases de combustão que, com o forno em funcionamento estável, são expelidos pelas chaminés no telhado a uma temperatura de 300-400 °C. Esta sugestão dividiu-se em duas hipóteses:

- **Minimização das alterações estruturais:** começou-se por analisar a situação que minimizava as intervenções na tubagem de ar primário existente e os custos de equipamento. Porém, a manutenção da atual tubagem de PVC limitava a temperatura de pré-aquecimento do ar primário à temperatura máxima recomendada para o material (60 °C)⁴⁴, o que resultava num aproveitamento muito limitado de energia (cerca de 1%) face à necessidade de aquisição de um recuperador de calor (permutador do tipo ar-ar) e de um novo ventilador. Esta hipótese foi, por isso, considerada economicamente inviável;

- **Pré-aquecimento do ar primário até 300-350 °C:** esta hipótese resulta numa poupança de energia na ordem dos 7-8%, o que provavelmente pode justificar a aquisição de uma nova tubagem, de um novo ventilador e de um recuperador de calor (Tabela 5.16). No entanto, os cálculos para o dimensionamento da nova tubagem e do novo equipamento não foram efetuados por falta de tempo. Esta hipótese, em virtude dos resultados apresentados, deve ser considerada para um aprofundado estudo futuro.

Para a determinação da poupança de gás natural resultante da instalação de um recuperador de calor considerou-se o método recomendado no artigo de Rebello, Kohnken e Phipps Jr.⁴⁹:

- A energia total que entra no forno é a mesma antes e depois da instalação;
- As temperaturas dos gases de combustão são as mesmas, antes e depois da instalação;
- O excesso de ar é o mesmo, antes e depois da instalação.

Tabela 5.16. Poupança de gás natural devido ao aumento da temperatura do ar primário.

Parâmetro	$t_{Ar,mg}$ (°C)					
	13	50	100	200	300	400
Eficiência (%)	28,2	28,4	28,8	29,5	30,3	31,2
Perdas nas chaminés (%)	87,3	87,2	87,0	86,6	86,3	85,9
Perdas na estrutura (%)	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4
Total (%)	116,7	116,8	117,0	117,4	117,9	118,5
q_v^{forn} (m ³ /h)	96,5	95,6	94,4	91,9	89,5	87,0
Poupança de GN (%)	0	1	2	5	7	10
Poupança de GN (€/ano) ^a	0	437	1028	2222	3436	4677

^aAssumiram-se 20 horas de produção por semana.

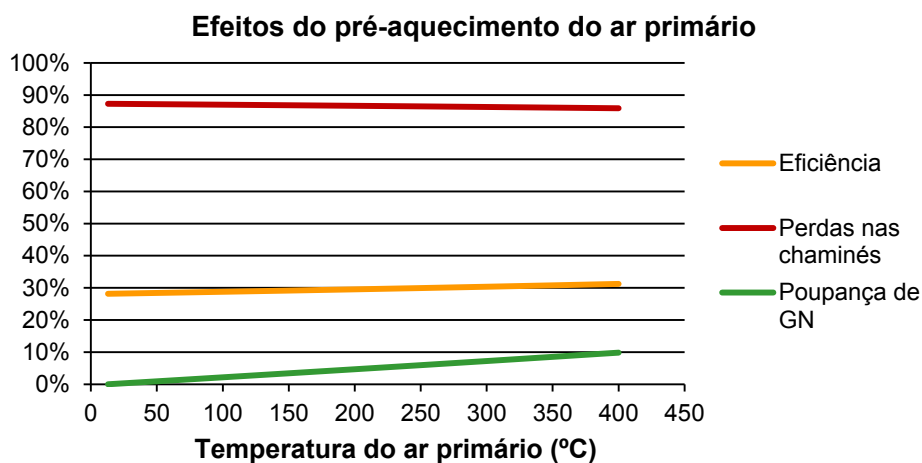


Figura 5.6. Consequências do pré-aquecimento do ar primário na eficiência, nas perdas nas chaminés e na poupança de gás natural.

5.2.3. Otimização energética nos períodos de chama baixa

A frequência dos ventiladores dos gases de combustão foi ajustada para variar com o caudal volumétrico de gás natural que entra no forno [equação (4.15)], de forma a proporcionar um melhor arranque (ver subcapítulo 4.2.3, página 46) e poupanças de gás natural nos períodos de chama baixa (válvulas de borboleta a 0%). Estes períodos correspondem a um intervalo de tempo de paragem na produção, de aproximadamente 2 horas, em que se procede à mudança de aroma e à limpeza obrigatória da linha. Por questões de operacionalidade, o forno é mantido em funcionamento mas com as válvulas de borboleta fechadas.

Durante o período de chama baixa, a frequência dos ventiladores era constante e igual a 20%. Porém, com a redução do valor mínimo para 10% e com a implementação da equação que regula a frequência com o caudal de entrada de gás natural, atingiu-se o valor de 13%. Este valor de frequência a chama baixa será acertado com o ajuste das válvulas de borboleta (ver subcapítulo 4.2.1, página 43): para o caudal mínimo de 48,7 m³/h os ventiladores trabalharão numa frequência de 16%.

Com a implementação desta otimização a poupança energética durante o período de chama baixa é notória, já que para o mesmo caudal de gás natural de entrada, a energia acumulada no forno é superior. O cálculo desta poupança não foi efetuado por falta de tempo, uma vez que se tratou de uma intervenção recente e não se registaram os valores necessários para determinar o balanço entálpico ao forno em estado transiente.

CAPÍTULO 6. ANÁLISE MULTIVARIADA

(...) *Toda a beleza espectral, transferida, sucedânea,
Toda essa Beleza-sem-Suporte,
Desconjuntada, emersa, variável sempre
E livre — em mutações contínuas,
Em insondáveis divergências...*⁵⁰

Mário de Sá-Carneiro em *Manucure*

Foram estudados os dados do processo de fabrico de *tortilla chips* registados durante o ano de 2013. Como todos os valores foram introduzidos de forma manual na base de dados, muitos deles com atraso em relação à hora de registo e baseados na memória do operador aquando da sua visualização no processo, era conhecido à partida que algumas variáveis e observações, que se sabiam estarem correlacionadas, poderiam sofrer de graves problemas de correlação. Não obstante, optou-se por prosseguir o estudo estatístico com o objetivo de aprofundar as relações entre as variáveis do processo, mesmo que subtis.

Esta análise incidiu exclusivamente nas 9 variáveis do processo registadas até ao final da operação de crostagem, com 2944 observações cada:

- **Tempo de repouso (*Trep*):** tempo de descanso do milho depois da cozedura;
- **Humidade do milho (*Hmilho*):** registada no tapete de drenagem, depois do repouso do milho;
- **Temperatura do milho (*Tmilho*):** registada no tapete de drenagem, depois do repouso do milho;
- **Distância entre as pedras do moinho (*Dist*):** registada no moinho;
- **Temperatura da massa (*Tmassa*):** registada à entrada do forno;
- **Humidade à entrada do forno (*Hent*):** humidade dos *chips* à entrada do forno;
- **“Peso 10” à entrada do forno (*P10ent*):** “peso 10” dos *chips* à entrada do forno;
- **Humidade à saída do forno (*Hsaí*):** humidade dos *chips* à saída do forno;
- **“Peso 10” à saída do forno (*P10saí*):** “peso 10” dos *chips* à saída do forno.

6.1. PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS

Começou-se por remover todos os *outliers*, ou seja, todos os dados anómalos, presentes nas observações das variáveis estudadas, com a ferramenta *Boxplot* do *software* Minitab[®]. Os *outliers*, neste caso, estavam essencialmente relacionados com erros na escrita das observações na base de dados.

6.2. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS OPERATÓRIOS

6.2.1. Relações bi-variáveis

Prosseguiu-se o estudo com a visualização das relações bi-variáveis através das ferramentas *Matrix Plot* e *Correlation Matrix* do software Minitab®, de modo a obter-se um panorama geral sobre as relações existentes entre as variáveis estudadas (Figura 6.1 e Tabela 6.1).

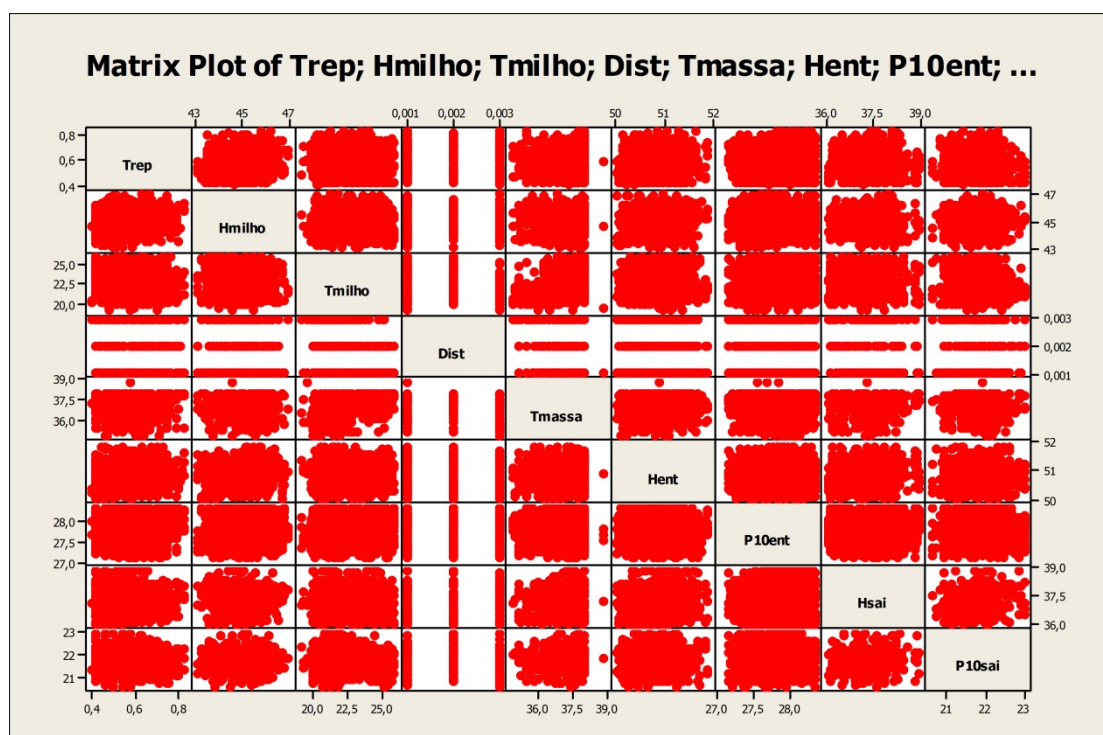


Figura 6.1. Matrix Plot das variáveis em estudo.

Tabela 6.1. Correlation Matrix das variáveis em estudo.

Correlation matrix	Trep								
Hmilho	0,169	Hmilho							
Tmilho	-0,043	0,062	Tmilho						
Dist	0,002	-0,106	-0,277	Dist					
Tmassa	-0,043	0,070	0,422	-0,282	Tmassa				
Hent	0,125	0,160	0,037	0,043	-0,005	Hent			
P10ent	0,012	0,053	-0,001	-0,115	0,067	-0,045	P10ent		
Hsai	-0,016	0,045	-0,014	-0,050	0,099	0,140	-0,045	Hsai	
P10sai	-0,060	-0,039	-0,041	0,087	0,021	-0,040	0,069	0,088	P10sai

Pela observação da figura e tabela *supra* comprovam-se as fracas correlações entre as variáveis. A melhor correlação obtida é entre as variáveis *Tmilho* e *Tmassa* porque são dados retirados em zonas próximas do processo, num intervalo de tempo curto e com a mesma frequência.

6.2.2. Classificação hierárquica

Para classificar as variáveis em grupos efetuou-se a sua aglomeração em *clusters*. Isto foi realizado no *software* Minitab® com a construção de um dendrograma (diagrama em árvore), que é uma representação gráfica da classificação hierárquica das variáveis. Inicialmente estas são representadas separadas (similaridade 100%) e vão sendo progressivamente aglomeradas pela sua “proximidade” até que todas estejam reunidas num só *cluster*. O nível de similaridade de cada *cluster* é, por isso, uma percentagem da distância mínima dos dados aglomerados relativamente à distância máxima entre todas as variáveis.

Neste caso, após tentativas com outros métodos de ligação, optou-se por definir a distância entre os *clusters* de forma completa. Este método, conhecido também por *furthest neighbor*, utiliza a distância máxima entre duas variáveis em *clusters* diferentes para definir a ligação.

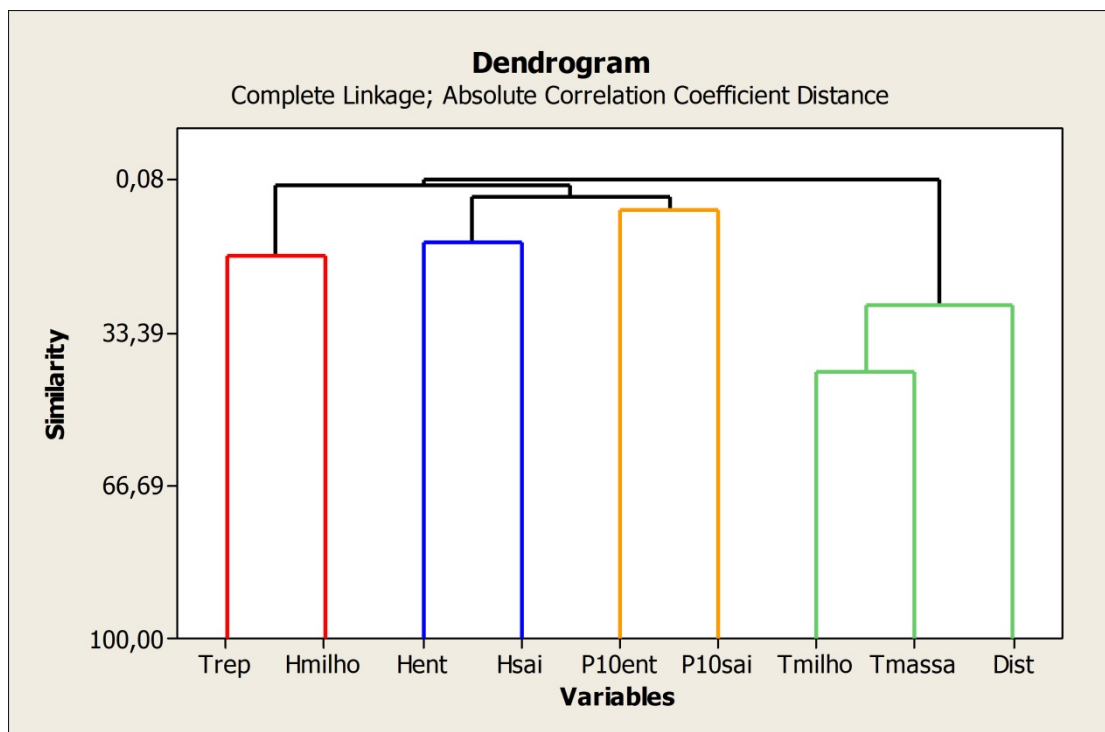


Figura 6.2. Dendrograma das variáveis em estudo.

Devido às fracas correlações dos dados operatórios decidiu-se cortar o dendrograma por um valor de similaridade baixo (6,93) para garantir o máximo de *clusters* possível. Assim, conseguiram identificar-se 4 *clusters* que aglomeram todas as variáveis estudadas (Figura 6.2). Podem-se, então, retirar algumas conclusões como, por exemplo, o tempo de repouso (*Trep*) estar relacionado com a humidade do milho (*Hmilho*) ou as observações da temperatura do milho (*Tmilho*) serem semelhantes às da temperatura da massa (*Tmassa*). Quanto mais elevada é a similaridade do *cluster*, mais próximas estão as suas variáveis e maior é a sua importância na base de dados.

Apesar das baixas similaridades dos *clusters* da Figura 6.2, justificadas pela natureza irregular dos dados operatórios utilizados, todas estas aglomerações fazem sentido quando aplicadas ao processo.

6.2.3. Análise dos componentes principais

A utilização dos componentes principais permite reduzir o número de variáveis originais num conjunto menor e igualmente representativo do sistema. Para isso recorreu-se ao *Loading Plot* do software Minitab® (Figura 6.3), que descreve as variáveis em apenas dois componentes, podendo-se retirar conclusões sobre as suas correlações e importância na base de dados.

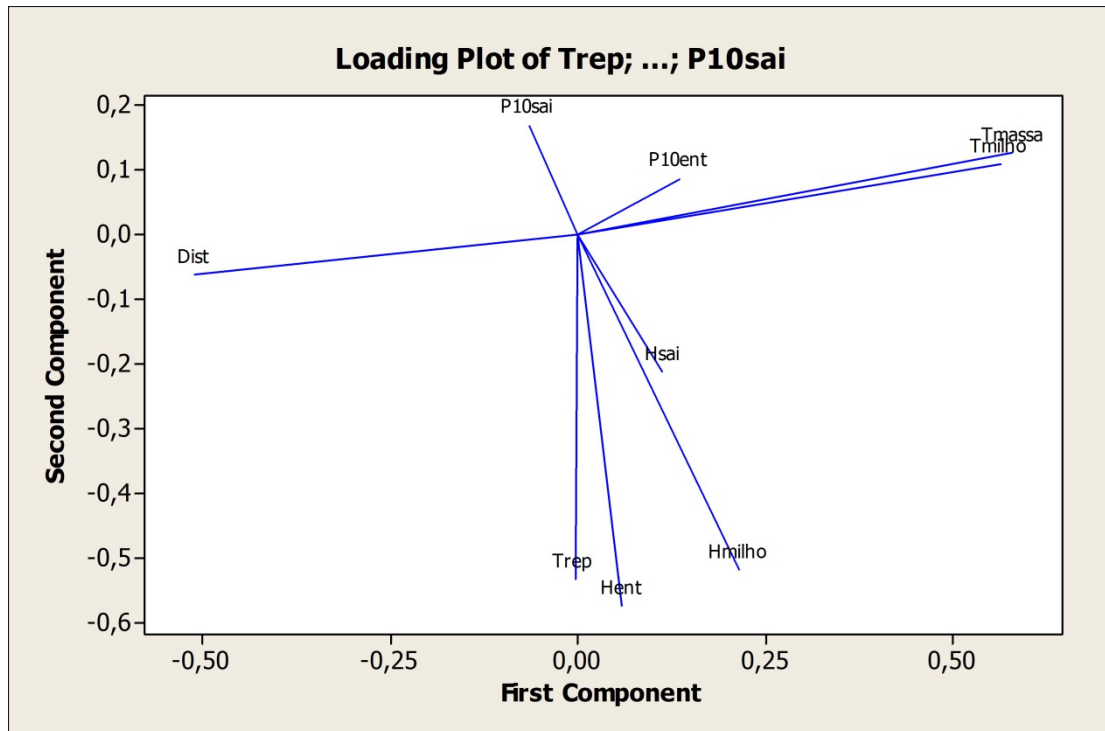


Figura 6.3. *Loading Plot* das variáveis em estudo.

Na figura anterior, pela comparação das linhas representadas conseguem obter-se as seguintes conclusões: se as linhas que têm a mesma direção e sentido transmitem a informação de que as respetivas variáveis estão correlacionadas (tanto quanto mais próximas se encontrarem); se têm a mesma direção mas sentidos opostos as respetivas variáveis estão negativamente correlacionadas, ou seja, se uma aumenta a outra diminui; se fazem um ângulo de 90° não existe correlação entre as variáveis.

O primeiro componente (*first component*), na direção horizontal, é o mais importante. Portanto, as variáveis que mais se prolongam nesse eixo são as mais relevantes na base de dados.

Os resultados da Figura 6.3 permitem concluir que as variáveis *Tmassa* e *Tmilho* são as mais importantes da base de dados e que estão muito correlacionadas. A sua variação é inversamente proporcional à distância das pedras do moinho. Também se conclui que as variáveis *Trep*, *Hent* e *Hmilho* estão algo correlacionadas mas não têm relação com *Tmassa*, *Tmilho* e *Dist*. Das variáveis com menos relevância sobressaem a humidade e o “peso 10” de saída do forno (*Hsai* e *P10sai*) que, apesar de na realidade estarem diretamente correlacionadas, na Figura 6.3 o resultado é contrário. Esta situação pode explicar-se com a qualidade da base de dados utilizada e também com a baixa frequência com que são recolhidas as observações dessas variáveis no processo.

Na Figura 6.3 também se pode verificar que as variáveis associadas ao primeiro componente estão relacionadas com a temperatura e que o segundo componente (*second component*) sumariza as que estão relacionadas com a humidade dos *chips*. Quanto maior é o comprimento da linha em cada eixo, maior é a importância da variável nesse componente.

6.3. MODELAÇÃO

6.3.1. Redes neuronais artificiais

As redes neuronais artificiais (*ANN*) são utilizadas como técnica de modelação não linear, baseada no reconhecimento de padrões e na aprendizagem associativa a partir de múltiplos dados complexos. O seu nome tem inspiração na biologia e mais concretamente no funcionamento do sistema nervoso central e do cérebro, em que a informação é introduzida (*input*) nos neurónios interconectados (nodos), processada e transmitida para os recetores (*output*), conduzindo a um fortalecimento de algumas ligações se certo estímulo se mantiver. É exemplo disso o reflexo condicionado de Pavlov em que, com o tempo, o animal associa o som da campainha à hora da refeição.

As *ANN* mais utilizadas hoje em dia são denominadas *Multilayer Perceptron (MLP)* e são constituídas por três camadas, cada uma com um número próprio de nodos:

- Camada de entrada: onde os *inputs* são rececionados; o número de nodos corresponde ao número de variáveis;
- Camada intermédia (escondida): onde se processa a informação; o número de nodos é dependente da complexidade do problema e otimizado por métodos de tentativa e erro;
- Camada de saída: onde o processamento é enviado para o exterior da rede; o número de nodos depende do número de *outputs* do sistema.

O processamento de dados em cada nodo é realizado por funções de transferência como a sigmoide, tangente hiperbólica, exponencial, radial, etc.

A otimização dos parâmetros da *ANN (MLP)* é realizada nas seguintes fases:

- Treino: onde os parâmetros são otimizados;
- Teste: onde se testa o sucesso do treino a partir de exemplos utilizados neste;
- Validação: onde se valida a rede neuronal com um conjunto de dados não utilizados no treino.

Para a criação e estudo das redes neuronais artificiais utilizou-se o *software* Statistica®. Devido às baixas correlações entre as variáveis, optou-se por realizar uma rede neuronal simples, apenas com dois *inputs*. Pretendeu-se, então, prever os valores de humidade dos *chips* à entrada do forno (*Hent*) a partir do tempo de repouso (*Trep*) e da humidade do milho (*Hmilho*). Para isso considerou-se

que 70% das 2944 observações eram destinadas para treino, 15% para teste e 15% para validação. Para uma rede neuronal com duas variáveis na entrada seguiu-se a recomendação da utilização da função tangente hiperbólica nos nodos escondidos e da função identidade (linear) nos da camada de saída⁵¹.

Das variadas redes neuronais determinadas selecionou-se a que obteve melhores resultados nas fases de treino, de teste e de validação. A rede neuronal final é constituída por dois nodos de entrada (*Trep* e *Hmilho*), nove escondidos e um de saída (*Hent*). O ajuste aos pontos previstos (*output*) foi realizado pelo Método de Mínimos Quadrados Ponderados pela Distância (Figura 6.4).

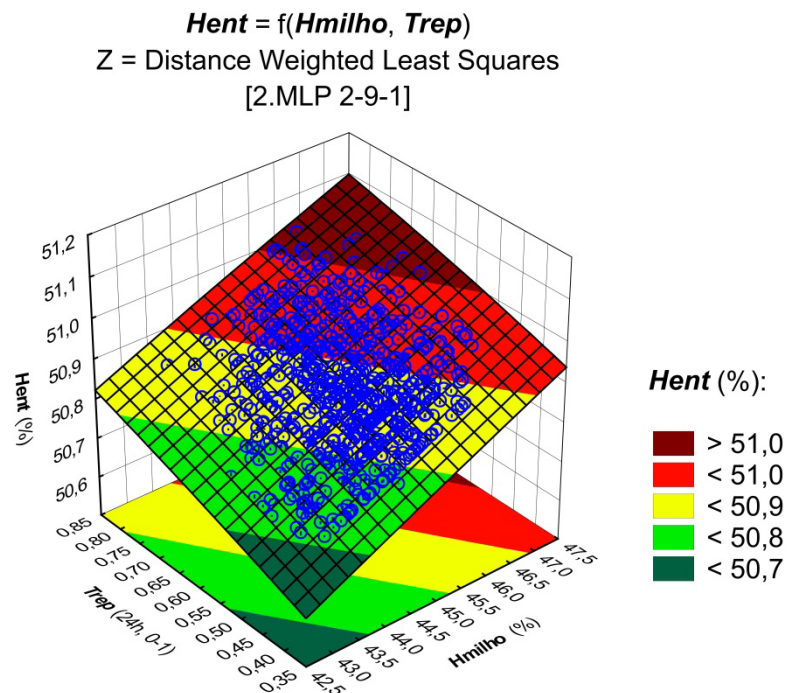


Figura 6.4. Representação da previsão da humidade dos *chips* à entrada do forno, em função da humidade do milho e do tempo de repouso.

É possível realizar outros ajustes, como o linear ou o quadrático, aos pontos previstos. Num ajuste linear a previsão da humidade dos *chips* à entrada do forno exprime-se pela seguinte equação:

$$Hent(\%, \text{b.h.}) = 47,960 + 0,060 \times Hmilho(\%, \text{b.h.}) + 0,366 \times Trep(0-1) \quad (6.1)$$

com *Trep* dado no intervalo 0-1, correspondente a 0-24 horas. A utilização da equação anterior permite prever as consequências nos *chips* de possíveis perturbações no processo que alterem o tempo de repouso especificado.

Com o registo adequado das observações numa base de dados dedicada ao estudo estatístico do processo é possível tornar a rede neuronal complexa, melhorar bastante a qualidade dos resultados obtidos, efetuar previsões seguras das variáveis de qualidade e até desenvolver uma monitorização multivariada em linha. As redes neuronais artificiais são, por isso, ferramentas poderosas que podem e devem ser implementadas na melhoria contínua de qualquer processo industrial.

CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

*E nos adornos essenciais da criação
Se excede o engenheiro.*⁵²

William Shakespeare em *A Tragédia de Otelo, o Mouro de Veneza*

7.1. CONCLUSÕES FINAIS

Ao longo dos séculos, a utilização que a mão oportuna do homem pré-colombiano fez do milho foi tão intensa e marcante que a codependência se tornou inevitável: este passou a servir-se dos grãos dourados como base da sua alimentação, atribuindo-lhe até origem e estatuto sagrados^{3-4,53-54}, e o milho transformou-se numa planta humana, que deixou de sobreviver sem a intervenção inteligente do homem, sem o seu trabalho, conhecimento e imaginação.⁴ Foi esta codependência que motivou sempre a humanidade a procurar e a desenvolver os melhores métodos para tratar de tão nobre cereal, desde a descoberta do processo de nixtamalização, que esteve umbilicalmente associado ao progresso das civilizações pré-colombianas e à introdução da cerâmica na culinária⁵, passando pela “revolução industrial das *tortillas*” com a invenção da primeira máquina automática para a sua produção, até à primeira *tortilla chip* obtida num moderno processo industrial. É neste contexto que surge o Engenheiro Químico, enquanto responsável por manter o processo constantemente atualizado e competitivo através do engenho e da arte.

Neste trabalho foi estudada a operação unitária de crostagem no processo de fabrico de *tortilla chips*, que envolveu a caracterização aprofundada do equipamento com o objetivo de expor as suas potencialidades.

Foi realizado o acerto das temperaturas dos três tapetes do forno através de intervenções de carácter prático, como a substituição dos queimadores infravermelhos ou melhorias na limpeza do equipamento, e de alterações estruturais nos queimadores tubulares. Para atingir esse objetivo desenvolveram-se metodologias simples que permitiram mapear as temperaturas de cada tapete do forno e melhor definir o tipo, a quantidade e o local adequado para a aplicação dos materiais de controlo da chama (guias e limitadores). A análise da evolução dos perfis de temperatura permitiu concluir que os dois fatores que mais influenciam as variações térmicas dos tapetes são a existência de queimadores infravermelhos danificados e a limpeza exterior dos queimadores tubulares, devendo por isso ser verificados com intensa regularidade. É também importante garantir que as frequências dos ventiladores de exaustão respeitam os valores especificados e que a orientação dos queimadores tubulares não sofreu alteração significativa.

As melhorias obtidas com o acerto das temperaturas possibilitaram a uniformização da distribuição do calor pelos tapetes do forno, beneficiando a qualidade da crostagem e o aspeto final das *tortilla chips* com a redução de pontos tostados.

A construção de tabelas de variação de “peso 10” e de humidade (b.h.) entre a entrada e a saída do forno, na zona esquerda, central e direita, revelou-se um método mais rápido, mas menos detalhado, para a obtenção de resultados gerais semelhantes aos dos perfis de temperaturas.

Efetuar-se correções no medidor principal de caudal de gás natural do forno, de forma a obter-se um registo fiável dos consumos da utilidade no equipamento, indispensável a todas as otimizações energéticas propostas neste trabalho. A utilização dos quatro medidores de caudal de orifício revelou-se um método prático para determinar a distribuição do consumo de gás natural no forno e para detetar irregularidades nos sistemas de queimadores.

Desenvolveram-se novas ferramentas de operação do forno, como o ajuste das válvulas de borboleta nas chamas mínima e máxima dos queimadores tubulares, a reorientação do primeiro volteador para um ângulo de 83° em relação à vertical, o ajuste da frequência dos ventiladores de exaustão para uma relação linear com o caudal de entrada de gás natural e a reorientação dos queimadores tubulares para um ângulo de cerca de 80° com a horizontal. Estas ferramentas permitiram melhorias significativas no arranque do forno e maior objetividade no seu controlo e operação, a minimização do desperdício de *chips* e a preservação do estado dos ventiladores de exaustão.

No âmbito da manutenção do equipamento, a frequência recomendada de substituição do tapete superior do forno foi complementada com um método de quantificação da forma dos pontos tostados dos *chips*. Criaram-se também procedimentos para a limpeza correta e regular do forno (semanal, bimensal e semestral) e reviram-se as intervenções gerais de manutenção com base nos resultados do acerto de temperaturas.

Realizaram-se os balanços mássico e entálpico ao forno e, com base nos seus resultados, foram sugeridas medidas para a poupança energética, como a remoção dos pilotos desnecessários, a recuperação de calor dos gases de exaustão para pré-aquecimento do ar primário e a otimização energética nos períodos de chama baixa. Estas sugestões compreendem uma poupança mínima de 4500 euros por ano, com o custo de gás natural referente a 2013.

A utilização da análise multivariada permitiu avaliar a relação entre as variáveis de parte do processo, através da sua classificação hierárquica e do estudo dos componentes principais. A criação de redes neuronais artificiais resultou na previsão dos valores da humidade dos *chips* à entrada do forno a partir da humidade do milho e do tempo de repouso, alicerçada na aprendizagem associativa e no reconhecimento de padrões existentes na base de dados original.

As melhorias conseguidas no forno e as sugestões propostas tiveram consequências a nível técnico, económico e ambiental, permitindo, no fundo, que se produza melhor ao menor custo, aumentando o rendimento final. Ou, parafraseando o Eng.º Luís Alves⁵⁵, rentabilizou-se criteriosamente a “matéria-prima” chamada dinheiro manuseada na “reação” de crostagem.

7.2. TRABALHO FUTURO

Por imposição temporal, não foi possível desenvolver tanto quanto se queria algumas das sugestões e ideias de melhoria apresentadas neste trabalho. Referem-se por isso algumas questões merecedoras de estudo e desenvolvimento futuros:

- Estudar a alteração do ângulo de 45° especificado para a orientação dos queimadores tubulares;
- Repensar a localização dos pilotos em relação aos queimadores tubulares;
- Dimensionar a tubagem e o equipamento necessários para pré-aquecer o ar primário até 300-350 °C a partir do calor dos gases de combustão;
- Criar uma base de dados dedicada ao estudo estatístico do processo, com o registo adequado das observações;
- Utilizar a análise multivariada e as redes neuronais como ferramentas para a melhoria contínua do processo de fabrico de *tortilla chips*.

BIBLIOGRAFIA

1. Miller, H. *Trópico de Capricórnio*, 1.^a ed.; Abril/Controljornal: Linda-a-Velha, 2000; p 113.
2. Pilcher, J. M. *¡Qué Vivan los Tamales!: Food and the Making of Mexican Identity*, 1.^a ed.; University of New Mexico Press: Albuquerque, E.U.A., 1998; p 17.
3. Kato, T. Á.; Mapes, C.; Mera, L. M.; Serratos, J. A.; Bye, R. A. *Origen y Diversificación del Maíz: Una Revisión Analítica*, 1.^a ed.; Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad: México, D.F., México, 2009; pp 14, 17, 33-41, 97.
4. Zorrilla, L.; Bueno, C. S.; Quan, S.; Zaldívar, L.; Torres, B.; Jiménez, M.; Benítez, R. *El Maíz, Fundamento de la Cultura Popular Mexicana*, 3.^a ed.; Museo Nacional de Culturas Populares, Dirección General de Culturas Populares: México, D.F., México, 1987; pp 5, 13, 24, 39-48, 81.
5. Long, J. Tecnología alimentaria prehispánica. *Estudios de Cultura Náhuatl* **2009**, 39, 127-136.
6. Bonavia, D. *Maize: Origin, Domestication, and its Role in the Development of Culture*, 1.^a ed.; Cambridge University Press: Nova Iorque, E.U.A., 2013; pp 24-32.
7. Jacob, H. E. *Seis Mil Anos de Pão*, 1.^a ed.; Antígona: Lisboa, 2003; pp 307-324.
8. Katz, S. H.; Hediger, M. L.; Valleroy, L. A. Traditional maize processing techniques in the new world. *Science* **1974**, 184 (4138), 765-773.
9. Tapia, Á. S. A América pré-hispânica. Em *Grande História Universal*; 2.^a ed.; Ediclube: Alfragide, 2003; Vol. 7, pp 2817-2934.
10. Serna-Saldívar, S. O.; Gutiérrez-Urbe, J. A.; Mora-Rochin, S.; García-Lara, S. Potencial nutracéutico de los maíces criollos y cambio durante el procesamiento tradicional y con extrusión. *Rev. Fitotec. Mex.* **2013**, 36 (3-A), 295-304.
11. McDonough, C. M.; Gomez, M. H.; Rooney, L. W.; Serna-Saldívar, S. O. Alkaline-cooked corn products. Em *Snack Foods Processing*; 1.^a ed.; Lucas, E. W., Rooney, L. W., Eds.; CRC Press: Boca Raton, E.U.A., 2001; pp 72-113.
12. Bressani, R.; Paz y Paz, R.; Scrimshaw, N. S. Chemical changes in corn during preparation of tortillas. *J. Agric. Food Chem.* **1958**, 6 (10), 770-774.
13. Martín-Martínez, E. S.; Pedroza-Islas, R.; Villagómez-Zavala, D. L.; Martínez-Bustos, F. Procesos alternativos de nixtamalización del maíz y productos derivados. Em *Alternativas Tecnológicas para la Elaboración y la Conservación de Productos Panificados*; 1.^a ed.; Ribotta, P. D., Tadini, C. C., Eds.; Universidad Nacional de Córdoba: Córdoba, Argentina, 2009; pp 165-206.
14. *Maize in human nutrition*, 1.^a ed.; FAO: Roma, Itália, 1992; pp 39-53.
15. Cravioto, R. O.; Anderson, R. K.; Lockhart, E. E.; Miranda, F. P.; Harris, R. S. Nutritive value of the mexican tortilla. *Science* **1945**, 102 (2639), 91-93.
16. López, O. P.; Lara, F. G.; Pérez, L. A. B. La nixtamalización y el valor nutritivo del maíz. *Ciencias* **2009**, 92, 60-70.
17. Serna-Saldívar, S. O.; Gómez, M. H.; Rooney, L. W. Technology, chemistry and nutritive value of alkaline-cooked corn products. Em *Advances in Cereal Science and Technology*; 1.^a ed.; Pomeranz, Y., Ed.; American Association of Cereal Chemists: St. Paul, E.U.A., 1990; Vol. 10, pp 243-

18. Bressani, R. Chemistry, technology and nutritive value of maize tortillas. *Food Rev. Int.* **1990**, *6* (2), 225-264.
19. Bressani, R. La nixtamalización del maíz. Em *Agroindustria Rural: Recursos Técnicos y Alimentación*; 1.^a ed.; Boucher, F., Muchnik, J., Eds.; Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo, Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agronomica para el Desarrollo: San José, Costa Rica, 1995; pp 63-82.
20. Gómez, G. L. *Istmo: Historia, Tradiciones, Mitos y Leyendas*, 1.^a ed.; Palibrio: E.U.A., 2013; p 114.
21. Vilá, M. B. *Cambio Alimentario e Identidad de los Indígenas Mexicanos*, 1.^a ed.; Universidad Nacional Autónoma de México: México, D.F., México, 2005; Vol. 8, pp 43-44.
22. Arellano, G. *Taco USA: How Mexican Food Conquered America*, 1.^a ed.; Scribner: Nova lorque, E.U.A., 2012; pp 203, 208.
23. Wolf, E. R. *Pueblos y Culturas de Mesoamérica*, 15.^a ed.; Editorial Era: México, D.F., México, 2004; p 60.
24. Groopman, J. D.; Cain, L. G.; Kensler, T. W. Aflatoxin exposure in human populations: measurements and relationship to cancer. *CRC Crit. Rev. Toxicol.* **1988**, *19* (2), 113-145.
25. Moreira, R. G. The engineering aspects of deep-fat frying. Em *Handbook of Food Science, Technology, and Engineering*; 1.^a ed.; Hui, Y. H., Ed.; CRC Press: Boca Raton, E.U.A., 2006; Vol. 3, pp 111.1-111.5.
26. Huang, D. P.; Rooney, L. W. Starches for snack foods. Em *Snack Foods Processing*; 1.^a ed.; Lucas, E. W., Rooney, L. W., Eds.; CRC Press: Boca Raton, E.U.A., 2001; pp 115-136.
27. Paliwal, R. L. Usos del maíz. Em *El Maíz en los Trópicos: Mejoramiento y Producción*; 1.^a ed.; Marathée, J. P., Ed.; FAO: Roma, Itália, 2001; pp 45-56.
28. Moreira, R. G.; Sun, X.; Chen, Y. Factors affecting oil uptake in tortilla chips in deep-fat frying. *J. Food Eng.* **1997**, *31* (4), 485-498.
29. Chen, Y.; Moreira, R. G. Modelling of a batch deep-fat frying process for tortilla chips. *Food Bioprod. Process.* **1997**, *75*, 181-190.
30. Lee, J. K. The effects of processing conditions and maize varieties on physicochemical characteristics of tortilla chips. Dissertação de Doutorado, Texas A&M University, College Station, Texas, E.U.A., 1991.
31. Gomez, M. H.; Lee, J. K.; McDonough, C. M.; Waniska, R. D.; Rooney, L. W. Corn starch changes during tortilla and tortilla chip processing. *Cereal Chem.* **1992**, *69* (3), 275-279.
32. Mehta, S. P. Tortilla chip processing. Em *Snack Foods Processing*; 1.^a ed.; Lucas, E. W., Rooney, L. W., Eds.; CRC Press: Boca Raton, E.U.A., 2001; pp 261-280.
33. Helder, H. *Ofício Cantante*, 1.^a ed.; Assírio & Alvim: Odivelas, 2009; p 537.
34. REN. Monitorização da Qualidade do Gás Natural. <https://www.ign.ren.pt/monitorizacao-da-qualidade-do-gn> (consult. 12 jul. 2014).
35. Calvert, J. G. Glossary of atmospheric chemistry terms (Recommendations 1990). *Pure Appl. Chem.* **1990**, *62* (11), 2167-2219.

36. *Combustion Seminar* [Em linha] Flynn Burner: Nova Iorque, E.U.A., 2006; p. 24. www.flynnburner.com/sites/default/files/media/docfiles/2014/flamesem.pdf (consult. 25 mar. 2014).
37. *General Specifications: Model DY Vortex Flowmeter* [Em linha] 20.^a ed.; Yokogawa: Tóquio, Japão, 2014. <http://www.yokogawa.com/fld/pdf/DYF/GS01F06A00-01EN.pdf> (consult. 6 fev. 2014).
38. Espanca, F. *Contos e Diário*, 1.^a ed.; Leya: Alfragide, 2009; p 65.
39. *Table of Total Emissivity* [Em linha] Omega: Connecticut, E.U.A., 2005. <http://www.omega.com/temperature/Z/pdf/z088-089.pdf> (consult. 31 mai. 2014).
40. *Manual for Infrared Measuring Technology* [Em linha] 1.^a ed.; Testo: Nova Jérсия, E.U.A., 2004; pp. 25-26. http://www.testousa.com/thermal/images/AppBrochure/measure_infrared.pdf (consult. 31 mai. 2014).
41. Tavares, G. M. *Aprender a rezar na Era da Técnica*, 1.^a ed.; Editorial Caminho: Alfragide, 2007; p 255.
42. Liley, P. E.; Thomson, G. H.; Friend, D. G.; Daubert, T. E.; Buck, E. Physical and chemical data. Em *Perry's Chemical Engineers' Handbook*; 7.^a ed.; Perry, R. H., Green, D. W., Eds.; McGraw-Hill: Nova Iorque, E.U.A., 1997; pp 2.160, 2.170-2.182, 2.319.
43. Coulson, J. M.; Richardson, J. F.; Backhurst, J. R.; Harker, J. H. *Tecnologia Química: Fluxo de Fluidos, Transferência de Calor e Transferência de Massa*, 4.^a ed.; Fundação Calouste Gulbenkian: Lisboa, 2004; Vol. 1, p 257.
44. Boyce, M. P. Transport and storage of fluids. Em *Perry's Chemical Engineers' Handbook*; 7.^a ed.; Perry, R. H., Green, D. W., Eds.; McGraw-Hill: Nova Iorque, E.U.A., 1997; pp 10.70, 10.72.
45. *Orifice Metering System: Bulletin 8697* [Em linha] 1.^a ed.; North American Manufacturing: Cleveland, E.U.A., 1999; p. 2. http://66.18.210.80/manuals/North American/8697_metering_valve-.pdf (consult. 30 jan. 2014).
46. Torga, M. *Contos*, 5.^a ed.; Publicações Dom Quixote: Alfragide, 2009; p 30.
47. Cohen, E. R.; Cvitaš, T.; Frey, J. G.; Holmström, B.; Kuchitsu, K.; Marquardt, R.; Mills, I.; Pavese, F.; Quack, M.; Stohner, J.; Strauss, H. L.; Takami, M.; Thor, A. J., *Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry* [Em linha] 3.^a ed.; IUPAC & RSC Publishing: Cambridge, R.U., 2008; pp. 117-120. http://www.iupac.org/fileadmin/user_upload/publications/e-resources/ONLINE-IUPAC-GB3-2ndPrinting-Online-Sep2012.pdf.
48. Welty, J. R.; Wicks, C. E.; Wilson, R. E. *Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer*, 3.^a ed.; John Wiley & Sons: Nova Jérсия, E.U.A., 1984; pp 353-383, 756.
49. Rebello, W. J.; Kohnken, K. H.; Phipps Jr., H. R. Estimation of Fuel Savings by Recuperation of Furnace Exhausts to Preheat Combustion Air. Apresentado em Second Industrial Energy Technology Conference, Houston, E.U.A., 13-16 abr. 1980.
50. Sá-Carneiro, M. *Poemas Completos*, 3.^a ed.; Assírio & Alvim: Lisboa, 2005; p 55.
51. Statistica Automated Neural Networks: Custom Neural Network - Quick Tab. <http://documentation.statsoft.com/STATISTICAHelp.aspx?path=SANN> (consult. 19 jun. 2014).
52. Calado, J. *INGenuidades*, 1.^a ed.; Fundação Calouste Gulbenkian: Lisboa, 2007; p 39.
53. Bassie-Sweet, K. Corn Deities and the Complementary Male/Female Principle. Apresentado em La Tercera Mesa Redonda de Palenque, Palenque, México, 27 jun.-1 jul. 1999.

54. Florescano, E. Imágenes y significados del dios del maíz. Em *Sin Maíz No Hay País*; 1.^a ed.; Consejo Nacional para la Cultura y las Artes, Dirección General de Culturas Populares e Indígenas: México, D.F., México, 2003; pp 36-55.

55. Alves, L. A. *Tecnologia Química: Numa Perspectiva Industrial de Gastar Dinheiro Sem Perder Dinheiro*, 1.^a ed.; Fundação Calouste Gulbenkian: Lisboa, 1991; p 9.

ANEXO A. DADOS DE PERFIS DE TEMPERATURAS

1.º PERFIL DE TEMPERATURAS

Tabela A.1. Temperaturas registadas no 1.º perfil de cada tapete do forno.

Tapete	Temperatura (°C)									t _{máx} (°C)	t _{mín} (°C)	Δt (°C)
	Esquerda			Centro			Direita					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
Superior	423,0	429,6	410,2	413,0	449,6	428,4	424,2	430,5	434,5	434,5	410,2	24,3
	422,5	430,0	409,8	414,0	449,4	428,5	422,8	429,6	434,6	434,6	409,8	24,8
	421,1	428,9	408,0	417,4	449,5	431,8	423,7	430,6	435,6	435,6	408,0	27,6
	421,0	425,3	420,1	410,3	450,7	435,3	424,2	430,5	439,4	439,4	410,3	29,1
	416,8	426,8	417,6	417,8	451,0	431,4	421,5	428,2	436,8	436,8	416,8	20,0
	419,2	425,3	418,4	415,9	450,2	428,6	422,2	431,8	436,9	436,9	415,9	21,0
	411,6	419,0	412,4	420,7	450,3	433,6	425,6	432,3	435,8	435,8	411,6	24,2
	407,6	421,3	416,8	418,8	451,1	433,7	423,5	433,2	437,9	437,9	407,6	30,3
	413,8	419,8	421,9	419,0	450,3	433,6	421,7	426,9	439,0	439,0	413,8	25,2
	426,7	430,0	420,5	412,2	450,7	432,8	424,9	432,8	436,1	436,1	412,2	23,9
	424,3	428,5	413,4	416,2	450,8	435,3	421,6	429,2	438,0	438,0	413,4	24,6
	426,6	430,7	411,9	416,8	450,6	433,1	425,3	426,9	438,4	438,4	411,9	26,5
	433,0	429,1	424,5	419,2	450,2	434,1	426,8	432,6	434,6	434,6	419,2	15,4
	428,3	430,0	416,7	424,9	450,4	435,5	423,0	431,9	439,4	439,4	416,7	22,7
428,2	428,0	418,8	424,5	450,8	432,3	424,2	431,9	436,7	436,7	418,8	17,9	
Médio	390,2	381,7	374,5	382,7	400,6	390,3	377,6	376,7	362,6	390,3	362,6	27,7
	389,4	381,3	375,1	384,4	400,7	389,1	378,3	376,3	363,3	389,4	363,3	26,1
	389,4	380,1	375,3	383,1	401,2	389,8	377,9	376,7	363,8	389,8	363,8	26,0
	388,3	382,2	373,1	385,4	396,7	386,8	378,0	376,7	364,8	388,3	364,8	23,5
	387,7	381,5	376,9	384,4	397,4	387,2	376,9	373,4	363,9	387,7	363,9	23,8
	389,4	381,6	378,5	384,4	395,6	388,8	375,9	377,1	365,2	389,4	365,2	24,2
	391,9	380,4	373,7	385,9	399,1	387,3	374,5	375,9	364,3	391,9	364,3	27,6
	390,9	381,6	377,9	384,9	399,1	389,2	376,3	375,6	364,6	390,9	364,6	26,3
	391,4	383,0	375,9	382,9	400,0	389,1	373,5	376,9	363,1	391,4	363,1	28,3
	392,1	382,5	373,7	384,4	398,3	390,2	376,9	375,5	364,3	392,1	364,3	27,8
	392,5	379,1	377,9	384,8	396,7	389,9	374,4	376,9	365,3	392,5	365,3	27,2
	393,2	381,3	375,9	384,4	396,0	389,2	375,4	377,4	364,4	393,2	364,4	28,8
	392,5	380,5	373,4	384,3	396,7	388,5	374,8	377,3	363,0	392,5	363,0	29,5
	391,5	380,6	373,7	384,6	396,6	384,4	375,9	375,7	363,2	391,5	363,2	28,3
391,5	380,5	375,1	383,1	397,1	387,2	377,6	376,3	363,0	391,5	363,0	28,5	
Inferior	339,3	352,9	361,3	373,5	386,6	373,8	367,8	362,1	353,4	373,8	339,3	34,5
	344,2	356,9	364,9	376,1	385,2	374,9	366,4	359,6	348,0	376,1	344,2	31,9
	340,8	352,6	366,1	375,9	387,9	377,7	365,5	360,8	342,5	377,7	340,8	36,9
	345,7	354,5	359,9	372,7	380,4	379,4	368,1	361,0	346,7	379,4	345,7	33,7
	334,1	351,7	362,6	376,1	382,9	377,0	367,7	361,3	346,1	377,0	334,1	42,9

Tapete	Temperatura (°C)									$t_{\text{máx}}$ (°C)	$t_{\text{mín}}$ (°C)	Δt (°C)	
	Esquerda			Centro			Direita						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
\bar{t} (°C)	TS	421,6	426,8	416,1	417,4	450,4	432,5	423,7	430,6	436,9	436,9	416,1	20,8
	TM	390,8	381,2	375,4	384,2	398,1	388,5	376,3	376,3	363,9	390,8	363,9	26,9
	TI	340,8	353,7	363,0	374,9	384,6	376,6	367,1	361,0	347,3	376,6	340,8	35,7
\bar{t}_{tap} (°C)	TS	425,7											
	TM	379,6											
	TI	360,5											
Δ médias (°C)	TS	-4,1	1,1	-9,6	-8,3	24,7	6,8	-2,0	4,9	11,2			
	TM	11,2	1,6	-4,2	4,7	18,6	8,9	-3,3	-3,3	-15,6			
	TI	-19,7	-6,8	2,4	14,3	24,1	16,0	6,6	0,4	-13,2			

1.º perfil de temperaturas

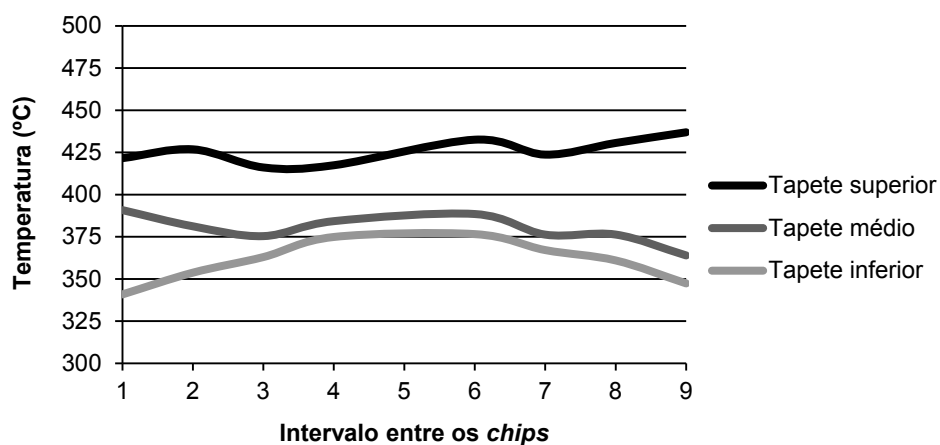


Figura A.1. Representação das médias das temperaturas observadas no 1.º perfil de cada tapete, em função do intervalo entre os chips.

2.º PERFIL DE TEMPERATURAS

Tabela A.2. Temperaturas registadas no 2.º perfil de cada tapete do forno.

Tapete	Temperatura (°C)									$t_{\text{máx}}$ (°C)	$t_{\text{mín}}$ (°C)	Δt (°C)	
	Esquerda			Centro			Direita						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Superior	424,8	432,8	410,3	413,9	456,0	434,6	422,9	428,4	438,8	438,8	410,3	28,5	
	426,5	430,4	412,4	416,5	458,5	431,9	424,1	429,6	438,3	438,3	412,4	25,9	
	426,6	429,9	412,2	416,2	456,7	430,9	422,5	435,5	437,7	437,7	412,2	25,5	
	427,7	429,3	415,7	413,5	457,5	434,0	423,0	432,6	439,1	439,1	413,5	25,6	
	426,3	428,7	414,1	413,3	456,1	433,9	422,9	432,7	438,8	438,8	413,3	25,5	
Médio	389,0	377,6	371,0	386,1	399,2	392,0	375,1	374,2	364,3	392,0	364,3	27,7	
	389,8	377,4	371,9	384,4	398,5	392,9	373,2	377,0	366,9	392,9	366,9	26,0	
	387,6	376,6	371,6	383,5	398,3	389,4	374,2	375,7	363,5	389,4	363,5	25,9	
	390,4	380,0	370,0	385,7	397,4	391,3	376,1	374,8	364,6	391,3	364,6	26,7	
	390,0	379,7	371,9	386,1	397,2	391,9	373,3	374,2	365,4	391,9	365,4	26,5	
Inferior	353,2	357,3	361,4	381,1	393,1	378,6	372,7	370,3	353,3	381,1	353,2	27,9	
	352,7	359,4	364,4	380,6	394,6	378,2	373,0	368,4	350,9	380,6	350,9	29,7	
	351,3	359,5	362,2	380,1	393,7	382,0	369,9	368,4	352,6	382,0	351,3	30,7	
	352,8	357,9	364,1	380,6	393,9	384,1	369,9	367,1	355,6	384,1	352,8	31,3	
	352,9	359,0	362,3	380,4	394,8	382,3	369,5	371,2	354,5	382,3	352,9	29,4	
\bar{t} (°C)	TS	426,4	430,2	412,9	414,7	457,0	433,1	423,1	431,8	438,5	438,5	412,9	25,6
	TM	389,4	378,3	371,3	385,2	398,1	391,5	374,4	375,2	364,9	391,5	364,9	26,6
	TI	352,6	358,6	362,9	380,6	394,0	381,0	371,0	369,1	353,4	381,0	352,6	28,5
\bar{t}_{tap} (°C)	TS	426,3											
	TM	378,8											
	TI	366,1											
Δ médias (°C)	TS	0,0	3,9	-13,4	-11,7	30,6	6,7	-3,3	5,4	12,2			
	TM	10,6	-0,5	-7,5	6,4	19,4	12,7	-4,4	-3,6	-13,8			
	TI	-13,6	-7,5	-3,3	14,4	27,9	14,9	4,9	2,9	-12,8			

2.ª perfil de temperaturas

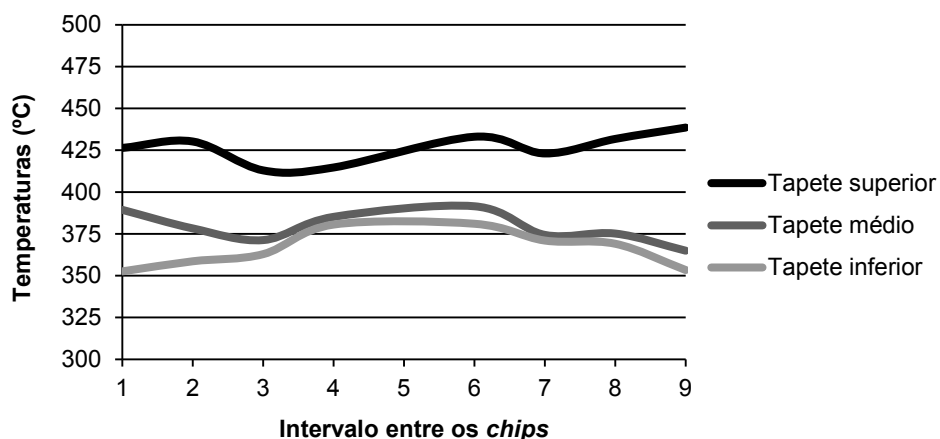


Figura A.2. Representação das médias das temperaturas observadas no 2.º perfil de cada tapete, em função do intervalo entre os chips.

3.º PERFIL DE TEMPERATURAS

Tabela A.3. Temperaturas registadas no 3.º perfil de cada tapete do forno.

Tapete	Temperatura (°C)									$t_{\text{máx}}$ (°C)	$t_{\text{mín}}$ (°C)	Δt (°C)	
	Esquerda			Centro			Direita						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Superior	435,4	438,7	438,7	441,0	469,2	448,5	433,4	448,9	452,1	452,1	433,4	18,7	
	435,3	441,3	439,6	436,1	468,4	448,0	434,3	448,7	452,8	452,8	434,3	18,5	
	435,5	438,8	438,0	439,4	468,1	448,0	436,4	447,5	453,2	453,2	435,5	17,7	
	434,6	437,0	437,1	440,0	467,3	447,8	436,9	448,1	451,5	451,5	434,6	16,9	
	433,4	439,6	438,1	440,3	467,2	447,1	435,3	448,9	452,0	452,0	433,4	18,6	
Médio	385,2	382,8	378,6	389,6	404,4	393,7	389,4	386,1	371,9	393,7	371,9	21,8	
	383,8	381,4	377,8	387,6	403,7	393,6	387,2	386,0	371,7	393,6	371,7	21,9	
	383,8	381,1	379,2	389,9	403,5	392,3	388,5	385,7	373,7	392,3	373,7	18,6	
	384,3	382,0	378,2	390,5	404,3	394,3	388,7	385,6	371,7	394,3	371,7	22,6	
	383,1	381,8	378,6	389,0	404,1	393,8	387,7	384,9	371,7	393,8	371,7	22,1	
Inferior	350,2	348,7	359,3	383,4	393,9	391,6	385,8	386,2	370,3	391,6	348,7	42,9	
	350,3	352,0	361,3	382,4	393,9	390,4	386,3	385,4	370,8	390,4	350,3	40,1	
	351,2	351,1	362,7	380,1	394,4	389,9	386,5	388,2	370,7	389,9	351,1	38,8	
	347,1	351,9	362,9	381,7	392,8	392,9	387,3	386,2	368,1	392,9	347,1	45,8	
	349,6	352,0	362,6	382,8	393,5	391,8	387,2	388,3	371,0	391,8	349,6	42,2	
\bar{t} (°C)	TS	434,8	439,1	438,3	439,4	468,0	447,9	435,3	448,4	452,3	434,8	17,5	25,6
	TM	384,0	381,8	378,5	389,3	404,0	393,5	388,3	385,7	372,1	372,1	21,4	26,6
	TI	349,7	351,1	361,8	382,1	393,7	391,3	386,6	386,9	370,2	349,7	41,6	28,5
\bar{t}_{tap} (°C)	TS	441,9											
	TM	384,2											
	TI	372,5											
Δ médias (°C)	TS	-7,1	-2,9	-3,6	-2,6	26,1	5,9	-6,7	6,5	10,4			
	TM	-0,1	-2,3	-5,7	5,2	19,8	9,4	4,1	1,5	-12,0			
	TI	-22,8	-21,3	-10,7	9,6	21,2	18,9	14,2	14,4	-2,3			

3.º perfil de temperaturas

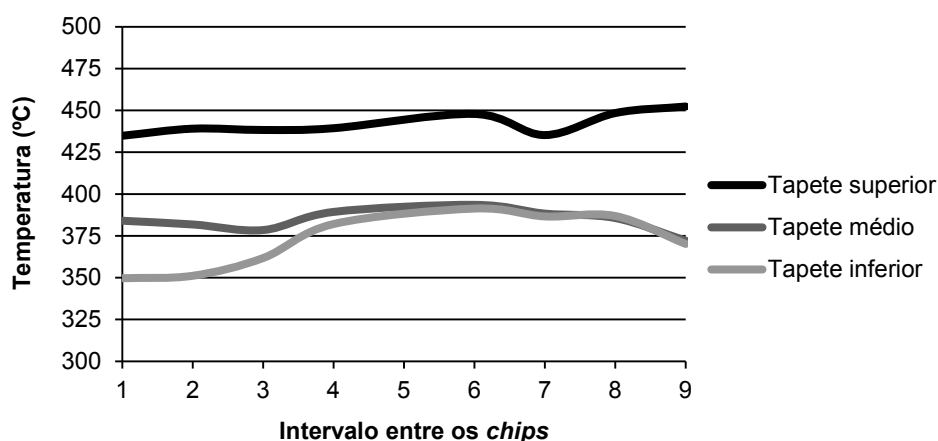


Figura A.3. Representação das médias das temperaturas observadas no 3.º perfil de cada tapete, em função do intervalo entre os chips.

4.º PERFIL DE TEMPERATURAS

Tabela A.4. Temperaturas registadas no 4.º perfil de cada tapete do forno.

Tapete	Temperatura (°C)									$t_{\text{máx}}$ (°C)	$t_{\text{mín}}$ (°C)	Δt (°C)	
	Esquerda			Centro			Direita						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Superior	431,5	433,8	434,6	433,7	465,4	442,2	432,8	438,3	438,4	442,2	431,5	10,7	
	431,7	434,3	434,4	433,9	465,7	440,8	430,4	440,1	437,9	440,8	430,4	10,4	
	433,2	434,6	434,1	433,3	466,5	442,9	431,5	438,3	440,3	442,9	431,5	11,4	
	432,7	433,8	433,1	434,0	465,7	441,5	432,5	441,0	437,0	441,5	432,5	9,0	
	431,3	433,8	434,5	433,7	466,3	442,8	430,9	440,1	440,3	442,8	430,9	11,9	
Médio	373,6	374,4	376,7	391,6	404,7	396,3	385,8	382,2	369,8	396,3	369,8	26,5	
	371,8	375,0	377,5	392,1	405,6	395,9	386,8	382,8	370,0	395,9	370,0	25,9	
	371,3	374,4	377,3	392,5	406,7	395,8	387,0	381,5	370,9	395,8	370,9	24,9	
	370,9	374,9	374,9	391,5	406,9	396,3	386,2	382,6	370,8	396,3	370,8	25,5	
	373,0	374,4	375,1	392,3	406,6	396,6	386,9	382,8	370,0	396,6	370,0	26,6	
Inferior	358,0	360,3	359,5	386,6	399,8	398,2	398,8	390,5	368,7	398,8	358,0	40,8	
	359,3	362,5	363,5	386,9	399,3	398,8	398,6	391,6	369,1	398,8	359,3	39,5	
	356,9	363,2	361,7	387,1	398,2	399,1	398,8	391,6	370,8	399,1	356,9	42,2	
	356,8	361,0	359,8	387,8	399,0	399,5	396,2	391,2	369,6	399,5	356,8	42,7	
	359,8	363,0	361,3	387,8	399,8	399,6	398,7	392,2	369,5	399,6	359,8	39,8	
\bar{t} (°C)	TS	432,1	434,1	434,1	433,7	465,9	442,0	431,6	439,6	438,8	442,0	431,6	10,4
	TM	372,1	374,6	376,3	392,0	406,1	396,2	386,5	382,4	370,3	396,2	370,3	25,9
	TI	358,2	362,0	361,2	387,2	399,2	399,0	398,2	391,4	369,5	399,0	358,2	40,9
\bar{t}_{tap} (°C)	TS	435,8											
	TM	381,3											
	TI	378,3											
Δ médias (°C)	TS	-3,7	-1,7	-1,6	-2,0	30,2	6,3	-4,1	3,8	3,0			
	TM	-9,2	-6,7	-5,0	10,7	24,8	14,9	5,2	1,1	-11,0			
	TI	-20,2	-16,3	-17,2	8,9	20,9	20,7	19,9	13,1	-8,8			

4.º perfil de temperaturas

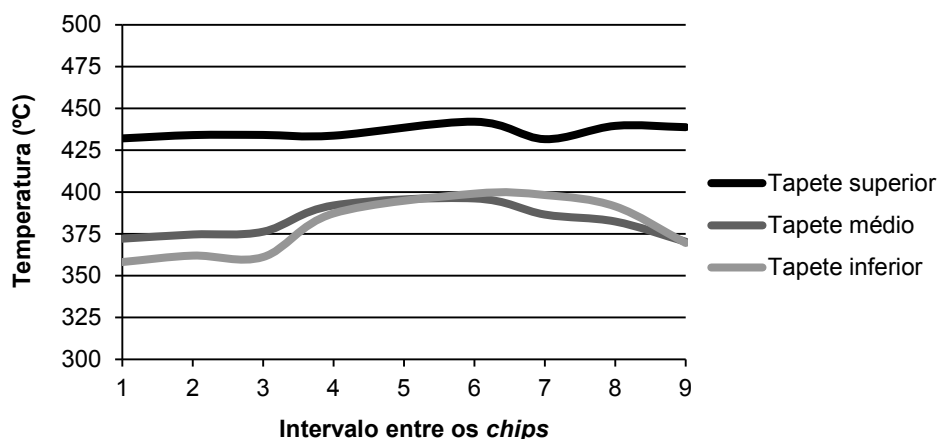


Figura A.4. Representação das médias das temperaturas observadas no 4.º perfil de cada tapete, em função do intervalo entre os chips.

5.º PERFIL DE TEMPERATURAS

Tabela A.5. Temperaturas registadas no 5.º perfil de cada tapete do forno.

Tapete	Temperatura (°C)									t_{\max} (°C)	t_{\min} (°C)	Δt (°C)	
	Esquerda			Centro			Direita						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Superior	437,5	438,4	435,1	438,6	466,5	444,0	435,0	444,0	443,0	444,0	435,0	9,0	
	437,4	439,7	434,4	437,2	468,6	442,3	435,9	443,2	444,1	444,1	434,4	9,7	
	436,3	437,8	436,1	439,9	468,6	442,8	435,5	444,6	441,9	444,6	435,5	9,1	
	436,8	438,8	434,6	439,3	468,1	443,9	437,1	445,4	442,4	445,4	434,6	10,8	
	436,8	438,6	434,6	439,4	468,3	443,2	436,4	444,8	443,2	444,8	434,6	10,2	
Médio	396,2	396,2	389,8	398,3	417,5	407,1	401,0	393,5	380,2	407,1	380,2	26,9	
	396,8	396,6	388,1	398,0	416,8	405,5	400,1	393,7	380,9	405,5	380,9	24,6	
	395,9	396,4	389,8	399,0	415,7	406,3	399,3	395,4	381,4	406,3	381,4	24,9	
	395,1	397,6	390,1	398,0	417,0	405,5	398,8	395,2	379,3	405,5	379,3	26,2	
	396,3	396,4	390,5	399,3	417,2	405,3	400,9	394,6	380,5	405,3	380,5	24,8	
Inferior	350,8	364,2	372,5	383,6	405,5	402,7	390,2	395,1	382,3	402,7	350,8	51,9	
	351,4	364,8	370,9	382,4	404,3	402,6	393,0	394,4	380,1	402,6	351,4	51,2	
	352,4	365,2	371,4	384,0	403,9	403,8	392,9	394,6	381,2	403,8	352,4	51,4	
	351,3	364,4	371,0	383,5	404,8	403,5	394,0	395,6	379,1	403,5	351,3	52,2	
	351,2	364,2	371,6	384,1	404,1	403,4	393,3	395,6	378,9	403,4	351,2	52,2	
\bar{t} (°C)	TS	437,0	438,7	435,0	438,9	468,0	443,2	436,0	444,4	442,9	444,4	435,0	9,4
	TM	396,1	396,6	389,7	398,5	416,8	405,9	400,0	394,5	380,5	405,9	380,5	25,5
	TI	351,4	364,6	371,5	383,5	404,5	403,2	392,7	395,1	380,3	403,2	351,4	51,8
\bar{t}_{tap} (°C)	TS	439,5											
	TM	395,2											
	TI	380,3											
Δ médias (°C)	TS	-2,5	-0,8	-4,5	-0,6	28,5	3,7	-3,5	4,9	3,4			
	TM	0,8	1,4	-5,6	3,3	21,6	10,7	4,8	-0,7	-14,8			
	TI	-28,9	-15,7	-8,8	3,2	24,2	22,9	12,4	14,8	0,0			

5.º perfil de temperaturas

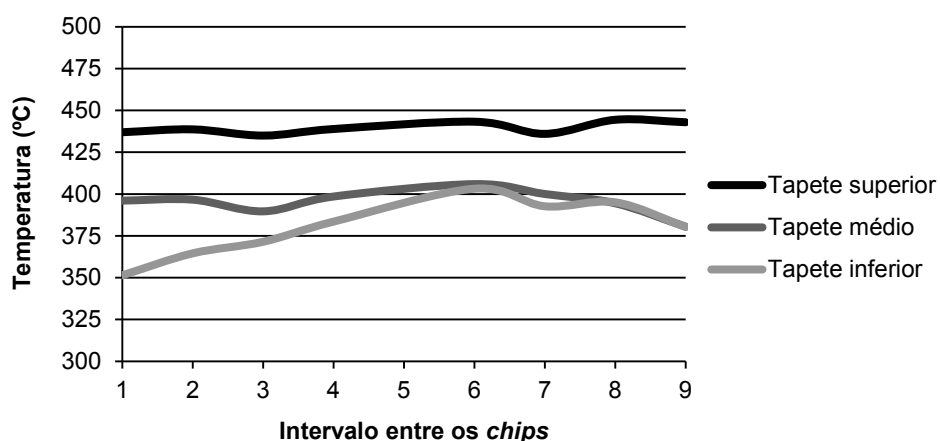


Figura A.5. Representação das médias das temperaturas observadas no 5.º perfil de cada tapete, em função do intervalo entre os chips.

6.º PERFIL DE TEMPERATURAS

Tabela A.6. Temperaturas registadas no 6.º perfil de cada tapete do forno.

Tapete	Temperatura (°C)									$t_{\text{máx}}$ (°C)	$t_{\text{mín}}$ (°C)	Δt (°C)	
	Esquerda			Centro			Direita						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Superior	429,6	433,2	427,9	436,1	462,1	439,3	428,0	434,8	437,5	439,3	427,9	11,4	
	429,1	431,4	428,3	436,6	461,3	438,1	429,9	436,2	434,9	438,1	428,3	9,8	
	431,8	435,1	428,1	436,9	462,6	440,4	426,9	436,2	436,6	440,4	426,9	13,5	
	428,7	434,7	431,1	435,4	461,0	438,5	428,5	434,8	436,0	438,5	428,5	10,0	
	431,5	435,0	431,3	435,2	460,1	438,9	430,7	435,8	438,0	438,9	430,7	8,2	
Médio	376,6	373,6	370,4	378,9	392,3	386,4	381,8	381,3	374,4	386,4	370,4	16,0	
	377,1	374,7	369,6	377,5	394,9	387,9	382,1	381,6	368,7	387,9	368,7	19,2	
	377,8	372,4	369,4	378,1	396,1	384,9	379,6	383,6	371,2	384,9	369,4	15,5	
	378,8	374,9	369,0	378,1	396,5	387,7	383,2	383,1	367,8	387,7	367,8	19,9	
	377,5	374,4	369,2	378,9	395,4	386,5	382,9	382,6	371,1	386,5	369,2	17,3	
Inferior	350,5	366,1	368,0	381,3	393,5	394,0	384,1	392,2	373,2	394,0	350,5	43,5	
	346,4	367,7	366,6	380,4	391,8	393,7	384,6	392,4	373,3	393,7	346,4	47,3	
	348,9	363,1	368,9	379,2	395,7	395,0	386,3	392,7	373,6	395,0	348,9	46,1	
	350,0	366,8	370,5	375,9	395,9	390,4	385,4	392,0	375,4	392,0	350,0	42,0	
	349,1	362,8	367,9	379,2	392,9	392,2	386,2	393,1	378,0	393,1	349,1	44,0	
\bar{t} (°C)	TS	430,1	433,9	429,3	436,0	461,4	439,0	428,8	435,6	436,6	439,0	428,8	10,2
	TM	377,6	374,0	369,5	378,3	395,0	386,7	381,9	382,4	370,6	386,7	369,5	17,2
	TI	349,0	365,3	368,4	379,2	394,0	393,1	385,3	392,5	374,7	393,1	349,0	44,1
\bar{t}_{tap} (°C)	TS	433,7											
	TM	377,6											
	TI	375,9											
Δ médias (°C)	TS	-3,5	0,2	-4,3	2,4	27,7	5,4	-4,9	1,9	2,9			
	TM	-0,1	-3,6	-8,1	0,7	17,4	9,0	4,3	4,8	-7,0			
	TI	-26,9	-10,6	-7,5	3,3	18,0	17,1	9,4	16,6	-1,2			

6.º perfil de temperaturas

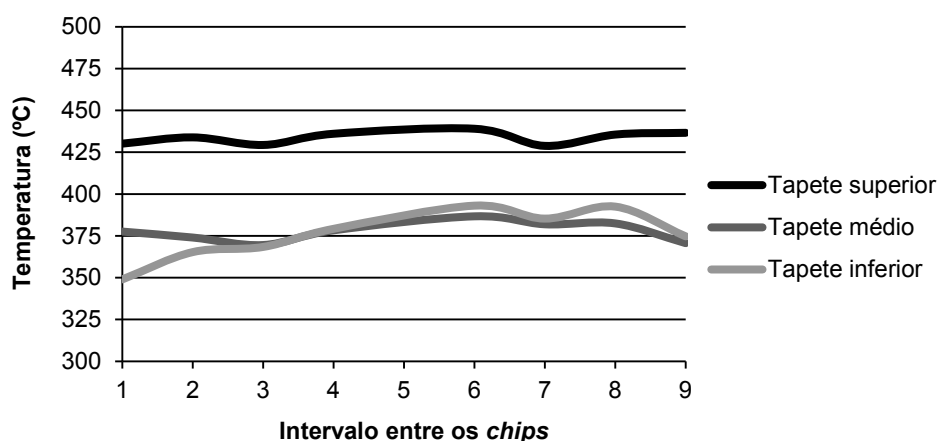


Figura A.6. Representação das médias das temperaturas observadas no 6.º perfil de cada tapete, em função do intervalo entre os chips.

7.º PERFIL DE TEMPERATURAS

Tabela A.7. Temperaturas registadas no 7.º perfil de cada tapete do forno.

Tapete	Temperatura (°C)									$t_{\text{máx}}$ (°C)	$t_{\text{mín}}$ (°C)	Δt (°C)	
	Esquerda			Centro			Direita						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Superior	434,4	435,9	430,8	431,7	468,0	430,7	429,3	434,2	437,5	437,5	429,3	8,2	
	437,3	435,2	432,2	431,3	467,3	432,2	430,3	435,3	434,2	437,3	430,3	7,0	
	434,9	434,6	430,3	434,6	466,7	436,4	426,5	435,8	435,4	436,4	426,5	9,9	
	436,0	436,9	426,8	431,1	468,7	433,8	428,0	436,6	434,2	436,9	426,8	10,1	
	433,1	434,5	430,1	433,5	464,1	430,2	425,2	434,9	439,2	439,2	425,2	14,0	
Médio	371,3	364,2	356,8	368,4	384,9	372,4	364,0	363,9	344,9	372,4	344,9	27,5	
	369,8	364,2	358,8	367,6	384,4	372,3	364,3	360,0	343,2	372,3	343,2	29,1	
	370,1	363,7	357,8	369,1	384,8	370,7	364,3	363,3	344,0	370,7	344,0	26,7	
	371,0	361,6	359,9	368,5	384,7	371,0	364,3	362,9	343,2	371,0	343,2	27,8	
	370,9	363,0	357,4	370,1	384,9	372,6	361,9	361,5	343,0	372,6	343,0	29,6	
Inferior	333,5	343,5	351,3	363,0	376,6	370,6	351,2	359,2	336,0	370,6	333,5	37,1	
	334,2	347,9	349,5	356,1	375,5	371,1	357,7	356,3	343,3	371,1	334,2	36,9	
	334,7	346,3	348,7	359,2	378,0	366,5	357,4	360,4	336,6	366,5	334,7	31,8	
	334,2	346,6	347,8	362,3	378,6	370,1	353,8	356,9	337,9	370,1	334,2	35,9	
	333,5	343,7	349,3	362,4	376,6	366,5	353,1	355,8	336,2	366,5	333,5	33,0	
\bar{t} (°C)	TS	435,1	435,4	430,0	432,4	467,0	432,7	427,9	435,4	436,1	436,1	427,9	8,2
	TM	370,6	363,3	358,1	368,7	384,7	371,8	363,8	362,3	343,7	371,8	343,7	28,1
	TI	334,0	345,6	349,3	360,6	377,1	369,0	354,6	357,7	338,0	369,0	334,0	34,9
\bar{t}_{tap} (°C)	TS	433,1											
	TM	362,8											
	TI	351,1											
Δ médias (°C)	TS	2,0	2,3	-3,1	-0,7	33,8	-0,5	-5,3	2,2	3,0			
	TM	7,8	0,5	-4,7	5,9	21,9	9,0	1,0	-0,5	-19,1			
	TI	-17,1	-5,5	-1,8	9,5	26,0	17,9	3,5	6,6	-13,1			

7.º perfil de temperaturas

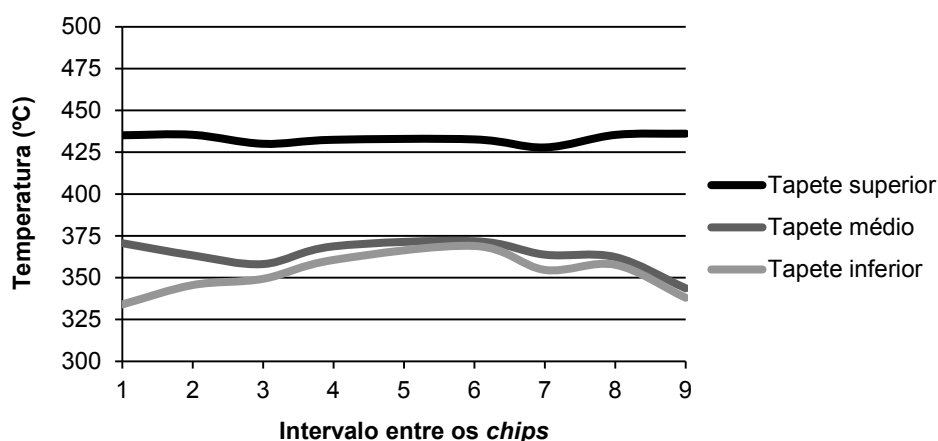


Figura A.7. Representação das médias das temperaturas observadas no 7.º perfil de cada tapete, em função do intervalo entre os chips.

8.º PERFIL DE TEMPERATURAS

Tabela A.8. Temperaturas registadas no 8.º perfil de cada tapete do forno.

Tapete	Temperatura (°C)									$t_{\text{máx}}$ (°C)	$t_{\text{mín}}$ (°C)	Δt (°C)	
	Esquerda			Centro			Direita						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Superior	445,3	450,5	447,6	449,2	485,8	448,7	443,9	445,7	440,4	450,5	440,4	10,1	
	445,4	448,0	448,8	451,7	485,3	452,0	443,3	445,7	440,2	452,0	440,2	11,8	
	445,9	448,5	450,2	449,2	485,0	449,3	444,6	445,4	439,3	450,2	439,3	10,9	
	445,4	447,6	447,6	451,4	481,5	450,2	443,1	445,5	437,4	451,4	437,4	14,0	
	446,1	447,8	447,5	448,8	484,0	452,2	445,1	446,8	437,9	452,2	437,9	14,3	
Médio	374,9	376,0	368,4	377,3	397,7	386,7	377,2	377,5	363,6	386,7	363,6	23,1	
	373,5	375,4	368,1	378,3	399,3	386,5	377,5	377,5	362,3	386,5	362,3	24,2	
	373,5	375,2	370,1	378,7	398,8	385,1	376,7	376,8	364,6	385,1	364,6	20,5	
	375,4	377,0	369,4	377,7	396,5	384,6	377,3	375,9	361,1	384,6	361,1	23,5	
	375,3	375,6	368,1	378,4	396,3	385,4	377,7	376,4	360,2	385,4	360,2	25,2	
Inferior	328,4	343,7	354,9	361,4	382,5	373,5	368,2	367,0	349,6	373,5	328,4	45,1	
	331,6	347,3	356,2	357,8	381,7	374,9	366,0	365,4	348,0	374,9	331,6	43,3	
	331,1	344,4	352,7	360,0	381,2	373,1	365,0	365,7	348,3	373,1	331,1	42,0	
	329,1	343,9	354,2	359,9	379,3	375,7	366,6	363,8	348,1	375,7	329,1	46,6	
	327,5	347,6	353,4	360,0	378,3	374,6	366,3	364,5	349,3	374,6	327,5	47,1	
\bar{t} (°C)	TS	445,6	448,5	448,3	450,1	484,3	450,5	444,0	445,8	439,0	450,5	439,0	11,4
	TM	374,5	375,8	368,8	378,1	397,7	385,7	377,3	376,8	362,4	385,7	362,4	23,3
	TI	329,5	345,4	354,3	359,8	380,6	374,4	366,4	365,3	348,7	374,4	329,5	44,8
\bar{t}_{tap} (°C)	TS	446,5											
	TM	374,9											
	TI	355,5											
Δ médias (°C)	TS	-0,9	2,0	1,9	3,6	37,8	4,0	-2,5	-0,7	-7,4			
	TM	-0,4	0,9	-6,1	3,2	22,8	10,7	2,4	1,9	-12,6			
	TI	-25,9	-10,1	-1,2	4,4	25,1	18,9	11,0	9,8	-6,8			

8.º perfil de temperaturas

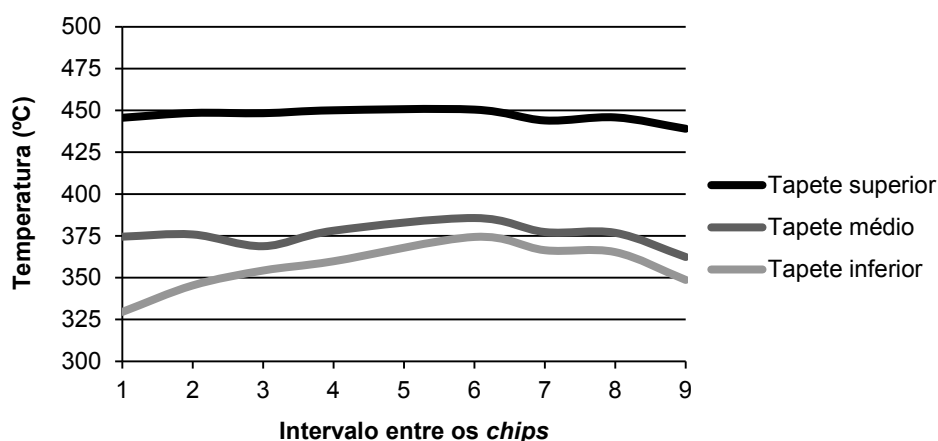


Figura A.8. Representação das médias das temperaturas observadas no 8.º perfil de cada tapete, em função do intervalo entre os chips.

9.º PERFIL DE TEMPERATURAS

Tabela A.9. Temperaturas (°C) registadas no 9.º perfil de cada tapete do forno.

Tapete	Esquerda			Centro			Direita			t_{\max} (°C)	t_{\min} (°C)	Δt (°C)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Superior	451,7	456,7	451,5	453,3	477,7	450,7	438,7	440,0	438,5	456,7	438,5	18,2	
	450,8	459,6	450,7	450,6	474,8	449,5	440,2	440,4	440,9	459,6	440,2	19,4	
	448,5	458,0	448,7	451,9	478,6	450,0	436,8	442,6	440,2	458,0	436,8	21,2	
	451,7	459,4	451,3	451,1	477,5	450,2	439,4	441,3	438,2	459,4	438,2	21,2	
	450,8	459,8	449,0	452,6	477,8	450,3	439,6	440,3	441,1	459,8	439,6	20,2	
Médio	389,4	388,3	382,3	389,4	406,0	391,5	381,2	379,5	367,4	391,5	367,4	24,1	
	389,2	389,0	382,4	389,1	406,1	391,3	381,7	379,5	367,1	391,3	367,1	24,2	
	389,7	389,7	380,9	388,6	405,8	390,9	381,7	379,4	364,8	390,9	364,8	26,1	
	389,8	391,0	380,9	388,4	406,0	391,0	383,0	378,1	367,5	391,0	367,5	23,5	
	389,1	390,1	382,2	388,7	405,7	391,2	383,3	378,9	365,7	391,2	365,7	25,5	
Inferior	341,9	356,0	350,9	363,0	383,5	372,0	359,0	360,4	335,9	372,0	335,9	36,1	
	342,5	356,3	351,5	362,0	383,4	369,7	360,0	360,3	336,5	369,7	336,5	33,2	
	344,8	354,6	352,5	359,6	378,9	372,0	362,7	360,3	340,5	372,0	340,5	31,5	
	341,3	356,7	351,7	361,0	381,4	372,3	361,0	359,0	338,7	372,3	338,7	33,6	
	340,3	356,0	353,9	363,2	383,6	371,5	362,4	357,7	336,5	371,5	336,5	35,0	
\bar{t} (°C)	TS	450,7	458,7	450,2	451,9	477,3	450,1	438,9	440,9	439,8	458,7	438,9	19,8
	TM	389,4	389,6	381,7	388,8	405,9	391,2	382,2	379,1	366,5	391,2	366,5	24,7
	TI	342,2	355,9	352,1	361,8	382,2	371,5	361,0	359,5	337,6	371,5	337,6	33,9
\bar{t}_{tap} (°C)	TS	447,7											
	TM	383,6											
	TI	355,2											
Δ médias (°C)	TS	3,0	11,0	2,6	4,2	29,6	2,5	-8,7	-6,7	-7,9	Desvio de temperatura (°C)	N.º de materiais	
	TM	5,9	6,0	-1,8	5,3	22,3	7,6	-1,4	-4,5	-17,1			
	TI	-13,0	0,7	-3,1	6,6	27,0	16,3	5,8	4,3	-17,6			
Soma de Δ médias (°C)	TS	20,9			—	-20,9						-10,4	3
	TM	15,4			—	-15,3						-7,7	2
	TI	-8,9			—	8,9						4,4	1

9.º perfil de temperaturas

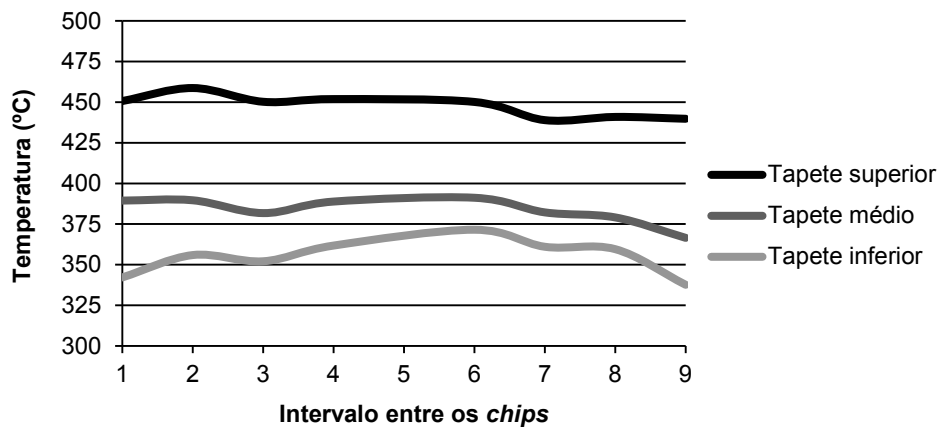


Figura A.9. Representação das médias das temperaturas observadas no 9.º perfil de cada tapete, em função do intervalo entre os chips.

10.º PERFIL DE TEMPERATURAS

Tabela A.10. Temperaturas (°C) registadas no 10.º perfil de cada tapete do forno.

Tapete	Esquerda			Centro			Direita			t_{\max} (°C)	t_{\min} (°C)	Δt (°C)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Superior	461,6	471,4	459,0	458,2	485,6	458,0	447,4	449,9	445,2	471,4	445,2	26,2	
	462,6	469,3	459,6	459,6	486,6	456,1	447,4	449,6	445,0	469,3	445,0	24,3	
	464,7	470,5	458,8	459,4	485,9	456,5	446,0	448,3	444,6	470,5	444,6	25,9	
	462,4	469,0	459,5	460,2	487,2	457,5	445,1	450,8	445,2	469,0	445,1	23,9	
	462,8	467,7	460,1	457,9	485,9	456,8	446,8	448,7	444,8	467,7	444,8	22,9	
Médio	396,6	394,4	390,9	397,9	405,0	396,3	385,6	383,2	369,1	397,9	369,1	28,8	
	396,3	394,5	390,3	398,3	405,1	396,2	384,6	383,1	367,9	398,3	367,9	30,4	
	397,4	394,2	391,2	397,4	404,1	396,6	385,3	383,7	369,4	397,4	369,4	28,0	
	395,6	394,1	391,9	397,5	405,0	396,0	386,8	383,4	368,8	397,5	368,8	28,7	
	395,6	394,4	391,4	396,9	405,4	396,2	384,7	383,6	368,8	396,9	368,8	28,1	
Inferior	359,3	368,4	357,6	365,9	384,7	383,1	369,5	368,5	340,1	383,1	340,1	43,0	
	358,7	370,5	361,4	370,6	385,0	381,4	368,7	365,6	343,6	381,4	343,6	37,8	
	359,1	366,5	363,8	371,0	382,8	382,6	368,6	367,4	344,2	382,6	344,2	38,4	
	356,7	365,5	363,0	368,9	382,2	378,7	374,0	366,4	343,9	378,7	343,9	34,8	
	356,6	369,6	360,5	371,5	383,7	381,8	368,7	366,5	344,3	381,8	344,3	37,5	
\bar{t} (°C)	TS	462,8	469,6	459,4	459,1	486,2	457,0	446,5	449,5	445,0	469,6	445,0	24,6
	TM	396,3	394,3	391,1	397,6	404,9	396,3	385,4	383,4	368,8	397,6	368,8	28,8
	TI	358,1	368,1	361,3	369,6	383,7	381,5	369,9	366,9	343,2	381,5	343,2	38,3
\bar{t}_{tap} (°C)	TS	456,1											
	TM	389,2											
	TI	364,8											
Δ médias (°C)	TS	6,7	13,5	3,3	3,0	30,1	0,9	-9,6	-6,6	-11,1	Desvio de temperatura (°C)	N.º de materiais	
	TM	7,1	5,2	2,0	8,4	15,8	7,1	-3,8	-5,8	-20,4			
	TI	-6,7	3,3	-3,6	4,8	18,9	16,7	5,1	2,1	-21,6			
Soma de Δ médias (°C)	TS	26,5			—	-26,5					-13,2	4	
	TM	22,7			—	-22,8					-11,4	3	
	TI	-2,2			—	2,3					1,1	0	

10.º perfil de temperaturas

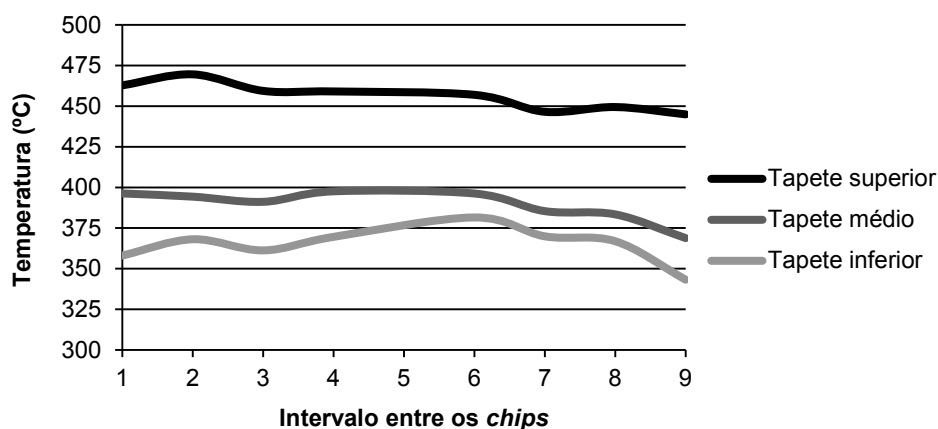


Figura A.10. Representação das médias das temperaturas observadas no 10.º perfil de cada tapete, em função do intervalo entre os chips.

11.º PERFIL DE TEMPERATURAS

Tabela A.11. Temperaturas (°C) registadas no 11.º perfil de cada tapete do forno.

Tapete	Esquerda			Centro			Direita			t_{\max} (°C)	t_{\min} (°C)	Δt (°C)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Superior	450,9	462,5	448,4	457,1	479,4	459,7	438,3	443,6	430,2	462,5	430,2	32,3	
	453,0	460,9	451,4	456,5	478,6	456,9	436,0	442,8	430,4	460,9	430,4	30,5	
	449,1	460,3	450,4	459,6	478,4	455,6	437,5	443,4	428,5	460,3	428,5	31,8	
	446,2	458,9	450,0	456,5	479,6	452,7	438,3	442,6	430,6	458,9	430,6	28,3	
	451,3	458,3	448,8	458,4	479,2	454,1	437,7	442,5	428,9	458,4	428,9	29,5	
Médio	400,8	398,0	400,6	402,5	424,0	404,5	400,3	398,0	384,3	404,5	384,3	20,2	
	399,8	399,3	400,5	403,5	423,5	404,5	401,0	397,1	383,7	404,5	383,7	20,8	
	399,9	398,8	400,1	404,6	423,7	405,0	400,1	397,9	384,2	405,0	384,2	20,8	
	399,8	398,6	399,4	404,7	424,4	406,5	400,0	397,1	383,1	406,5	383,1	23,4	
	401,4	399,7	399,6	405,2	423,5	405,8	399,9	397,6	384,6	405,8	384,6	21,2	
Inferior	350,6	364,3	367,5	368,2	387,3	381,7	370,5	375,3	348,1	381,7	348,1	33,6	
	352,4	365,2	364,4	367,2	391,7	386,2	367,5	373,0	346,9	386,2	346,9	39,3	
	350,8	362,4	365,3	371,0	392,9	386,0	369,1	372,5	349,3	386,0	349,3	36,7	
	349,5	362,8	363,2	371,4	391,4	383,9	366,1	372,3	350,5	383,9	349,5	34,4	
	349,1	361,1	365,6	372,2	392,4	383,1	368,5	372,9	347,9	383,1	347,9	35,2	
\bar{t} (°C)	TS	450,1	460,2	449,8	457,6	479,0	455,8	437,6	443,0	429,7	460,2	429,7	30,5
	TM	400,3	398,9	400,0	404,1	423,8	405,3	400,3	397,5	384,0	405,3	384,0	21,3
	TI	350,5	363,2	365,2	370,0	391,1	384,2	368,3	373,2	348,5	384,2	348,5	35,6
\bar{t}_{tap} (°C)	TS	448,0											
	TM	398,8											
	TI	365,4											
Δ médias (°C)	TS	2,1	12,2	1,8	9,7	31,1	7,8	-10,4	-5,0	-18,3	Desvio de temperatura (°C)	N.º de materiais	
	TM	1,5	0,1	1,2	5,3	25,0	6,5	1,5	-1,3	-14,8			
	TI	-14,9	-2,2	-0,2	4,6	25,8	18,8	3,0	7,8	-16,8			
Soma de Δ médias (°C)	TS	25,8			—	-25,8					-12,9	3	
	TM	8,2			—	-8,2					-4,1	1	
	TI	-12,7			—	12,7					6,4	1	

11.º perfil de temperaturas

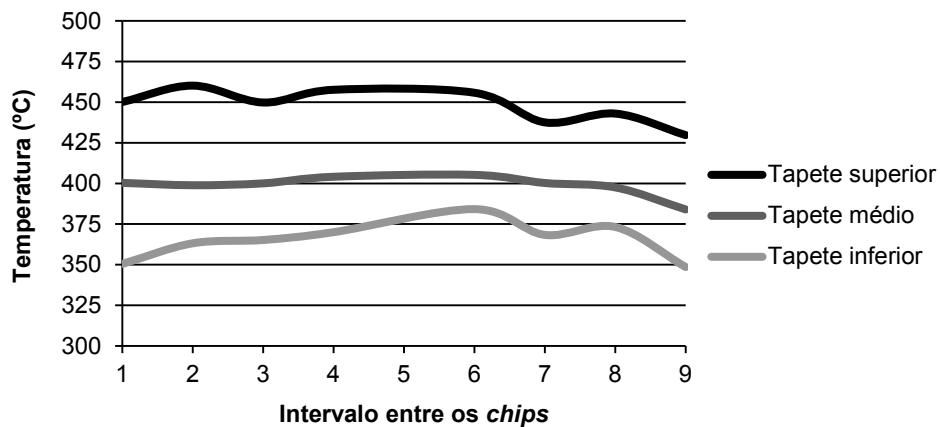


Figura A.11. Representação das médias das temperaturas observadas no 11.º perfil de cada tapete, em função do intervalo entre os chips.

12.º PERFIL DE TEMPERATURAS

Tabela A.12. Temperaturas (°C) registadas no 12.º perfil de cada tapete do forno.

Tapete	Esquerda			Centro			Direita			t_{\max} (°C)	t_{\min} (°C)	Δt (°C)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Superior	451,3	452,9	451,3	456,0	478,6	460,1	454,4	453,3	441,8	460,1	441,8	18,3	
	448,1	450,0	446,2	458,0	480,6	460,6	452,1	453,1	446,2	460,6	446,2	14,4	
	448,0	450,3	446,8	460,6	477,9	460,1	452,8	450,4	442,2	460,6	442,2	18,4	
	446,3	454,0	450,0	455,8	479,9	457,7	453,7	449,6	445,2	457,7	445,2	12,5	
	450,1	454,7	448,9	455,3	479,2	462,9	451,6	449,9	445,6	462,9	445,6	17,3	
Médio	369,1	367,8	371,0	377,5	397,9	379,6	365,8	368,6	351,7	379,6	351,7	27,9	
	372,3	367,8	371,3	379,5	398,0	378,7	367,0	368,1	353,9	379,5	353,9	25,6	
	370,5	367,9	370,9	380,4	397,7	382,0	369,1	366,3	353,4	382,0	353,4	28,6	
	372,4	366,9	369,4	378,5	400,5	379,4	369,7	366,2	354,5	379,4	354,5	24,9	
	372,0	370,7	369,6	377,9	399,3	381,2	368,3	365,7	354,1	381,2	354,1	27,1	
Inferior	330,6	345,7	340,5	344,0	371,0	356,8	350,9	346,1	323,6	356,8	323,6	33,2	
	331,8	340,2	342,2	342,1	368,4	354,9	347,2	344,3	328,7	354,9	328,7	26,2	
	331,0	343,7	341,7	344,2	369,6	357,1	348,2	346,4	323,8	357,1	323,8	33,3	
	328,1	344,1	344,7	343,8	371,8	359,8	348,0	344,2	325,2	359,8	325,2	34,6	
	330,4	344,8	342,8	346,0	367,1	359,3	346,6	343,7	326,2	359,3	326,2	33,1	
\bar{t} (°C)	TS	448,8	452,4	448,6	457,1	479,2	460,3	452,9	451,3	444,2	460,3	444,2	16,1
	TM	371,3	368,2	370,4	378,8	398,7	380,2	368,0	367,0	353,5	380,2	353,5	26,7
	TI	330,4	343,7	342,4	344,0	369,6	357,6	348,2	344,9	325,5	357,6	325,5	32,1
\bar{t}_{tap} (°C)	TS	451,9											
	TM	369,7											
	TI	342,1											
Δ médias (°C)	TS	-3,2	0,4	-3,3	5,2	27,3	8,3	1,0	-0,7	-7,7	Desvio de temperatura (°C)	N.º de materiais	
	TM	1,6	-1,4	0,8	9,1	29,0	10,5	-1,7	-2,7	-16,1			
	TI	-11,7	1,6	0,3	1,9	27,5	15,5	6,1	2,9	-16,6			
Soma de Δ médias (°C)	TS	-0,9			—	0,9			0,4			0	
	TM	10,0			—	-10,0			-5,0			1	
	TI	-7,9			—	7,9			3,9			1	

12.º perfil de temperaturas

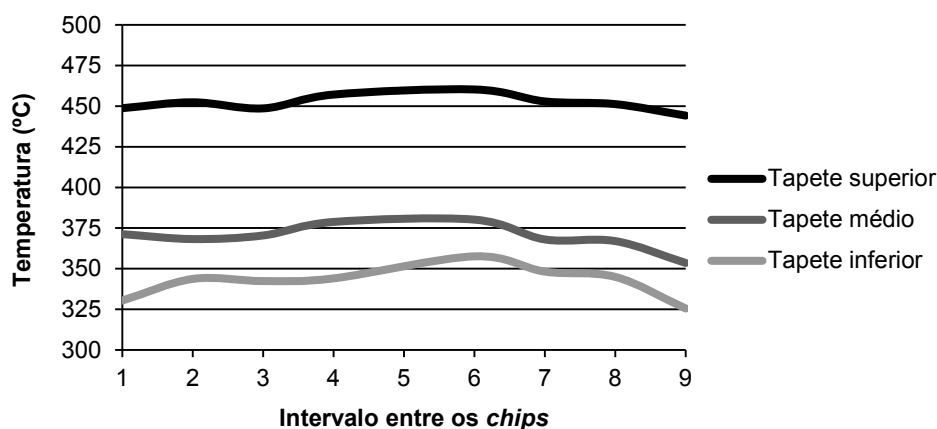


Figura A.12. Representação das médias das temperaturas observadas no 12.º perfil de cada tapete, em função do intervalo entre os chips.

13.º PERFIL DE TEMPERATURAS

Tabela A.13. Temperaturas (°C) registadas no 13.º perfil de cada tapete do forno.

Tapete	Esquerda			Centro			Direita			t_{\max} (°C)	t_{\min} (°C)	Δt (°C)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Superior	452,2	455,7	452,1	459,3	484,8	460,1	450,7	451,1	444,2	460,1	444,2	15,9	
	451,6	458,3	453,0	460,5	485,6	460,8	449,9	451,0	444,3	460,8	444,3	16,5	
	454,9	458,9	452,7	458,0	483,9	461,6	452,0	451,7	445,5	461,6	445,5	16,1	
	453,1	456,6	452,7	462,0	481,5	460,6	450,0	451,8	446,7	462,0	446,7	15,3	
	454,1	461,1	454,8	458,3	483,9	460,4	452,2	453,2	447,5	461,1	447,5	13,6	
Médio	371,2	370,3	371,4	381,2	396,8	381,9	374,4	366,1	360,7	381,9	360,7	21,2	
	370,9	368,3	369,8	383,0	395,6	380,5	374,4	368,5	360,5	383,0	360,5	22,5	
	371,3	368,8	371,5	381,5	395,9	380,7	376,1	368,8	362,0	381,5	362,0	19,5	
	371,3	369,0	370,2	381,6	399,0	381,8	374,5	368,9	359,1	381,8	359,1	22,7	
	371,2	369,1	370,9	382,1	396,4	383,3	375,6	367,8	361,6	383,3	361,6	21,7	
Inferior	347,3	361,0	361,8	365,6	386,2	379,0	364,0	361,6	356,1	379,0	347,3	31,7	
	348,0	360,8	360,0	362,2	387,4	378,6	366,0	361,4	356,4	378,6	348,0	30,6	
	347,1	360,2	362,7	365,6	387,8	377,7	365,0	360,8	357,4	377,7	347,1	30,6	
	345,3	362,4	361,5	361,0	388,1	376,3	363,4	360,9	358,4	376,3	345,3	31,0	
	346,3	361,0	361,8	361,4	384,4	378,7	365,6	361,7	356,5	378,7	346,3	32,4	
\bar{t} (°C)	TS	453,2	458,1	453,1	459,6	483,9	460,7	451,0	451,8	445,6	460,7	445,6	15,1
	TM	371,2	369,1	370,8	381,9	396,7	381,6	375,0	368,0	360,8	381,9	360,8	21,1
	TI	346,8	361,1	361,6	363,2	386,8	378,1	364,8	361,3	357,0	378,1	346,8	31,3
\bar{t}_{tap} (°C)	TS	454,1											
	TM	372,3											
	TI	361,7											
Δ médias (°C)	TS	-0,9	4,0	-1,1	5,5	29,8	6,6	-3,2	-2,4	-8,5	Desvio de temperatura (°C)	N.º de materiais	
	TM	-1,1	-3,2	-1,5	9,6	24,4	9,3	2,7	-4,3	-11,5			
	TI	-14,9	-0,6	-0,2	1,4	25,1	16,3	3,1	-0,4	-4,8			
Soma de Δ médias (°C)	TS	7,5			—	-7,5			-3,7			1	
	TM	3,7			—	-3,7			-1,9			0	
	TI	-14,2			—	14,3			7,1			2	

13.º perfil de temperaturas

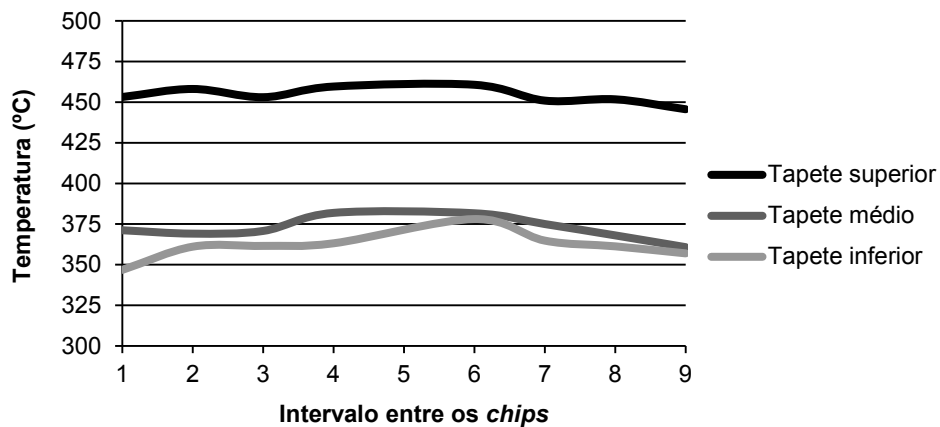


Figura A.13. Representação das médias das temperaturas observadas no 13.º perfil de cada tapete, em função do intervalo entre os chips.

14.º PERFIL DE TEMPERATURAS

Tabela A.14. Temperaturas (°C) registadas no 14.º perfil de cada tapete do forno.

Tapete	Esquerda			Centro			Direita			t_{\max} (°C)	t_{\min} (°C)	Δt (°C)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Superior	455,1	461,2	454,8	458,5	486,1	457,5	448,7	454,7	446,9	461,2	446,9	14,3	
	456,7	462,3	455,4	456,6	486,8	462,6	448,7	456,6	446,1	462,6	446,1	16,5	
	456,3	462,1	454,3	459,8	485,0	460,2	447,7	456,9	446,5	462,1	446,5	15,6	
	453,7	463,7	456,1	459,1	485,4	461,7	448,2	456,0	449,4	463,7	448,2	15,5	
	455,2	464,3	458,0	460,7	485,2	460,4	451,7	457,3	450,2	464,3	450,2	14,1	
Médio	358,0	358,3	358,3	362,9	379,9	370,0	359,1	357,8	346,3	370,0	346,3	23,7	
	358,4	357,7	359,9	361,2	379,7	369,2	357,7	355,2	347,6	369,2	347,6	21,6	
	357,8	357,6	359,0	360,2	382,4	369,8	357,0	355,3	347,9	369,8	347,9	21,9	
	360,4	358,9	361,7	362,3	382,5	369,1	357,1	355,5	346,7	369,1	346,7	22,4	
	359,3	359,4	359,4	363,8	376,5	368,6	357,4	356,6	347,6	368,6	347,6	21,0	
Inferior	355,4	362,6	361,4	366,1	384,6	371,9	366,3	362,5	365,2	371,9	355,4	16,5	
	356,4	362,6	362,9	363,5	385,5	373,6	367,5	365,5	364,3	373,6	356,4	17,2	
	356,4	364,5	358,8	364,0	381,5	374,7	366,3	365,2	363,0	374,7	356,4	18,3	
	353,2	362,9	359,5	362,1	380,1	375,9	365,5	365,0	360,3	375,9	353,2	22,7	
	354,0	362,8	360,1	362,7	383,7	371,5	364,7	361,4	361,7	371,5	354,0	17,5	
\bar{t} (°C)	TS	455,4	462,7	455,7	458,9	485,7	460,5	449,0	456,3	447,8	462,7	447,8	14,9
	TM	358,8	358,4	359,7	362,1	380,2	369,3	357,7	356,1	347,2	369,3	347,2	22,1
	TI	355,1	363,1	360,5	363,7	383,1	373,5	366,1	363,9	362,9	373,5	355,1	18,4
\bar{t}_{tap} (°C)	TS	455,8											
	TM	358,7											
	TI	363,6											
Δ médias (°C)	TS	-0,4	6,9	-0,1	3,1	29,9	4,7	-6,8	0,5	-8,0	Desvio de temperatura (°C)	N.º de materiais	
	TM	0,1	-0,3	1,0	3,4	21,6	10,7	-1,0	-2,6	-11,4			
	TI	-8,5	-0,5	-3,1	0,1	19,5	9,9	2,5	0,3	-0,7			
Soma de Δ médias (°C)	TS	9,6			—	-9,6					-4,8	1	
	TM	4,3			—	-4,3					-2,1	0	
	TI	-12,0			—	12,0					6,0	1	

14.º perfil de temperaturas

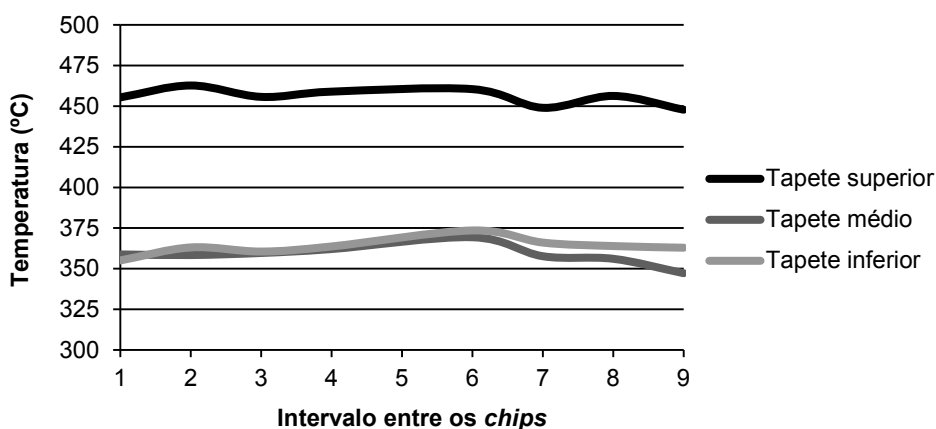


Figura A.14. Representação das médias das temperaturas observadas no 14.º perfil de cada tapete, em função do intervalo entre os chips.

15.º PERFIL DE TEMPERATURAS

Tabela A.15. Temperaturas (°C) registadas no 15.º perfil de cada tapete do forno.

Tapete	Esquerda			Centro			Direita			t_{\max} (°C)	t_{\min} (°C)	Δt (°C)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Superior	449,7	451,2	451,9	458,3	478,5	460,1	448,7	447,9	445,9	460,1	445,9	14,2	
	451,7	449,7	449,6	456,3	474,5	459,2	449,8	448,6	444,9	459,2	444,9	14,3	
	448,9	451,9	452,9	455,7	477,7	459,3	449,2	447,1	445,4	459,3	445,4	13,9	
	447,8	449,5	452,8	455,2	478,4	458,0	447,0	448,0	445,4	458,0	445,4	12,6	
	449,4	448,9	452,8	458,9	476,9	461,1	447,6	449,3	446,7	461,1	446,7	14,4	
Médio	352,5	353,7	350,9	361,4	377,9	361,9	355,9	355,8	351,5	361,9	350,9	11,0	
	353,5	355,7	349,8	362,5	377,2	361,2	357,1	353,9	351,6	362,5	349,8	12,7	
	353,2	353,6	349,8	363,2	377,0	362,1	354,0	354,0	350,6	363,2	349,8	13,4	
	352,6	356,0	350,6	360,1	376,6	363,3	355,4	357,0	354,2	363,3	350,6	12,7	
	353,8	354,0	350,7	360,5	376,3	364,0	356,1	357,0	352,2	364,0	350,7	13,3	
Inferior	360,4	371,8	360,8	365,6	386,8	371,4	361,2	361,1	359,4	371,8	359,4	12,4	
	361,2	370,6	361,5	368,3	384,4	371,8	364,4	359,1	361,1	371,8	359,1	12,7	
	359,2	369,0	360,8	367,6	384,5	371,3	360,2	361,2	361,0	371,3	359,2	12,1	
	361,9	371,0	361,7	366,7	386,8	370,9	360,1	360,2	359,3	371,0	359,3	11,7	
	361,8	372,1	361,9	367,7	386,4	371,5	360,7	360,0	358,1	372,1	358,1	14,0	
\bar{t} (°C)	TS	449,5	450,2	452,0	456,9	477,2	459,5	448,5	448,2	445,7	459,5	445,7	13,9
	TM	353,1	354,6	350,4	361,5	377,0	362,5	355,7	355,5	352,0	362,5	350,4	12,1
	TI	360,9	370,9	361,3	367,2	385,8	371,4	361,3	360,3	359,8	371,4	359,8	11,6
\bar{t}_{tap} (°C)	TS	451,3											
	TM	355,7											
	TI	364,1											
Δ médias (°C)	TS	-1,8	-1,1	0,7	5,6	25,9	8,2	-2,8	-3,1	-5,6	Desvio de temperatura (°C)	N.º de materiais	
	TM	-2,6	-1,1	-5,3	5,9	21,3	6,8	0,0	-0,1	-3,7			
	TI	-3,2	6,8	-2,8	3,0	21,6	7,2	-2,8	-3,8	-4,4			
Soma de Δ médias (°C)	TS	3,4			—	-3,4					-1,7	0	
	TM	-3,1			—	3,1					1,5	0	
	TI	3,8			—	-3,8					-1,9	0	

15.º perfil de temperaturas

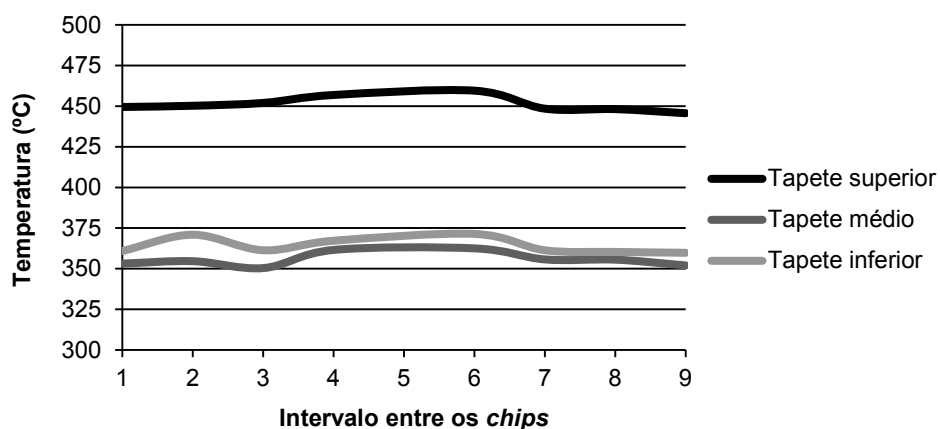


Figura A.15. Representação das médias das temperaturas observadas no 15.º perfil de cada tapete, em função do intervalo entre os chips.

16.º PERFIL DE TEMPERATURAS

Tabela A.16. Temperaturas (°C) registadas no 16.º perfil de cada tapete do forno.

Tapete	Esquerda			Centro			Direita			t_{\max} (°C)	t_{\min} (°C)	Δt (°C)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Superior	451,7	459,3	451,1	462,8	494,8	460,8	448,7	453,8	452,7	462,8	448,7	14,1	
	451,8	459,3	452,2	458,0	496,0	459,6	448,0	455,2	457,1	459,6	448,0	11,6	
	453,2	462,7	449,9	462,3	496,7	458,7	453,6	452,1	452,4	462,7	449,9	12,8	
	449,1	458,2	453,5	458,4	494,9	461,4	451,5	454,5	452,2	461,4	449,1	12,3	
	450,8	462,1	454,7	458,0	494,8	460,2	453,4	455,7	454,3	462,1	450,8	11,3	
Médio	351,9	352,1	349,0	359,6	379,4	358,8	356,5	356,6	359,3	359,6	349,0	10,6	
	354,6	350,9	349,4	360,9	379,8	361,8	358,4	358,7	358,9	361,8	349,4	12,4	
	353,4	352,6	349,5	357,7	378,1	361,5	359,9	355,7	357,5	361,5	349,5	12,0	
	354,4	351,3	350,6	360,2	377,1	359,3	359,8	357,2	356,5	360,2	350,6	9,6	
	352,9	354,9	352,9	361,1	377,7	360,8	358,1	356,4	357,9	361,1	352,9	8,2	
Inferior	354,8	362,8	355,0	352,9	387,7	365,8	359,2	360,3	358,7	365,8	352,9	12,9	
	354,3	360,8	354,1	353,0	385,5	363,2	360,9	361,3	359,5	363,2	353,0	10,2	
	355,5	362,4	355,4	352,5	385,9	362,1	360,5	363,0	357,6	363,0	352,5	10,5	
	358,3	364,5	356,0	355,2	386,5	363,3	362,6	359,3	359,0	364,5	355,2	9,3	
	354,3	364,3	356,8	352,6	386,1	362,7	360,4	363,2	359,9	364,3	352,6	11,7	
\bar{t} (°C)	TS	451,3	460,3	452,3	459,9	495,4	460,1	451,0	454,3	453,7	460,3	451,0	9,3
	TM	353,4	352,4	350,3	359,9	378,4	360,4	358,5	356,9	358,0	360,4	350,3	10,2
	TI	355,4	363,0	355,5	353,2	386,3	363,4	360,7	361,4	358,9	363,4	353,2	10,2
\bar{t}_{tap} (°C)	TS	455,4											
	TM	356,2											
	TI	359,0											
Δ médias (°C)	TS	-4,1	4,9	-3,1	4,5	40,1	4,8	-4,3	-1,1	-1,6	Desvio de temperatura (°C)	N.º de materiais	
	TM	-2,8	-3,9	-6,0	3,7	22,2	4,2	2,3	0,7	1,8			
	TI	-3,5	4,0	-3,5	-5,7	27,4	4,5	1,8	2,5	0,0			
Soma de Δ médias (°C)	TS	2,3			—	-2,3					-1,2	0	
	TM	-9,0			—	9,0					4,5	1	
	TI	-8,7			—	8,7					4,3	1	

16.º perfil de temperaturas

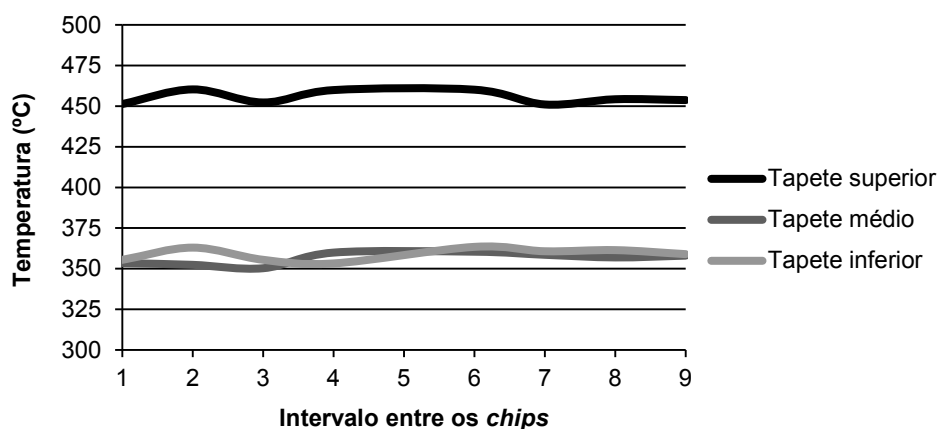


Figura A.16. Representação das médias das temperaturas observadas no 16.º perfil de cada tapete, em função do intervalo entre os chips.

17.º PERFIL DE TEMPERATURAS

Tabela A.17. Temperaturas (°C) registadas no 17.º perfil de cada tapete do forno.

Tapete	Esquerda			Centro			Direita			t_{\max} (°C)	t_{\min} (°C)	Δt (°C)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Superior	463,8	469,6	469,1	470,4	499,9	472,3	463,8	464,7	465,8	472,3	463,8	8,5	
	463,0	467,5	467,9	470,0	502,1	472,6	463,3	466,3	466,1	472,6	463,0	9,6	
	461,1	465,3	471,1	470,0	501,6	470,7	464,2	466,3	467,7	471,1	461,1	10,0	
	462,3	466,7	467,8	472,6	500,6	470,8	462,1	464,5	467,3	472,6	462,1	10,5	
	461,4	475,2	468,8	470,1	500,8	471,9	462,6	466,0	467,4	475,2	461,4	13,8	
Médio	374,6	378,4	373,4	377,3	397,2	380,0	378,0	384,6	381,3	384,6	373,4	11,2	
	373,0	377,4	373,9	378,8	394,3	380,6	376,1	384,5	379,5	384,5	373,0	11,5	
	373,2	376,1	374,1	379,0	396,5	382,0	376,8	384,6	380,3	384,6	373,2	11,4	
	373,6	376,4	374,8	377,2	395,7	379,9	377,4	385,5	382,2	385,5	373,6	11,9	
	373,5	377,7	375,8	376,0	398,8	381,0	377,8	385,5	381,8	385,5	373,5	12,0	
Inferior	365,5	372,3	368,7	369,7	390,6	377,4	371,0	369,9	374,4	377,4	365,5	11,9	
	365,0	370,3	368,1	368,1	393,0	378,0	371,9	370,7	370,1	378,0	365,0	13,0	
	366,2	370,9	366,4	366,0	388,3	376,8	372,8	371,0	371,8	376,8	366,0	10,8	
	366,1	371,8	367,7	366,0	389,9	378,3	370,5	371,3	370,9	378,3	366,0	12,3	
	367,0	373,0	366,4	366,1	391,9	377,3	369,3	371,9	373,8	377,3	366,1	11,2	
\bar{t} (°C)	TS	462,3	468,9	468,9	470,6	501,0	471,7	463,2	465,6	466,9	471,7	462,3	9,3
	TM	373,6	377,2	374,4	377,7	396,5	380,7	377,2	384,9	381,0	384,9	373,6	11,4
	TI	366,0	371,7	367,5	367,2	390,7	377,6	371,1	371,0	372,2	377,6	366,0	11,6
\bar{t}_{tap} (°C)	TS	467,3											
	TM	378,3											
	TI	370,5											
Δ médias (°C)	TS	-4,9	1,6	1,7	3,4	33,7	4,4	-4,1	-1,7	-0,4	Desvio de temperatura (°C)	N.º de materiais	
	TM	-4,8	-1,1	-3,9	-0,7	18,2	2,4	-1,1	6,6	2,7			
	TI	-4,5	1,1	-3,1	-3,3	20,2	7,1	0,6	0,4	1,7			
Soma de Δ médias (°C)	TS	1,7				-1,7					-0,9	0	
	TM	-10,5				10,5					5,3	1	
	TI	-9,8				9,8					4,9	1	

17.º perfil de temperaturas

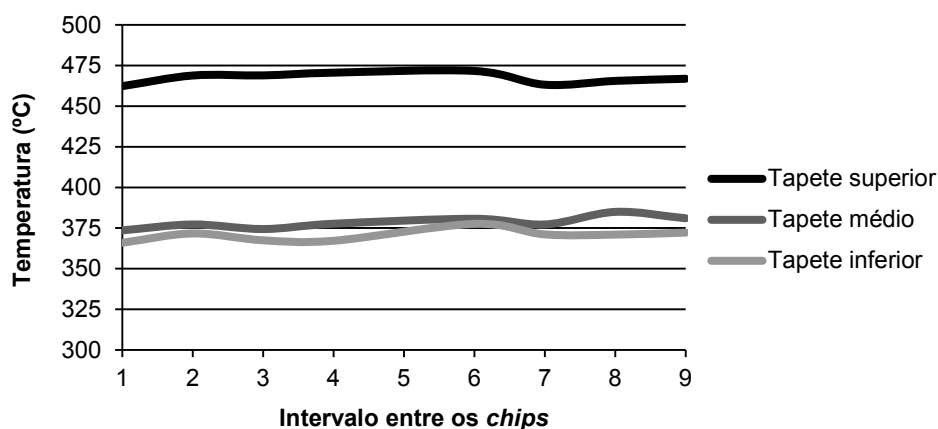


Figura A.17. Representação das médias das temperaturas observadas no 17.º perfil de cada tapete, em função do intervalo entre os chips.

ANEXO B. HISTÓRICO DE INTERVENÇÕES

EXTERIORES: QUEIMADORES TUBULARES E ESTRUTURA DO FORNO

Tabela B.1. Intervenções exteriores nos queimadores tubulares e na estrutura do forno.

DATA	LOCAL		INTERVENÇÃO
15/10/2013	TS	Queimadores	17: Ângulo quase 90°; correção para 45°
	TM	Queimadores	1: Ângulo quase 90°; correção para 45°
			18: Ângulo quase 90°; correção para 45°
	TI	Queimadores	1: Ângulo 90°; correção para 45°
			17: Ângulo 90°; correção para 45°
			23: Ângulo 90°; correção para 45°
			29: Ângulo 0°; correção para 45°
24/10/2013	TS	Pilotos	Tocam no tapete à direita
		Queimadores	Dificuldade no arranque: 1
	TM	Pilotos	Tocam no tapete à esquerda e à direita
		Queimadores	Dificuldade no arranque: 2, 3, 14 e 15; 2, 3, 14 e 15 não arrancaram
TI	Pilotos	Tocam no tapete à esquerda e à direita	
28/10/2013	TODOS	Queimadores	Limpeza exterior
31/10/2013	TM	Queimadores	15 não arrancou
05/11/2013	TODOS	Pilotos	Limpeza exterior
06/11/2013	TS	Tapete	Desgaste no lado esquerdo e no lado direito
07/11/2013	TS	Sensor/Válvula	Temperatura do sensor não sobe de 349 °C; válvula a 100%
	TM	Queimadores	Dificuldade no arranque: 2 e 14
13/11/2013	CHAMINÉ		2: descaída do teto da fábrica; impede a medição de ΔP
21/11/2013	TS	Sensor/Válvula	Temperatura do sensor difere -20 °C do <i>set point</i> ; válvula a 100%; temperatura do TS só alterada pela dos outros tapetes
	TM	Queimadores	Dificuldade no arranque: 2
22/11/2013	TS	Sensor/Válvula	Temperatura do sensor difere mais de 2°C do <i>set point</i> ; temperatura do TS só alterada pela dos outros tapetes
27/11/2013	TM	Queimadores	Dificuldade no arranque: 1, 2, 3, 14 e 15; 2 não arrancou
28/11/2013	CHAMINÉ		1: $\Delta P = -0,05$ inwc (<-0,08 inwc, mín); corrigido para $\Delta P = -0,09$ inwc
			2: $\Delta P = -0,11$ inwc (>-0,10 inwc, máx); corrigido para $\Delta P = -0,10$ inwc
04/12/2013	TS	Tapete	Substituição do tapete
			Substituição das guias cónicas
17/12/2013	TS	Tapetes	Alinhar tapetes
	TM		
	TM	Queimadores	1: Ângulo quase 90°; correção para 45°
			17: Ângulo quase 90°; correção para 45°
	TI	Queimadores	1: Ângulo superior a 90°; correção para 45°
			11: Ângulo 0°; correção para 45°
			23: Ângulo quase 90°; correção para 45°
29: Ângulo 90°; correção para 45°			
TODOS	Estrutura	Limpeza exterior	

08/01/2014	TODOS	Válvulas	Correção da abertura das válvulas de borboleta a chama baixa
		Pilotos	Ajuste da chama
	TI	Queimadores	11: Ângulo 0°; correção para 45°
20/01/2014	Estrutura	Soldar estrutura entre as portas 3 e 4, do lado esquerdo	
	TI	Guias do tapete	Substituição da 1.ª guia do tapete, do lado direito
21/01/2014	TM	Arrancadores	Soldar arrancadores dos pilotos do lado direito
	TI		
	TI	Tapete	Alinhar tapete
08/04/2014	TODOS	Queimadores	Reorientação para 80°

EXTERIORES: QUEIMADORES INFRAVERMELHOS

Tabela B.2. Intervenções exteriores nos queimadores infravermelhos.

DATA	LOCAL	INTERVENÇÃO
24/10/2013	Pilotos	Tocam no tapete superior à esquerda e à direita
	Arranque	Os 33, 34 e 35 tiveram dificuldades no arranque
28/10/2013	Pilotos	Não arrancaram
04-05/11/2013	Queimadores	Substituição do 1, 2, 3, 5, 6, 12, 15, 19, 21, 29, 31, 32 e 34
	Queimadores	Distância entre a fila 2 e 3 superior às demais; influencia a convecção
	Pilotos	Limpeza
06/11/2013	Pilotos	Não arrancaram
13/11/2013	Queimadores	Distância da fila 5 ao tapete (à esquerda) superior ao máximo recomendado
28/11/2013	Arranque	Os 8, 9 e 10 tiveram dificuldades no arranque
04/12/2013	Queimadores	Substituir os IV Não OK e OK com reservas: 4, 10, 13, 20, 30, 33
05/12/2013	Arranque	A fila 2 e os 32-35 tiveram dificuldades no arranque
	Queimadores	Substituir os IV Não OK e OK com reservas: 11, 17 e 22
18/12/2013	Queimadores	A fila 2 teve dificuldades no arranque
06/01/2014	Queimadores	Substituição do 12 e 13
28/01/2014	Queimadores	Substituição do 11, 17 e 22
05/03/2014	Queimadores	Substituição da fila 2 pela fila 4
08/04/2014	Queimadores	Substituição do 29

ESTRUTURAIS: INTRODUÇÃO/REMOÇÃO DE GUIAS E LIMITADORES

Tabela B.3. Intervenções estruturais no forno.

DATA	LOCAL	INTERVENÇÃO
21/01/2014	TS	Remoção de SOLDADURAS nos queimadores 14 e 16
		Remoção de SOLDADURA no queimador 7
		Remoção de SOLDADURAS nos queimadores 4 e 12
	TM	9 não permite retirar a GUIA; 12 só permite retirar a rosca
28/01/2014	TI	1, 9 e 12 só permitem retirar a rosca
		Remoção dos LIMITADORES dos queimadores 24, 26, 29, 30 e 32
05/02/2014	TI	Introdução de GUIAS nos queimadores 24 e 26
		Remoção de GUIAS nos queimadores 5 e 10
11/02/2014	TI	Recolocação de GUIAS: dos queimadores 31 e 34 para os queimadores 30 e 32
		Remoção de GUIAS nos queimadores 13, 15 e 17
18/02/2014	TS	Remoção de GUIA no queimador 18
26/02/2014	TI	Remoção de GUIAS nos queimadores 7, 11 e 15
05/03/2014	TI	Introdução de LIMITADORES nos queimadores 19, 21 e 23 (fila 9)
		Introdução de LIMITADORES nos queimadores 16 (intervalo 8) e 18 (intervalo 9)
11/03/2014	TI	Introdução de GUIA no queimador 18
		Remoção de GUIA no queimador 9
		Introdução de LIMITADORES nos queimadores 10 (intervalo 7), 12 (intervalo 8) e 14 (intervalo 9)
26/03/2014	TI	Introdução de GUIAS nos queimadores 10 e 14
		Remoção de GUIAS nos queimadores 13 e 17
	TS	Introdução de GUIA no queimador 17
		Remoção de GUIA no queimador 10
TI	Recolocação de GUIA: do queimador 14 para o queimador 16	

ANEXO C. PROCEDIMENTOS PARA LIMPEZA CORRETA

Em todos os procedimentos de limpeza deve-se utilizar proteção auditiva e proteção ocular com ponteira antiembolismo, devido à utilização de ar comprimido.

LIMPEZA SEMANAL: LIMPEZA DO INTERIOR DO FORNO

Material necessário: mangueira de ar comprimido com ponteira longa; lanterna.

Zonas de intervenção: pilotos; queimadores tubulares; tapetes; aberturas inferiores do forno.

1. Abrir todas as portas do forno;
2. **Zona dos pilotos do lado direito:**
 - Limpeza dos pilotos (em proximidade);
 - Limpeza dos queimadores tubulares (em proximidade);
 - Limpeza dos tapetes (em proximidade);
 - Limpeza das aberturas inferiores do forno;
3. **Zona dos pilotos do lado esquerdo:**
 - Limpeza dos pilotos (em proximidade);
 - Limpeza dos queimadores tubulares (em proximidade);
 - Limpeza dos tapetes (em proximidade);
 - Limpeza das aberturas inferiores do forno;
4. **Geral (todas as zonas):**
 - Limpeza geral do interior do forno;
5. Assegurar que o chão à volta do forno está limpo e a área desimpedida.

LIMPEZA BIMENSAL: LIMPEZA EXTERIOR DOS PILOTOS E DOS QUEIMADORES TUBULARES DO FORNO

Material necessário: papel de lixa; escovilhão de metal; lanterna.

Zonas de intervenção: pilotos; queimadores tubulares.

1. Limpeza dos pilotos com o papel de lixa;
2. Limpeza das aberturas de gás dos queimadores tubulares com o escovilhão de metal (em proximidade);
3. **Seguir o procedimento de limpeza interior do forno;**
4. Assegurar que o chão à volta do forno está limpo e a área desimpedida.

LIMPEZA SEMESTRAL: LIMPEZA INTERIOR DOS QUEIMADORES TUBULARES DO FORNO

Material necessário: chave de grifos; escovilhão de metal; mangueira de ar comprimido com ponteira longa; lanterna.

Zonas de intervenção: queimadores tubulares.

1. Numerar os queimadores tubulares no sentido do fluxo de produto em cada tapete;
2. Desapertar e remover três queimadores tubulares do forno, seguindo a numeração do ponto anterior;
3. Limpeza do interior e das aberturas de gás dos queimadores tubulares com o ar comprimido (em proximidade);
4. Limpeza das aberturas de gás dos queimadores tubulares com o escovilhão de metal (em proximidade);
5. Repetir o passo 3;
6. Repetir os passos 3, 4 e 5 para os restantes queimadores tubulares, seguindo a numeração do ponto 1;
7. **Seguir o procedimento de limpeza interior do forno;**
8. Assegurar que o chão à volta do forno está limpo e a área desimpedida.

ANEXO D. FORMULÁRIO PARA REGISTO DAS TEMPERATURAS

Tabela D.1. Formulário para registo das temperaturas dos tapetes do forno de *tortilla chips*.

PERFIL DE TEMPERATURAS DO FORNO TC													
DATA:			HORA:				TURNO:						
Tapete	Esquerda			Centro			Direita			Variação			Temp. set point (°C)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$t_{\text{máx}}$ (°C)	$t_{\text{mín}}$ (°C)	Δt (°C)	
Superior													
Médio													
Inferior													
\bar{t} (°C)	TS												
	TM												
	TI												