



FEUP

Dimensionamento de um secador de milho com 60 t/dia de capacidade

António Miguel Monteiro dos Santos

Dissertação apresentada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica.

Orientador:

Carlos Manuel Coutinho Tavares de Pinho

Porto, Junho de 2011



Dimensionamento de um secador de milho com 60 t/dia de capacidade

António Miguel Monteiro dos Santos



Orientador:

Carlos Manuel Coutinho Tavares Pinho

Resumo

Tendo este trabalho como objectivo o dimensionamento de um secador de milho para 60 toneladas por dia, foi iniciado o estudo com alguma pesquisa sobre os secadores existentes.

Foi verificado que o leito em jorro, uma vertente do leito fluidizado, é um processo que através da inserção de ar numa câmara cilíndrica, possibilita a formação de um jorro no seio das partículas levando à sua agitação e mistura. As condições fluido dinâmicas existentes são adequadas à secagem de cereais.

Numa primeira parte foi efectuada uma introdução ao tema e, posteriormente é referida alguma base teórica necessária para a realização do trabalho de dimensionamento.

É depois elaborada uma modelação matemática onde é contabilizado o comportamento termodinâmico de todos os equipamentos constituintes do processo de secagem. Nesta parte é também determinada a curva de secagem, obtida a partir de dados experimentais, para ser posteriormente utilizada nos cálculos.

Seguidamente são dimensionados os principais constituintes do secador, é elaborada uma análise de diferentes condições de utilização do equipamento, sendo posteriormente realizada uma avaliação dos valores fornecidos pelo programa utilizado, simulando o comportamento do secador para diversas condições de operação.

Depois de uma análise económica simplificada do processo, o trabalho é concluído com alguns aspectos referentes ao estudo efectuado.

Podem ainda ser visualizados nas últimas páginas alguns anexos com informação e dados utilizados no decorrer da análise.

Abstract

Since this work aimed at the design of a 60 tons per day corn dryer, the study was started with some research on the existing dryers.

It was observed that a spouted bed, a particular type of the fluidized bed, is a process that, by inserting air into a cylindrical chamber, enables the formation of a gas jet flow within the particles leading to their stirring and mixing. Such fluid-dynamic conditions are adequate for drying grains.

In the first part of the present work an introduction has been made to the subject and subsequently some theoretical background was referred to carry out the dryer design.

It was then developed a mathematical model concerning the thermodynamic behavior of all the components of the drying system. In this part it was also determined a simple correlation covering experimental data from several drying tests. This correlation was then used in the calculations.

Following the sizing of the major components of the dryer, its behavior for different operational conditions was evaluated.

After a simple economic analysis of the process, the work is finalized with some conclusions obtained from the study and the results.

Attachments with information and data used during this study are shown at the end.

Prefácio

A produção de grãos de cereais tem sofrido, nos últimos anos, grandes pressões para o aumento de produtividade. Em função destas pressões, as práticas culturais, de manuseio e de secagem estão em acelerado processo de evolução.

Em geral, as técnicas usadas para secar sementes não diferem daquelas utilizadas para secar partículas de um modo geral. Há necessidade de preservar uma elevada percentagem de germinação e devem ser tomados cuidados especiais na selecção do secador, no controlo e na manutenção.

A utilização de modelos matemáticos para simular o processo de secagem em secadores que operam a alta temperatura tem-se tornado uma ferramenta importante para os engenheiros que trabalham na área de secagem e armazenamento de grãos.

Neste trabalho, a utilização do programa EES foi de extrema importância do ponto de vista de cálculo e fornecimento de resultados fundamentais para a elaboração do dimensionamento, assim como para uma posterior selecção de alguns componentes da instalação.

Agradecimentos

É com muita satisfação que expresso aqui o mais profundo agradecimento a todos aqueles que tornaram a realização desta dissertação possível.

Gostaria antes de mais de agradecer ao Professor Doutor Carlos Manuel Coutinho Tavares Pinho, orientador desta tese, pelo apoio, enorme incentivo e incansável disponibilidade demonstrada em todas as fases que levaram à concretização deste trabalho.

Gostaria ainda de agradecer ao Engenheiro Paulo Coelho pelos comentários, sugestões e incentivo aquando confrontado com dúvidas referentes ao programa utilizado.

A todos os professores da FEUP que directa e indirectamente participaram neste trabalho, particularmente o Professor Mário Guindeira e o Professor Armando Santos, entre outros.

A todos os colegas de trabalho que, mutuamente, se incentivaram para a resolução e conclusão das dissertações de cada um.

A toda a minha família e meus amigos pelo apoio, incentivo incondicional e pela motivação principalmente nos momentos mais exigentes.

Por último à Sílvia, a minha companheira de percurso vivencial, pelo inestimável apoio que me deu na construção do projecto, pela sua bondade e por tudo o que representa para mim.

A todos sinceramente,

Muito obrigado.

Índice

Capítulo 1.	Introdução	3
Capítulo 2.	Secagem	7
2.1	Necessidade de secagem	7
2.2	Definição do conceito	8
2.3	Humidade	9
2.4	A classificação de partículas segundo Geldart.....	11
2.5	Seleção do processo de secagem	13
2.5.1	Leito em jorro	15
2.6	Fonte de energia	17
2.7	Considerações gerais sobre o modelo matemático adoptado.....	17
2.8	Análise dimensional	19
2.9	Caracterização das partículas a secar de acordo com a classificação de Geldart.....	20
Capítulo 3.	Modelação matemática	23
3.1	Câmara de secagem.....	25
3.1.1	Comportamento termodinâmico	26
3.1.2	Equipamento	42
3.2	Permutador de calor	48
3.2.1	Desempenho do permutador	49
3.2.2	Equipamento	53
3.3	Ventilador.....	55
3.4	Queimador.....	60
Capítulo 4.	Avaliação final dos resultados	69
4.1	Propriedades do milho e do ar de secagem	69
4.1.1	Comentário	76
4.2	Potência de aquecimento.....	77

4.2.1	Comentário.....	78
4.3	Perdas de calor.....	79
Capítulo 5.	Funcionamento do secador sob diferentes condições de operação	85
5.1	Câmara de secagem	85
5.1.1	Variação da velocidade do ar de entrada	85
5.1.2	Variação do coeficiente de recirculação	89
5.1.3	Situações exemplo.....	92
5.2	Permutador	94
5.2.1	Variação da temperatura do ar quente.....	94
5.2.2	Variação da temperatura de entrada do ar frio	95
5.2.3	Variação do diâmetro interior	96
Capítulo 6.	Análise económica simplificada.....	99
6.1	Alternativa energética - Peletes	101
6.2	Avaliação financeira dos equipamentos	103
6.2.1	Secador de milho – Electricidade.....	106
6.2.2	Análise de custos – Gás Propano	107
6.2.3	Análise de custos – Peletes	108
6.2.4	Comentário.....	109
6.3	Financiamento a médio e longo prazo.....	111
Capítulo 7.	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....	117
Bibliografia		119
Anexos		123
Anexo A	– Folha exemplo do Excel.....	123
Anexo B	– Valores finais fornecidos pelo EES.....	123
Anexo C	-Ventilador Centrífugo – VCE – AERO Mack	124
Anexo D	- CUENOD Thermotechnique NC.6 GX	125
Anexo E	– Simulações – Gás propano e Electricidade	126
Anexo F	– Rotinas EES.....	128

Índice de Figuras

Figura 1:	Exemplo de milho consumível (esquerda) e milho contaminado (direita)	7
Figura 2:	Relação entre base húmida e base seca (Pacheco, 2001)	11
Figura 3:	Diagrama simplificado da classificação das partículas por Geldart (Nitz e Guardani, 2008)	12
Figura 4:	Leito fluidizado (Nagahashi <i>et al</i> , 2006)	15
Figura 5:	Leito em jorro (Nagahashi <i>et al</i> , 2006)	16
Figura 6:	Diferentes comportamentos do leito (Nitz e Guardani, 2008)	20
Figura 7:	Exemplo de metodologia de resolução (Eterno, 2006)	23
Figura 8:	Representação esquemática do equipamento de secagem a ser dimensionado	24
Figura 9:	Constituintes do equipamento de secagem – Câmara de secagem	25
Figura 10:	Curva de secagem para milho (César <i>et al</i> , 2001)	32
Figura 11:	Curvas de secagem para milho (Chinnabun <i>et al</i> ., 2004)	33
Figura 12:	Agrupamento dos dados de ambas as experiências	33
Figura 13:	Comparação das curvas calculadas (linhas) e experimentais (pontos)	40
Figura 14:	Exemplo de interface do EES – Câmara de secagem	43
Figura 15:	Janela de soluções fornecida pelo EES	44
Figura 16:	Constituintes do equipamento de secagem – Permutador de calor	48
Figura 17:	Exemplo da orientação tubular no permutador (Incropera, 2002)	49
Figura 18:	Pormenor do arranjo tubular e orientação do escoamento (EES)	51
Figura 19:	Comportamento da temperatura do ar de secagem à entrada do permutador de aquecimento depois da mistura com ar novo	52
Figura 20:	Factor de incrustações para diferentes fluidos (the-engineering-page.com)	52
Figura 21:	Exemplo de interface do EES - Permutador	53
Figura 22:	Janela de solução do EES	54
Figura 23:	Constituintes do equipamento de secagem – Ventilador de insuflação	55



Figura 24:	Orientação do escoamento do ar no equipamento.....	56
Figura 25:	Factor de fricção e de correcção para arranjo escalonado de tubos (Incropera <i>et al</i> , 2002)	58
Figura 26:	Exemplo do ventilador utilizado	59
Figura 27:	Constituintes do equipamento de secagem - queimador	60
Figura 28:	Temperaturas no interior do queimador.	61
Figura 29:	Exemplo de interface do EES – queimador.....	63
Figura 30:	Janela de soluções referentes ao queimador.....	64
Figura 31:	Ilustração do modelo de queimador utilizado (Catálogo Cuenod - NC.6 GX). 65	
Figura 32:	Curva de secagem para milho	70
Figura 33:	Valores exemplo do EES.....	70
Figura 34:	Variação da temperatura do grão com o tempo.....	71
Figura 35:	Variação da temperatura ar de entrada (a azul), e respectiva temperatura de saída (a vermelho).....	72
Figura 36:	Variação da temperatura do ar em diferentes etapas do processo	73
Figura 37:	Gráfico do comportamento da humidade do ar, humidade do ar de saída (azul) e humidade do ar de entrada (vermelho).....	74
Figura 38:	Exemplo da humidade num ponto aleatório – Diagrama psicrométrico (1-ar depois da mistura, 2-ar depois do permutador, 3-ar à saída da câmara)	75
Figura 39:	Comportamento da potência de aquecimento	77
Figura 40:	Transferência de calor no interior da câmara	79
Figura 41:	Evolução das perdas térmicas com a mudança da espessura de isolamento	80
Figura 42:	Evolução das perdas térmicas com a mudança da temperatura do ar de entrada	80
Figura 43:	Evolução das perdas térmica som a mudança da velocidade do ar entrada	81
Figura 44:	Evolução das perdas térmicas com a quantidade de carga utilizada	81
Figura 45:	Variação da humidade do grão para diferentes velocidades de ar de entrada ..	85
Figura 46:	Variação da humidade do ar para diferentes velocidades de ar	86

Figura 47:	Comportamento da temperatura do ar à saída.....	87
Figura 48:	Variação da humidade na mistura.....	87
Figura 49:	Comportamento da potência para diferentes recuperações de ar.....	89
Figura 50:	Evolução da humidade da mistura para diferentes recuperações.....	90
Figura 51:	Comportamento da entalpia em vários pontos do sistema.....	90
Figura 52:	Variação da temperatura do ar depois da mistura e da potência necessária, com a variação da percentagem de ar recuperado 600 segundos depois do início da secagem.	91
Figura 54:	Comportamento da humidade do grão para ambas as condições	93
Figura 55:	Variação da potência necessária em ambas as situações	93
Figura 56:	Variação do número de tubos com a temperatura do ar quente (entrada)	94
Figura 57:	Variação do número de tubos com a temperatura do ar frio (entrada)	95
Figura 58:	Variação do número de tubos com a mudança do seu diâmetro interior	96
Figura 59:	Comportamento da potência no processo de secagem.....	99
Figura 60:	Amostra exemplificativa de peletes (esquerda) e exemplo esquemático de um queimador de peletes (direita).	101
Figura 61:	Custo energético de várias soluções de aquecimento	102
Figura 62:	Custo por carga de 20 toneladas das três soluções de aquecimento consideradas no estudo	103
Figura 63:	Evolução anual dos “cash flows” actualizados para os diferentes equipamentos	110
Figura 64:	Exemplo da organização dos valores para a elaboração da curva de secagem.....	123
Figura 65:	Exemplo da organização dos valores no EES.....	123
Figura 66:	Exemplo construtivo do ventilador utilizado.....	124
Figura 67:	Dados técnicos dos ventiladores Siroco ELAM.	124
Figura 68:	Aspectos técnicos e construtivos do queimador utilizado.	125

Índice de Tabelas

Tabela I.	Condições experimentais – Temperaturas de ar diferentes	31
Tabela II.	Condições experimentais – Tipos diferentes de milho.....	32
Tabela III.	Resultado das diferentes correlações usadas para o cálculo da velocidade mínima de jorro.....	47
Tabela IV.	Condições de cálculo – Velocidade mínima de jorro.....	47
Tabela V.	Condições de operação no permutador	53
Tabela VI.	Condições de operação no queimador.....	63
Tabela VII.	Parâmetros do processo	69
Tabela VIII.	Condição dispendiosa.....	92
Tabela IX.	Condição económica	92
Tabela X.	Características das peletes de madeira	101
Tabela XI.	Cálculo do VAL- Electricidade	106
Tabela XII.	Cálculo do VAL- Gás propano.....	107
Tabela XIII.	Cálculo do VAL - Peletes.....	108
Tabela XIV.	Comparação percentual entre o melhor VAL e os restantes.....	109
Tabela XV.	Apresentação dos “cash flows” actualizados	111
Tabela XVI.	Simulação do financiamento.....	112
Tabela XVII.	Simulação do financiamento – Gás Propano.	126
Tabela XVIII.	Simulação do financiamento - Electricidade	127

Nomenclatura

Símbolo	Descrição	Unidades
$\dot{m}_a$	Caudal mássico de ar	Kg s^{-1}
h_p	Coeficiente de transferência de calor	$\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$
$m_{\text{grão}}$	Massa do grão de milho	kg
c_{milho}	Calor específico do milho	$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
cp_{ar}	Calor específico a pressão constante do ar	$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
cp_{vapor}	Calor específico a pressão constante do vapor	$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
D	Diâmetro da câmara	m
d_g	Diâmetro da partícula	m
d_i	Diâmetro inferior	m
e	Excesso de ar	-
g	Aceleração da gravidade	m s^{-1}
H	Altura do leito	m
h_{lv}	Calor latente de vaporização	J kg^{-1}
m_{comb}	Massa de combustível	kg
N_{MC}	Número de moles de Carbono	mol, kmol-
N_{MH}	Número de moles de Hidrogénio	mol, kmol-
Nu	Número de Nusselt	-
Pr	Número de Prandtl	-
Re	Número de Reynolds	-
t	Tempo	s
T_e	Temperatura de entrada	$^{\circ}\text{C}$
T_s	Temperatura de saída	$^{\circ}\text{C}$
U	Velocidade superficial	m s^{-1}

U_{mf}	Velocidade mínima de fluidização	m s^{-1}
U_{ms}	Velocidade mínima de jorro	m s^{-1}
X_c	Teor de humidade de equilíbrio do grão	-
X_i	Teor de humidade inicial do grão (base seca)	-
X_{ref}	Teor de humidade de referência	-

Letras Gregas

Letra	Descrição	Unidades
α_e	Coeficiente convecção exterior	$\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$
α_i	Coeficiente convecção interior	$\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$
ε_m	Porosidade para fluidização mínima	-
ρ_f	Massa volúmica do fluido	kg m^{-3}
ρ_p	Massa volúmica da partícula	kg m^{-3}
ΔP	Queda de pressão	Pa
Δt	Passo temporal	s
ϕ	Teor de humidade normalizado	-
ω_e	Humidade absoluta do ar de entrada da câmara	-
ω_s	Humidade absoluta do ar de saída da câmara	-
μ	Viscosidade do ar	$\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$

Abreviaturas

CFE	“Cash Flow” de exploração
CI	Custo de investimento
EES	Engineering Equation Solver
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
TAN	Taxa de Juro Anual Nominal
TAEG	Taxa Anual Efectiva Global
VAL	Valor Actual Líquido

Capítulo 1 - Introdução

A secagem está entre as operações mais usuais na indústria, em que numa boa parte das situações, é a última fase do produto antes da sua classificação e embalagem.

A qualidade do produto seco, a quantidade de energia gasta e o tempo utilizado neste processo são parâmetros primordiais para a rentabilidade do bem submetido a esta operação.

Capítulo 1. Introdução

Presentemente, dos variados processos necessários para o tratamento pós-colheita, conservação e armazenamento de cereais, a secagem é o procedimento de maior consumo energético, logo, existe a necessidade de um correcto faseamento e minuciosa atenção desta etapa, pois as partículas são extremamente sensíveis à acção do calor e devido à secagem artificial, por muito vantajosa que esta possa ser, qualquer descuido no controlo do processo poderá levar a danos químicos, físicos e biológicos que ponham em risco a própria saúde humana. Sendo assim, e segundo Osborne e Mendel (1917), existe a necessidade do processo de secagem de maneira a melhorar o valor nutricional e eliminar inibidores de tripsina, hemaglutininas, entre outros componentes, que provocam a inutilização dos alimentos.

Dos variados métodos de secagem existentes para cereais, todos têm em comum a função de retirar água ao grão sem o danificar ou pôr em causa as suas propriedades. Na secagem do milho em particular, será abordado neste trabalho o método por leito em jorro, sendo dos mais adequados e eficazes, apesar da sua desvantagem económica comparativamente a alguns processos que serão falados.

É também importante referir que o avanço tecnológico da cultura do milho, em relação a quase todas as outras, e as elevadas produtividades conseguidas, apontam para que esta venha a ocupar um papel central na produção de biocombustível e de plásticos biodegradáveis (Andrade, 2006).

Capítulo 2 - Secagem

O processo de secagem é uma técnica largamente utilizada na preservação de alimentos, e consiste numa operação de transferência simultânea de calor e de massa em que a humidade é removida do alimento e transportada pelo ar quente (Sogi *et al.*, 2002).

Capítulo 2. Secagem

2.1 Necessidade de secagem

Já desde os primórdios do homem que este se tem preocupado em racionalizar as fontes de alimentos, e para isso desenvolveu empiricamente métodos artesanais de conservação e de transformação de alimentos.

A remoção de água de alimentos sólidos surgiu como uma forma de reduzir a actividade da água para impossibilitar o crescimento microbiano, evitando assim a deterioração dos alimentos.



Figura 1: Exemplo de milho consumível (esquerda) e milho contaminado (direita)

Tendo então a secagem a finalidade da redução da humidade de um produto a um nível desejado (Sturumillo e Kudra, 1986), a tecnologia da conservação de alimentos consiste, actualmente, na aplicação de alguns princípios físicos ou químicos (uso de altas e baixas temperaturas, eliminação de água, adição de substâncias químicas, uso de certas radiações e filtração) e tem uma grande importância na indústria de alimentos. No entanto, tais métodos podem produzir mudanças estruturais nos produtos, logo um grande ênfase é atribuído aos novos tratamentos onde a qualidade e a capacidade de prolongar a vida do alimento será preservada.

2.2 Definição do conceito

A secagem é descrita geralmente pelo processo térmico de remoção de substâncias voláteis, através da transferência de massa, de maneira a remover a humidade de um material.

Quando o material húmido é sujeito a este decurso térmico, dois processos ocorrem simultaneamente:

- Transferência de energia, normalmente de calor, do ambiente circundante para o sólido húmido. Este processo ocorre devido aos processos de condução, convecção ou radiação, e em alguns casos à combinação dos três, em que a remoção dessa água na forma de vapor da superfície do material depende da sua envolvente, nomeadamente a humidade e velocidade do ar em contacto com a área da superfície;
- Transferência de humidade do centro para a superfície do sólido e, seguidamente, a sua evaporação devido ao processo anteriormente referido. Esta transferência é condicionada pela própria natureza física do sólido associado à temperatura e ao seu grau de humidade.

A secagem resulta da evaporação de água devido à aplicação de calor, e essa transferência de calor da envolvente para o sólido resulta dos três mecanismos de transferência de calor conhecidos e já referidos, ou seja, condução, convecção e radiação.

Nos processos de secagem e armazenamento de partículas agrícolas, a transferência de calor geralmente ocorre em leitos de produto, compostos de partículas, e no interior do qual escoa uma corrente de ar. O conhecimento dos valores das propriedades térmicas desses leitos porosos é essencial para o estudo da distribuição de temperatura no interior da massa de grãos (Rossi *et al.*, 1982). As propriedades térmicas mais relevantes, neste caso, são a condutibilidade térmica, difusividade térmica e o calor específico do produto (Rossi e Roa, 1980).

A convecção é a transferência de calor que está associada ao movimento relativo de uma ou mais correntes de fluidos e às diferenças de temperatura que existem entre estas, ou entre estas e corpos sólidos que lhes servem de fronteira. A convecção pode ser organizada em dois tipos, convecção natural ou forçada, dependendo do que está na origem do escoamento. Na convecção natural o movimento do ar é provocado pela força gravítica, em que, devido à densidade, o ar mais quente ascende e o ar mais frio desce. Já na convecção forçada o movimento do ar acontece devido à influência de elementos exteriores, como por exemplo um ventilador.

A convecção pode ainda ser considerada interna, no caso de ocorrer no interior de um tubo por exemplo, ou externa no caso de ocorrer sobre uma superfície.

A radiação por infravermelhos é usada frequentemente em secagem de revestimentos, folhas de reduzida espessura e filmes (entre 4 e 8 mm). Sendo o investimento, assim como os custos de funcionamento relativamente elevados, esta técnica é útil para secagem de produtos de alto valor unitário ou para a correcção final do perfil de humidade em que apenas pequenas quantidades de água do objecto são retiradas. Uma solução para tornar este método mais viável comercialmente é a combinação de processos de secagem, por exemplo com infravermelhos e jactos de ar ou então utilizando microondas e aparelhos vibratórios (Santos, 2009).

2.3 Humidade

A percentagem de humidade existente num alimento relaciona-se com a quantidade de água nele existente, e é possível determinar a quantidade de água removida ou adicionada se existir o conhecimento da sua humidade inicial e final, após a modificação do seu estado.

A variação do teor de humidade de um corpo ou sólido corresponde à perda de peso sofrida pelo alimento quando aquecido em condições nas quais a água é removida.

Quando um valor para a humidade de um sólido é determinado, é importante ter o conhecimento se este se refere à base seca ou húmida, pois o desleixo deste facto pode levar à recepção de um produto ou matéria-prima com mais água do que suposto, assim como a erros de cálculo de alguma gravidade.

É definida humidade de um sólido na base seca (X_d) como o quociente entre a massa de água (M_a) e a massa do sólido isenta desta humidade (M_d):

$$X_d = \frac{M_a}{M_d} \quad \text{EQ 2.1}$$

W_d pode ser expresso por exemplo em kg de água por kg de sólido seco.

Quanto à humidade de um sólido na base húmida (X_w), esta é referida como o quociente entre a massa de água (M_a) e a massa do sólido húmido ($M_d + M_a$):

$$X_w = \frac{M_a}{M_d + M_a} \quad \text{EQ 2.2}$$

W_w pode ser expresso em kg de água por kg de sólido húmido.

A transformação da humidade de uma base para outra pode ser obtida pelas seguintes expressões ou pela consulta menos minuciosa da figura 2.

$$X_w = \frac{X_d}{1 + \frac{X_d}{1}} \quad \text{EQ 2.3}$$

$$X_d = \frac{X_w}{1 - \frac{X_w}{1}} \quad \text{EQ 2.4}$$

É de referir que nas equações 2.3 e 2.4 se pressupõem que se trabalha em fracção, pois se for em percentagem o valor de 1 é substituído por 100.

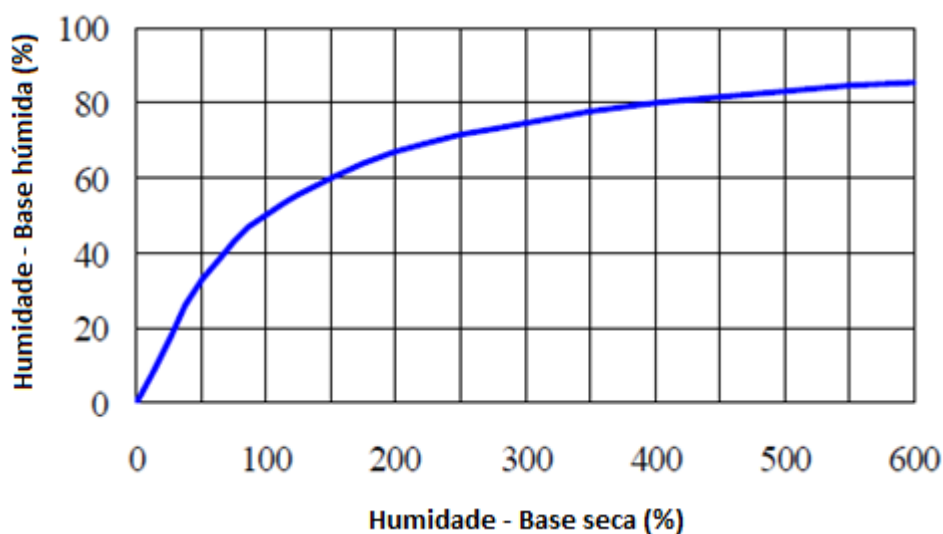


Figura 2: Relação entre base húmida e base seca (Pacheco, 2001)

De uma maneira expedita, depois da consulta da figura 2 é possível perceber que para um dado valor de humidade na base seca, a sua conversão para base húmida irá diminuir consideravelmente o seu valor, e por isso, como foi dito anteriormente, este aspecto deve ser nota de atenção quando a sua consulta.

2.4 A classificação de partículas segundo Geldart

Experiências realizadas em leitos fluidizados utilizando partículas de diferentes tamanhos, possibilitou perceber que um conjunto de partículas de maior tamanho fluidizou mais satisfatoriamente do que um conjunto de grãos mais pequenos. É compreendido então que nem todas as partículas, quando sujeitas à fluidização gasosa, se comportam da mesma maneira, ou seja, conclusões extraídas de dados obtidos na fluidização de determinado material não podem, em princípio, ser extrapoladas para outro.

Vários cientistas formularam critérios de maneira a prever o comportamento da fluidização, mas foi Geldart (1973), que sistematizou esta matéria e referiu que os leitos fluidizados são particulares, na medida em que um incremento da velocidade superficial aumenta a possibilidade do maior afastamento dos grãos, de uma maneira mais ou menos uniforme, até que estes saiam da zona tubular (zona central da câmara onde ocorre o maior caudal de ar, figura 5, terceira representação)

De maneira a estabelecer a que grupos pertencem as partículas utilizadas, várias experiências foram efectuadas para perceber o comportamento esperado na utilização de determinado tamanho de grão, o que originou diversos critérios numéricos de maneira a proceder à discriminação qualitativa entre os vários grupos devido ao comportamento da sua fluidização, figura 3.

Não havendo a necessidade neste trabalho de aprofundar esta metodologia classificativa, é no entanto conveniente conhecer os vários grupos e as suas características particulares:

Grupo A – Partículas que quando fluidizadas por ar nas condições ambiente, oferecem uma região de início de fluidização não borbulhante começando a U_{mf} , seguida posteriormente por fluidização borbulhante após algum aumento da velocidade de fluidização;

Grupo B – Partículas que apenas fornecem fluidização borbulhante imediatamente a seguir à U_{mf} ;

Grupo C – Partículas com tamanho de grão muito reduzido que produzem uma fluidização não uniforme (aparecimento de canais que prejudicam os processos de transferência de calor e massa);

Grupo D – Partículas de elevado tamanho que são distinguidas devido à sua habilidade de produzir elevados jorros de fluidização.

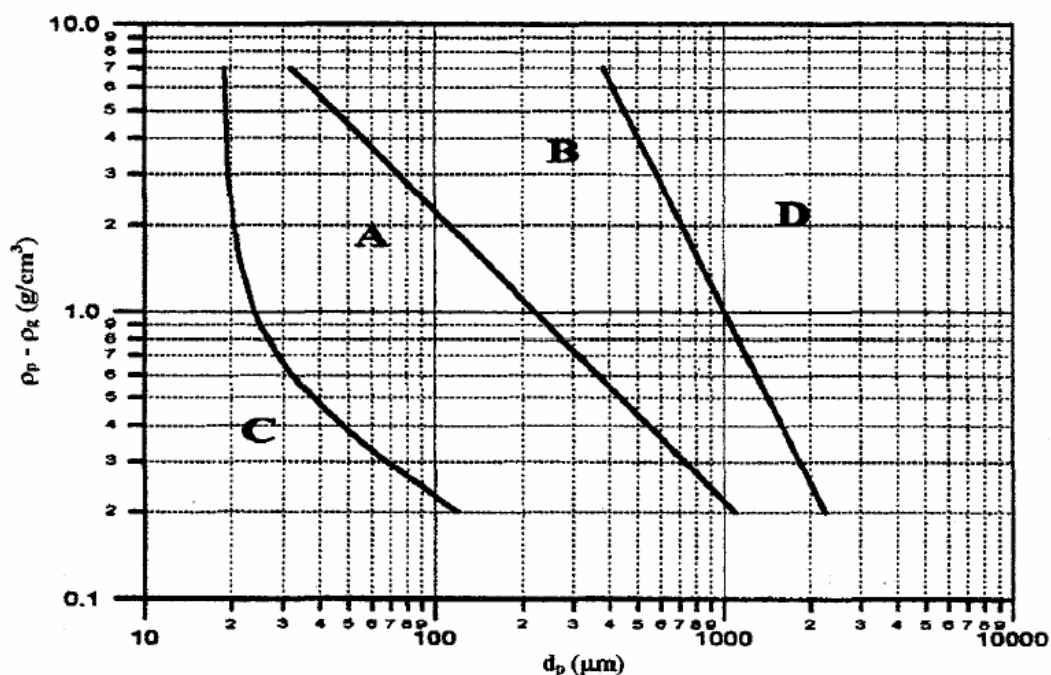


Figura 3: Diagrama simplificado da classificação das partículas por Geldart (Nitz e Guardani, 2008)

2.5 Selecção do processo de secagem

Entre os processos disponíveis para a secagem de grãos, mais propriamente de milho, alguns são mais utilizados do que outros, dependendo dos objectivos finais do agricultor.

Os sistemas de secagem estão divididos em dois grandes grupos, secagem natural ou artificial. A natural neste caso está fora de questão pois, naturalmente, o milho, mesmo em condições médias de temperatura de 20 °C e de humidade relativa de cerca de 50 % (média entre 1945 e 2005, (Miranda *et al*, 2005)), até atingir a humidade desejada de aproximadamente 14,5 % b.s. (Eckhoff *et al*, 1997) demora entre 50 a 60 dias, o que não é viável de acordo com o objectivo proposto.

Dentro da secagem artificial existe a secagem por ventilação ou convecção natural e por ventilação forçada.

A secagem por ventilação natural pode ser efectuada em terreiros, a secagem solar, onde o investimento inicial é muito reduzido mas é desde já excluída devido ao tempo de secagem ser também extenso e directamente relacionado com as condições meteorológicas.

A secagem por convecção natural usando outra fonte de energia térmica que não o sol (por exemplo em estufas) é por vezes utilizada e agradável atendendo à simplicidade de construção e facilidade de operação (Prado, 2004), mas trata-se de uma operação onde longos tempos de secagem são normalmente necessários devido às baixas taxas de transferência de calor e de massa, o que não é totalmente viável devido ao exigente mercado actual e ao objectivo inicial deste trabalho.

É importante referir que em ambos os métodos mencionados, como além de dependerem das condições naturais do ar, são muito morosos, e a possibilidade de o milho se deteriorar devido ao longo tempo de secagem é extremamente alta.

Relativamente à secagem por ventilação forçada, esta pode ser dividida em altas e baixas temperaturas.

A secagem a baixa temperatura é normalmente realizada em silos, sendo utilizada para secagem de sementes com temperaturas do ar de 40 °C (secagem com ar aquecido). Este método é recomendado para pequenas e médias propriedades agrícolas, mas o tempo de secagem de cerca de 84 horas é também relativamente elevado para a utilização necessária e, por isso, fica excluído.

As altas temperaturas utilizadas na secagem tornam o processo mais rápido e independente das condições climáticas, sendo que o ar de secagem tem o seu potencial aumentado na medida em que se eleva a sua temperatura.

É também possível classificar a secagem quanto à operação e ao tipo de escoamento do ar de secagem. A operação da secagem pode ser intermitente ou contínua, e esta última será a utilizada, devido mais uma vez ao requisito de partida que pressupõe uma capacidade de secagem de 60 toneladas de milho por dia.

Quanto ao tipo de escoamento relativo gás-sólido, existem diversas técnicas, tais como por coluna, leito fixo, contra-corrente, equi-corrente ou co-corrente, cascata, rotativo, entre outras, sendo que as que possibilitam uma secagem mais rápida são por leito fluidizado e por mesa vibratória (Park *et al*, 2007).

A mesa vibratória aliada ao aquecimento por infravermelhos (IR) envolve a exposição dos grãos a uma gama de radiação electromagnética com comprimentos de onda no intervalo de 0,8-100 μm . Este método é fundamentalmente diferente da secagem por convecção pois o material é seco directamente pela absorção da energia, ao contrário da transferência de calor do ar (Bal *et al.*, 1970). A radiação tem vantagens significativas sobre os métodos convencionais, como a simplicidade dos equipamentos, rápida resposta em regime transitório e economia de energia significativa (Sandu, 1986), e devido a uma agitação externa dada pela mesa vibratória, a secagem é uniformizada de maneira a que todo o material esteja em contacto com a radiação emitida.

Foi encontrada informação de experiências em que, embora este método forneça um meio rápido de aquecimento e secagem, só é interessante para aplicações de aquecimento de superfícies, pois como a energia infravermelha é absorvida pela camada exterior, apenas permite uma camada superficial de secagem (Laohavanich e Wongpichet, 2007), o que no caso do milho não é viável.

O leito fluidizado, mais particularmente o leito em jorro, devido ao seu potencial de diversificação, tem sido utilizado em diversos processos, nomeadamente na secagem de cereais, pois o sistema de secagem de leito em jorro é mais eficientemente aplicável a grãos (Massarani *et al*, 1999). Este consiste fundamentalmente num processo onde há a introdução de um jacto de ar ou gás no interior de um cilindro, que contém um leito de partículas, por um orifício, o qual é menor relativamente ao diâmetro do cilindro, criando assim um canal

afunilado inicial, de maneira a garantir a impossibilidade de deposição dos grãos e assim existir uma movimentação contínua do grão com reduzida perda de carga.

2.5.1 *Leito em jorro*

A utilização da técnica de fluidização foi difundida em 1940, mas foi em 1955, que devido à necessidade da secagem de partículas de maior diâmetro, o leito em jorro (figura 5) foi referenciado por Mathur e Epstein (1955) especificamente para a secagem de trigo, sendo que nos dias de hoje apresenta um papel importante nas operações que envolvem secagem de sólidos granulados, como milho, fertilizantes e químicos farmacêuticos.

Este é um método de secagem de partículas semelhante ao leito fluidizado, diferindo no sentido em que o gás é alimentado através da região central utilizando um funil, ao contrário de um distribuidor poroso ou perfurado como acontece no leito fluidizado (figura 4).

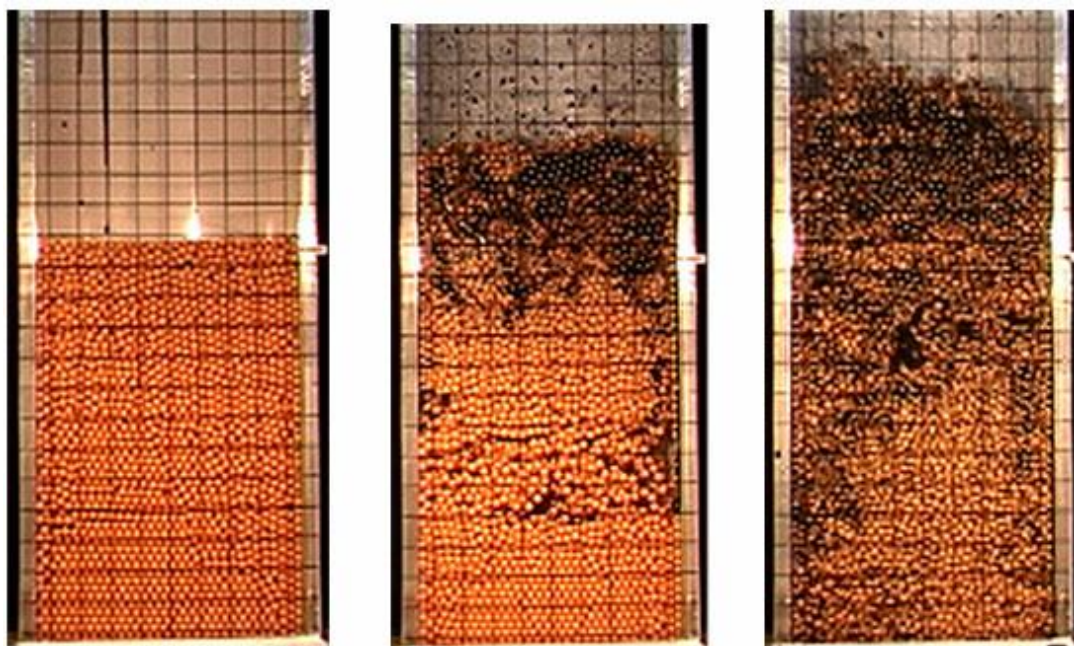


Figura 4: Leito fluidizado (Nagahashi *et al*, 2006)

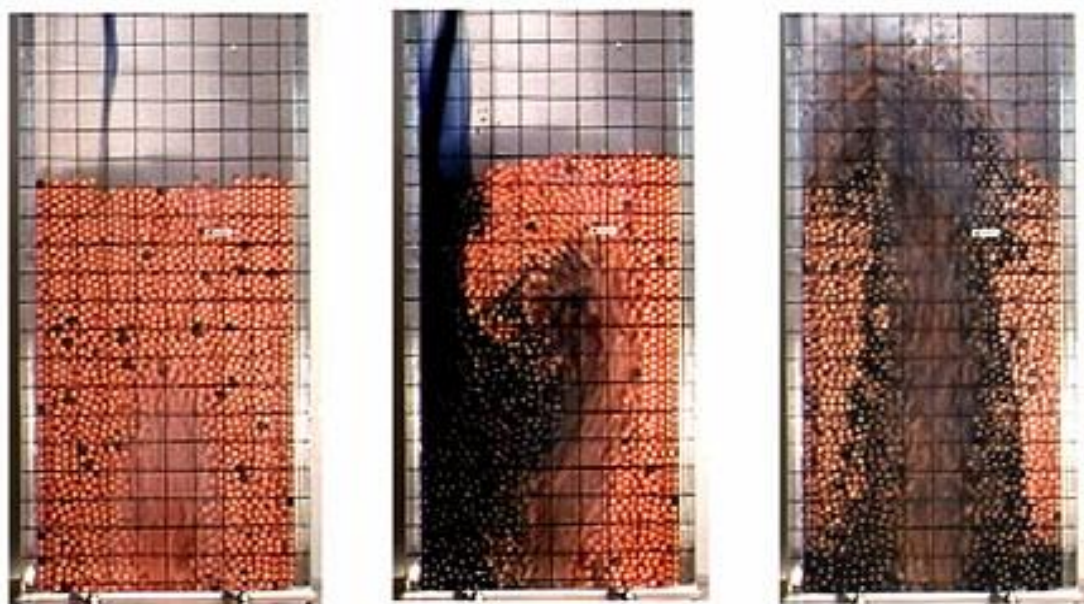


Figura 5: Leito em jorro (Nagahashi *et al*, 2006)

A introdução do gás no leito de partículas, que é feita por um orifício provoca a formação de um canal o que irá proporcionar três regiões distintas:

- Região central, onde ocorre o transporte pneumático das partículas devido à enorme velocidade do gás;
- Região do jorro, zona parecida com o repuxo de uma fonte e composta pelos grãos vindos da região central, os quais atingem a sua velocidade terminal e caem na zona circular;
- Região anelar, onde os grãos descem da região do jorro e voltam até à parte inferior do cilindro, onde vão voltar a entrar na zona central.

Este processo é então um ciclo, fazendo com que os grãos criem um leito deslizante e uma forte agitação das partículas, que aliado ao baixo custo inicial e operacional fazem desta técnica uma das mais interessantes na operação de secagem por meios mecânicos, apesar de algumas limitações técnicas terem sido observadas restringindo o seu uso a nível industrial (Conceição, 1997), nomeadamente em leitos de grande capacidade, onde há a dificuldade de manter um regime estável.

2.6 Fonte de energia

No dimensionamento deste secador de milho, além de se considerar o dimensionamento do equipamento de secagem propriamente dito, será também seleccionada a fonte de energia a utilizar e a possibilidade de se recorrer a uma fonte renovável para se aferir da possibilidade de o utilizador do equipamento ter uma máquina totalmente ou em grande parte autónoma em termos energéticos, pois tanto pelo aspecto económico como pela vertente ambiental é cada vez mais importante reflectir num método alternativo e sustentável que permita fornecer potência eléctrica e térmica ao equipamento utilizado no quotidiano profissional.

A energia através de gás do petróleo liquefeito é também uma possibilidade em que para sistemas mais potentes, como é o caso do secador de milho considerado, usa-se preferencialmente o propano, sendo o gás butano utilizado para potências mais pequenas (utilizações domésticas).

Apesar de ser uma tecnologia relativamente recente, será também alvo de estudo a utilização de peletes de madeira, que possuindo como produto base a madeira, foi criado para competir com os combustíveis fósseis em termos de conveniência, desempenho e preço.

Sendo assim, é viável obter potência eléctrica e também térmica para o equipamento através de energia eléctrica, gás e peletes.

2.7 Considerações gerais sobre o modelo matemático adoptado

Relativamente ao equipamento de secagem e ao seu modelo matemático, é perceptível que depois de todas as equações termodinâmicas serem devidamente trabalhadas, é necessário conhecer-se a evolução da humidade das partículas a secar ao longo do tempo, e isto pode ser feito de dois modos, ou através de um balanço de transferência térmica e de transferência de massa usando princípios básicos, recorrendo-se por isso às equações da transferência de calor e de massa, ou através de uma aproximação mais simplista. Neste último caso, que foi o adoptado no presente trabalho, obtém-se a partir da análise de resultados experimentais, uma correlação que fornece, em função do tempo e das condições operatórias, a evolução da humidade das partículas (grãos) de milho. A explicação da obtenção dessa equação que

combina números adimensionais que caracterizam os diversos aspectos do processo de secagem é apresentada no Capítulo 3. No modelo matemático adoptado para o cálculo do secador, serão notórias as suas implicações na necessidade de se fazer um tratamento de dados experimentais via análise simplista recorrendo a números adimensionais.

Na próxima secção faz-se por isso uma breve referência à análise dimensional, a qual será utilizada posteriormente no Capítulo 3, para a análise de resultados experimentais que servirão de suporte no processo de dimensionamento do secador.

2.8 Análise dimensional

Em geral, a solução de problemas reais envolve uma combinação de análise e informação experimental, contudo, o trabalho experimental de laboratório é dispendioso, e por isso, um importante objectivo é obter o máximo de informações com o mínimo de experiências.

Embora a análise dimensional seja incapaz, por si só, de descobrir a formulação completa de uma lei física, esta fornece orientações para combinações dos parâmetros envolvidos a utilizar, e assim reduzir o número total de variáveis a incluir nas equações, sendo assim um valioso guia para a elaboração de teorias que se proponham a interpretar resultados experimentais.

Além de incluir obrigatoriamente todos os parâmetros que possam ter influência no problema a estudar, exigindo assim uma cuidadosa investigação qualitativa baseada em observações e pesquisas experimentais, esta análise incorpora as leis físicas em que se baseiam as fórmulas dimensionais das constantes físicas universais ou específicas que figuram entre esses parâmetros.

Uma das principais aplicações da análise dimensional é o estabelecimento das condições de semelhança física, que relacionam os protótipos com os modelos das experiências, e para que um modelo possa representar um protótipo, ou seja, para que os resultados obtidos nos ensaios possam ser estendidos aos protótipos, é preciso que haja semelhança, a começar pela semelhança geométrica. Em princípio, todos os números Π^1 , factores de forma e funções, devem ter no modelo o mesmo valor que apresentam no protótipo. Em alguns casos introduzem-se distorções, isto é, adoptam-se no modelo escalas diferentes para grandezas de um mesmo tipo, mas este acto deve ser cuidadosamente analisado para evitar erros na interpretação dos resultados.

¹ Símbolo referido pelo físico Edgar Buckingham em 1914 para a caracterização dos seus grupos adimensionais, caracterizado por Pi de Buckingham.

2.9 Caracterização das partículas a secar de acordo com a classificação de Geldart

Geldart (1973) definiu a importância do tamanho das partículas num leito fluidizado, criando quatro grupos referentes ao diferente tamanho das partículas utilizadas na fluidização.

Sendo assim e com base experimental, Geldart (1973) desenvolveu e propôs um critério arbitrário para a diferenciação entre os grupos B e D definido pela expressão

$$(\rho_p - \rho_f) D_p^{1,24} > 0,23 \text{ (Grupo D)} \quad \text{EQ 2.5}$$

Sendo:

$$\rho_p \approx 1200 \text{ kg/ m}^3 \text{ (Chang, 1988)}$$

$$D_p = d_{equi.} \approx 4 \text{ mm}$$

$$\rho_f = 1,204 \text{ kg/ m}^3 \text{ (} T = 20 \text{ }^\circ\text{C, } P = 1 \text{ atm)}$$

Para diferenciação entre os grupos:

$$(1200 - 1,206) \times 0,004^{1,24} = 1,2 \quad \text{EQ 2.6}$$

Então as partículas de milho serão do grupo D e será esperado que ligeiramente acima da velocidade mínima de fluidização bolhas de ar se formem, comportamento semelhante ao de grãos de areia. Esse comportamento pode ser verificado na figura 6, na condição de fluidização com bolhas tubulares (*Slugs*).

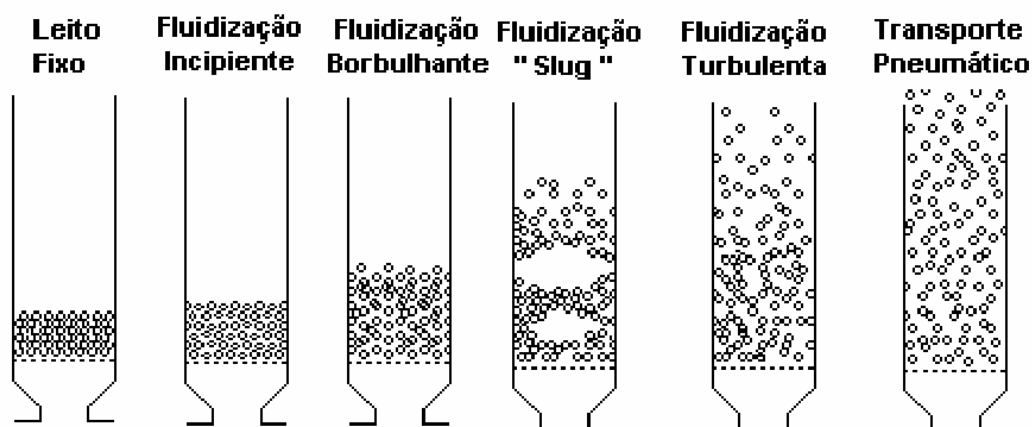


Figura 6: Diferentes comportamentos do leito (Nitz e Guardani, 2008)

Capítulo 3 - Modelação Matemática

Segundo Edwards e Hamson (1990) um modelo matemático é o produto da transferência de um conjunto de elementos matemáticos (como sejam, funções ou equações), com vista à obtenção de uma representação matemática de uma parcela do mundo real.

Capítulo 3. Modelação matemática

Devido à evolução atingida, é hoje possível o processamento computadorizado com um relativo baixo custo, permitindo assim o desenvolvimento de modelos matemáticos complexos, os quais podem ser utilizados para analisar configurações reais de secagem encontradas na indústria. A utilização destes modelos no sector industrial é cada vez mais predominante, o que demonstra que a barreira académica/industrial está a diminuir substancialmente. De facto, actualmente é comum a assistência financeira industrial para suportar a pesquisa e o desenvolvimento de novos modelos de transferência de calor e massa.

Este tipo de modelação não só permite a poupança monetária e repetitiva de experiências, mas também e não menos importante, pode ser usada para elucidar a física subjacente associada ao transporte de calor e massa nos meios porosos durante o processo de secagem. Os resultados das simulações podem inevitavelmente ajudar a orientar e conduzir estudos com a proposta de novas experiências para permitir a concepção e ensaio de novos métodos de secagem (Eterno, 2006).

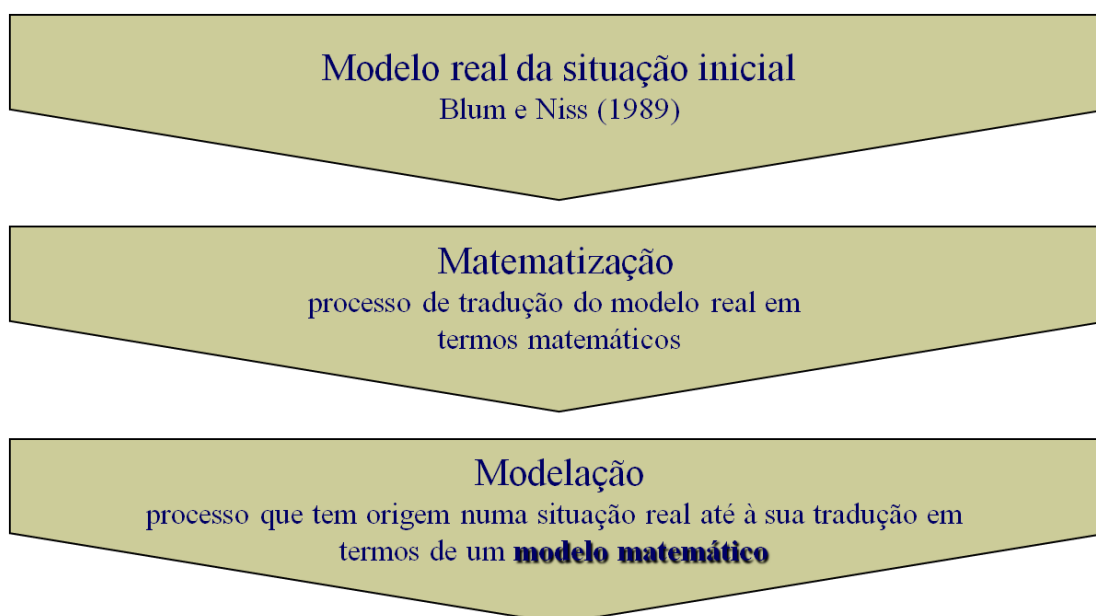


Figura 7: Exemplo de metodologia de resolução (Eterno, 2006)

Uma das situações mais comuns nas propriedades rurais, que efectuam a secagem de alguns dos seus produtos agrícolas, é a falta de equilíbrio ou sintonia entre o tamanho dos equipamentos e a sua disponibilidade para o processo. Sendo assim, o correcto dimensionamento dos constituintes é crucial para o reduzido investimento necessário, tanto na aquisição como na manutenção do equipamento.

Diversa informação existente em catálogos de fabricantes destes sistemas referem alguns dos componentes necessários para o correcto funcionamento. Na figura 8 faz-se uma representação esquemática do equipamento de secagem a ser dimensionado. Neste trabalho apenas serão considerados os principais intervenientes, deixando de parte componentes como grelhas, peças de acoplamentos, e mesmo as tubagens utilizadas.

Sendo assim, serão objecto de estudo a própria câmara de secagem, o ventilador de insuflação de ar, o permutador de calor e como fonte de calor será efectuado o estudo com um queimador a gás propano (sendo posteriormente consideradas outras alternativas).

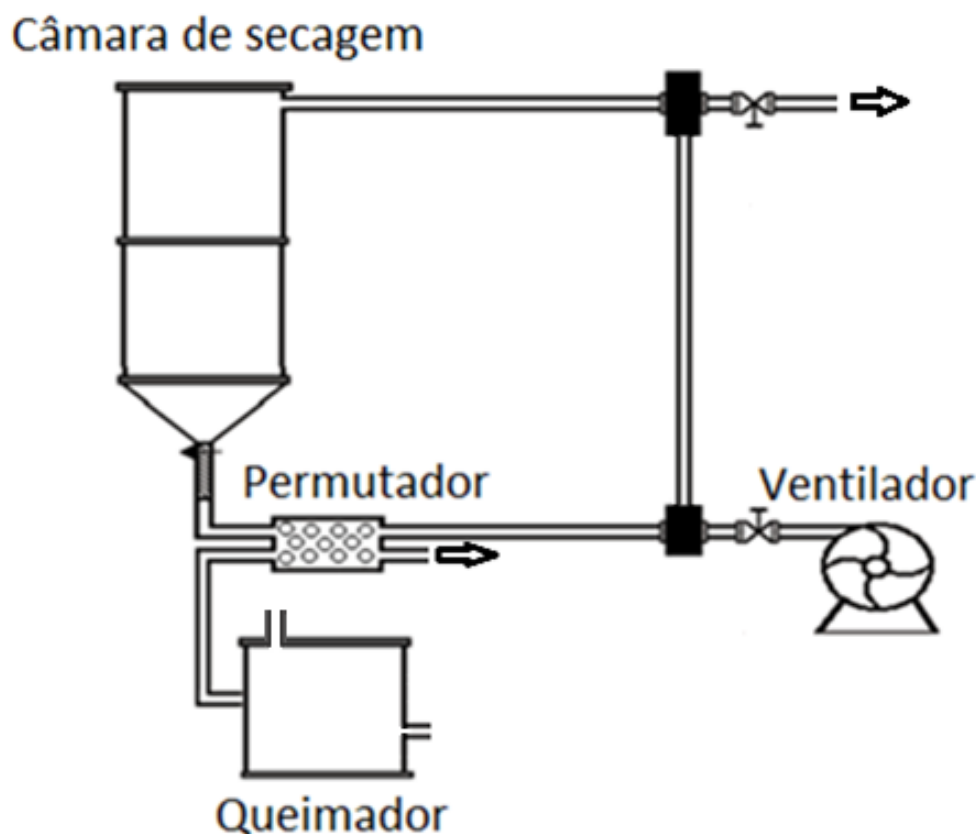


Figura 8: Representação esquemática do equipamento de secagem a ser dimensionado

3.1 Câmara de secagem

Este é o componente principal do processo pois é onde a secagem se efectua devido à introdução de ar quente, neste caso a 50 °C (temperatura média nas experiências realizadas). Este caudal de ar vai passar pelo leito de maneira a que, por convecção forçada, aqueça cada grão, e este perca a água que antes residia no seu interior e que agora será transferida para o ar que posteriormente sairá da câmara.

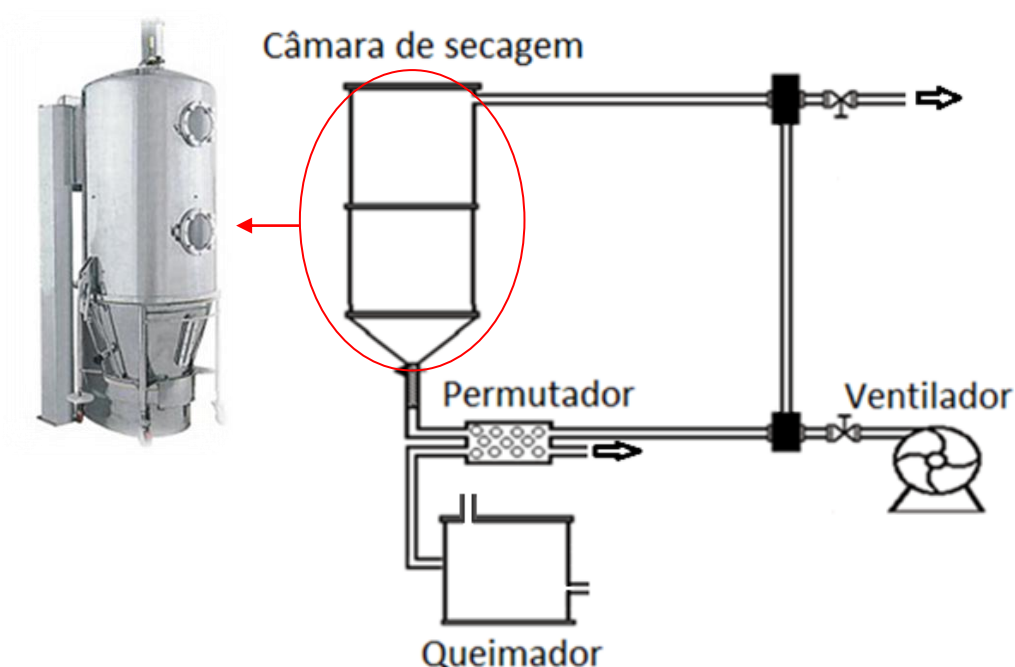


Figura 9: Constituintes do equipamento de secagem – Câmara de secagem

Numa primeira aproximação, considerando um tempo médio de 15 minutos para a colocação do milho no equipamento e também 15 minutos para a sua extracção, num dia com 8 horas de trabalho, são necessárias 3 cargas de 20 toneladas com o tempo máximo possível de secagem de 2 horas e 10 minutos, de maneira a perfazer um total máximo de 8 horas de laboração.

O desenrolar deste processo permite que ao longo do tempo o grão fique cada vez mais seco e assim cumprir o objectivo, mas vários processos tomam lugar neste componente pois é sabido que a energia térmica existente no caudal de ar de entrada não é toda transferida para o leito de grãos a secar, mas também para as paredes da câmara (perdas térmicas), sendo o restante enviado para o exterior do secador na corrente de ar de saída. Sendo assim, é necessário contabilizar estes aspectos, pois evoluindo o processo de secagem de uma carga de grãos

segundo um regime uniforme, trata-se de um processo em estado não permanente, sendo como tal importante conhecer-se o comportamento do secador para cada instante do processo.

3.1.1 Comportamento termodinâmico

Sabendo inicialmente que a quantidade total de energia deste sistema não permanece constante (possivelmente subirá pois o grão está a ser aquecido) e que a energia consumida para a secagem do grão virá da corrente de ar de aquecimento, então, a 1ª Lei da Termodinâmica aplicada a regimes uniformes, reflecte o comportamento encontrado neste processo ao longo do tempo de t a $t' = t + dt$.

Fazendo-se um balanço energético ao secador que funciona em regime uniforme, pois considera a variação no tempo das variáveis que retratam o processo, resulta:

$${}_tQ_{t'} + {}_tW_{t'} = m_{t'}u_{t'} - m_t u_t + \sum m_{sai}h_{sai} - \sum m_{ent}h_{ent} \quad \text{EQ 3.1}$$

Em que:

h_{ent} – Entalpia específica do fluido na entrada da câmara;

h_{sai} – Entalpia específica do fluido na saída da câmara;

m_t – Massa contida no volume de controlo no instante t ;

u_t – Energia interna específica referente ao volume de controlo no instante t ;

$m_{t'}$ - Massa contida no volume de controlo no instante t' ;

$u_{t'}$ - Energia interna específica referente ao volume de controlo no instante t' ;

m_{sai} - Massa no volume de controlo à saída;

m_{ent} - Massa no volume de controlo à entrada;

${}_tQ_{t'}$ -Calor nos instantes t e t' ;

${}_tW_{t'}$ -Calor nos instantes t e t' .

Logo, para um processo onde não há fornecimento de trabalho:

$$Q_{perdas} = m_{gr\tilde{a}o} c_{milho} (T_{t'} - T_t) + m_{gr\tilde{a}o} c_{wl} (X_{t'} T_{t'} - X_t T_t) + \dot{m}_{as} \Delta t [(cp_{ar} (T_{t'}^s - T_e) + cp_v (\omega_{t'}^s T_{t'}^s - \omega_e T_e) + h_{lv} (\omega_{t'}^s - \omega_e))] \quad \text{EQ 3.2}$$

Em que:

$m_{gr\tilde{a}o}$ – Massa do grão de milho;

c_{milho} – Calor específico do milho;

c_{wl} – Calor específico da água;

X_t – Humidade do grão no instante t ;

$X_{t'}$ – Humidade do grão no instante t' ;

T_t – Temperatura do grão no instante t ;

$T_{t'}$ – Temperatura do grão no instante t' ;

$\dot{m}_{as}$ – Caudal mássico de ar seco;

Δt – Passo temporal de integração;

cp_{ar} – Calor específico do ar a pressão constante;

T_e – Temperatura do ar de entrada;

$T_{t'}^s$ – Temperatura do ar de saída no instante t' ;

cp_{vapor} – Calor específico do vapor de água a pressão constante;

$\omega_{t'}^s$ – Humidade absoluta do ar à saída no instante t' ;

ω_e – Humidade absoluta do ar à entrada na câmara;

h_{lv} – Calor latente de vaporização da água.

Relativamente ao balanço de massa efectuado à câmara, e considerando os dois instantes de tempo inicial e final t e t' :

$$m_{t'}^{gw} - m_t^{gw} = \dot{m}_{we} \Delta t - \dot{m}_{ws} \Delta t \quad \text{EQ 3.3}$$

$$m_{t'}^{gw} - m_t^{gw} = \dot{m}_a \Delta t (\omega_e - \omega_s) \quad \text{EQ 3.4}$$

E sendo:

$$m_t^{gw} = m_g X_t \quad \text{EQ 3.5}$$

$$m_{t'}^{gw} = m_g X_{t'} \quad \text{EQ 3.6}$$

Resulta:

$$\dot{m}_a \Delta t (\omega_s - \omega_e) = m_g (X_{t'} - X_t) \quad \text{EQ 3.7}$$

Sabendo que os parâmetros X_t e $X_{t'}$, correspondem respectivamente à humidade, na base seca, do grão de milho, no instante t e no instante seguinte t' , é entendido então que, sendo um processo de secagem, é retirada água ao grão de milho, a qual passará para o ar, ou seja, $\omega_s > \omega_e$, e $\frac{dx}{dt} < 0$. Este último parâmetro é obtido através da análise de dados experimentais como será explicado mais à frente neste trabalho (Ponto 4.1.1 – Curva de secagem).

São conhecidas neste momento duas equações para a resolução do problema, e analisando as mesmas, é possível estudar as incógnitas estabelecidas:

- m_g , é igual ao produto do volume de um grão de milho pela sua massa volúmica e pela carga a aplicar. O único parâmetro que pode causar dúvida é a carga necessária, mas como já foi referido, cada carga será de 20 toneladas de maneira a atingir o objectivo proposto;
- c_{milho} , cp_{ar} e cp_v são respectivamente o calor específico do milho (grão seco), o calor específico a pressão constante do ar e do vapor. São valores conhecidos e encontrados facilmente na literatura técnica;
- $\dot{m}_{as}$, é o caudal de ar seco que passa pela secção de entrada, a qual será inicialmente arbitrada para se arrancar com o processo de cálculo. É importante referir que este parâmetro será posteriormente dimensionado de maneira a encontrar a melhor solução para os requisitos impostos;
- h_{lv} , é a entalpia latente de vaporização da água, sendo também conhecido o seu valor;
- $X_{t'}$, X_t , em que para $t = 0$; $X_t = X_i$, logo X_i e X_e , correspondem respectivamente, à fracção mássica média inicial de humidade nas partículas e à fracção mássica de água correspondente à humidade de equilíbrio ou de referência do milho. No caso presente

como não se encontraram na literatura valores da humidade de equilíbrio para o milho, foi usado como valor de referência o valor de 10 % (valor inferior ao valor mínimo de humidade registado nas experiências).

Mas como é perceptível nas equações anteriores, existem parâmetros que derivam no tempo e por isso não são tão imediatos, como a própria temperatura do grão, que teoricamente deverá subir, e as condições do ar de saída, temperatura e humidade (T_s e ω_s), resultando em três variáveis desconhecidas.

Então, é necessária mais uma equação, a qual é possível obter através do balanço energético associado à transferência de calor entre o ar de passagem e os grãos de milho, onde:

$$\begin{aligned} &(\text{Energia associada ao ar de saída}) - (\text{Energia associada ao ar de entrada}) \\ &= (\text{Energia transferida ao leito}) \end{aligned}$$

Então:

$$\dot{m}_a \Delta t (c_{p_{ar}} T_{t'}^s + \omega_{t'}^s (c_{p_v} T_{t'}^s + h_{lv})) - \dot{m}_a \Delta t (c_{p_{ar}} T_e + \omega_e (c_{p_v} T_e + h_{lv})) = h_p \left(\frac{T_e + T_{t'}^s}{2} - T_t \right) A_t \Delta t$$

EQ 3.8

Deste balanço resultam dois parâmetros que merecem atenção pois ainda não foram abordados:

Por h_p entende-se o coeficiente de transferência de calor do fluido para as partículas, que terá de ser obtido de uma equação da forma $Nu = f(Re, Pr)$ aplicável ao tipo de escoamento em causa.

Para o cálculo deste coeficiente de transferência foi utilizada a biblioteca do EES, mais particularmente a secção de escoamentos externos em esferas (External_Flow_Sphere)², onde todos os valores são previamente conhecidos (temperatura e pressão de entrada do fluido e temperatura média e diâmetro do grão). São referidos alguns aspectos relativos a estas rotinas no Anexo F deste trabalho.

² Na verdade, seria mais específica a utilização da rotina “PackedSpheres” pois representa melhor um leito de grãos compactados, mas devido a inconsistências do EES foi decidida a sua não utilização.

A_t é conhecida pela área de transferência de calor de toda a quantidade de milho na câmara de secagem, e por isso é o produto da área da superfície de um grão pelo número total de grãos que constituem uma carga. É importante referir que apesar de haver pontos de contacto entre grãos, estes não serão considerados.

Mas neste momento constata-se que é necessário ter uma ideia do comportamento da taxa de secagem do milho para entrar nos balanços referidos. Como este equipamento funciona em regime uniforme (não permanente), o tempo é um dos parâmetros fundamentais, e então existe o interesse prático de encontrar uma equação que forneça a taxa de secagem, numa forma adimensional, em função de diversos parâmetros característicos do escoamento.

Como tal recorreu-se aos dados experimentais recolhidos de César. *et al*, (2001) e Chinnabun *et al*. (2007) e desenvolveu-se, via o Teorema de Pi de Buckingham, uma relação adimensional, que permitisse uma correlação coerente entre as diversas propriedades físicas envolvidas no processo de secagem. Seguidamente, e com o Solver do Excel, obtiveram-se os parâmetros de ajuste para essa correlação de números adimensionais. A qualidade da correlação foi avaliada usando-se um desvio médio calculado pela equação 3.26.

A equação 3.27 obtida foi então inserida no conjunto formado pelas restantes equações de balanço energético e mássico, sendo este combinado o modelo matemático do secador de cargas de grãos de milho.

3.1.1.1 Curva de secagem

Devido à informação disponível limitada quanto à aplicação do processo de leito em jorro na secagem de grãos de milho, e assim o desconhecimento do comportamento da curva secagem deste cereal nestas condições, não foi utilizada nenhuma expressão encontrada na literatura, mas sim efectuada uma avaliação de resultados experimentais disponíveis na literatura científica por forma a se encontrar uma curva de secagem que pudesse não só ser aplicada particularmente a uma situação, mas sim uma aproximação mais geral à secagem de milho recorrendo a várias temperaturas e processos, processos esses utilizados na literatura consultada referente a alguns trabalhos experimentais.

Fica desde já a ideia para um projecto futuro do mesmo tipo de estudo para, por exemplo, a secagem de sementes, cereais e outros objectos de pequena dimensão, e mesmo dentro da secagem de milho, generalizar a curva de secagem para todos os processos e temperaturas de

secagem existentes na literatura, ou pelo menos, arranjar correlações o mais gerais possível para cada tipo de grão.

Foi portanto necessário pesquisar na literatura técnica e científica por trabalhos que apresentassem dados da secagem das partículas de milho para diversas situações experimentais de modo a que a correlação que posteriormente viesse a ser determinada tivesse a maior gama de aplicação possível.

3.1.1.1.1 Domínio do estudo

Para uma análise mais abrangente, como fundamento para a obtenção de uma curva de secagem para grãos de milho, foram usados os dados de duas experiências em que difere o método de secagem e dentro destes, as várias temperaturas de secagem usadas. Estes dados podem ser em parte visualizados no Anexo A.

Na Tabela I estão representadas as condições experimentais de experiências realizadas por César *et al.* (2001).

Tabela I. Condições experimentais – Temperaturas de ar diferentes

Tipo de secagem	Tipo de Partícula	Velocidade do ar (de aproximação)	Temperatura do ar	Humidade Inicial
Secador camada fina	Milho - Grão	1 m/s	40°C, 50°C e 60°C	21,5 %

Nas três curvas apresentadas no gráfico seguinte alguns dos parâmetros são semelhantes entre si (Tabela I) diferindo apenas a temperatura do ar de entrada de maneira a perceber a importância deste aspecto no processo. É de referir que a humidade retirada se encontra na base seca.

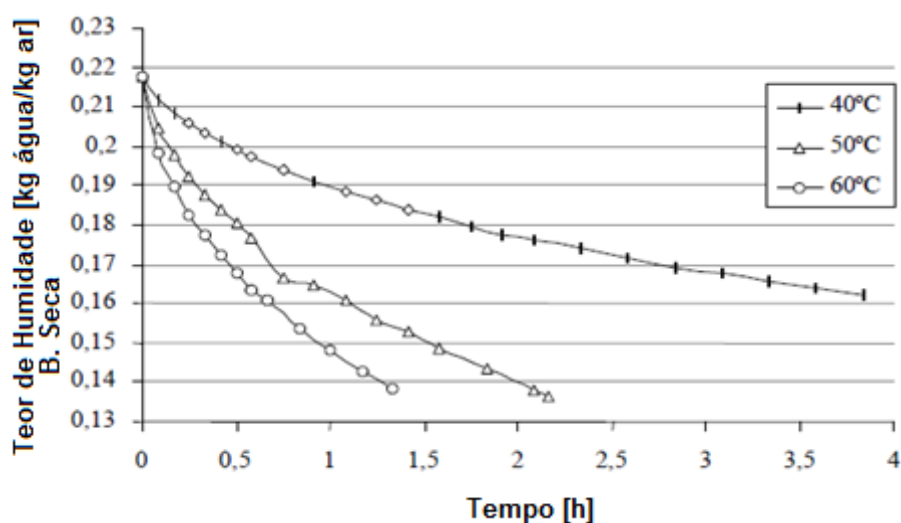


Figura 10: Curva de secagem para milho (César *et al*, 2001)

Para a mesma temperatura de entrada do ar mas com variedades de milho diferentes, foram utilizados os dados de uma experiência realizada por Chinnabun *et al.* (2004), cujas condições experimentais são dadas na Tabela II.

Tabela II. Condições experimentais – Tipos diferentes de milho

Tipo de secagem	Tipo de Partícula	Velocidade do ar (de aproximação)	Temperatura do ar	Humidade Inicial
Secador rotativo (12 r.p.m.)	Amarelo escuro, Amarelo claro, Amarelo muito claro (forma grão de arroz)	1,397 m/s	70°C	25 %

Todas as variedades estão incluídas na gama alimentícia, ou seja, para consumo humano. É efectuada uma pré-secagem de maneira a que a humidade do milho nas condições iniciais do teste seja de 25 %. Esta é a humidade contabilizada nos cálculos assim como os seus valores em base seca apesar de na experiência terem sido retirados os valores em base húmida. A conversão foi efectuada utilizando o método referido anteriormente neste trabalho no Capítulo 2, no Ponto 2.3 - Humidade.

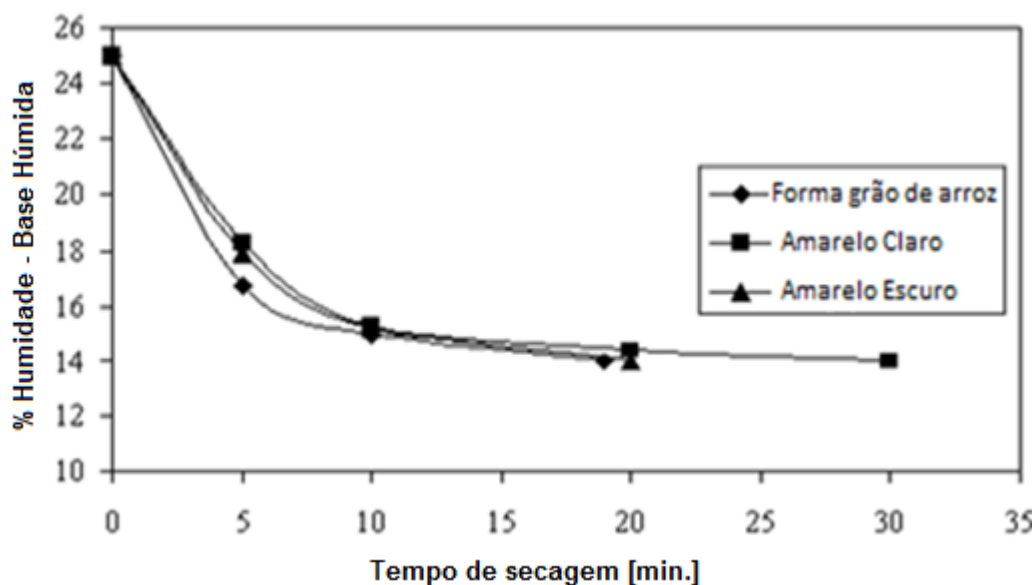


Figura 11: Curvas de secagem para milho (Chinnabun *et al.*, 2004)

Utilizando o Excel e agrupando as seis curvas dos valores experimentais obtém-se o gráfico da figura 12:

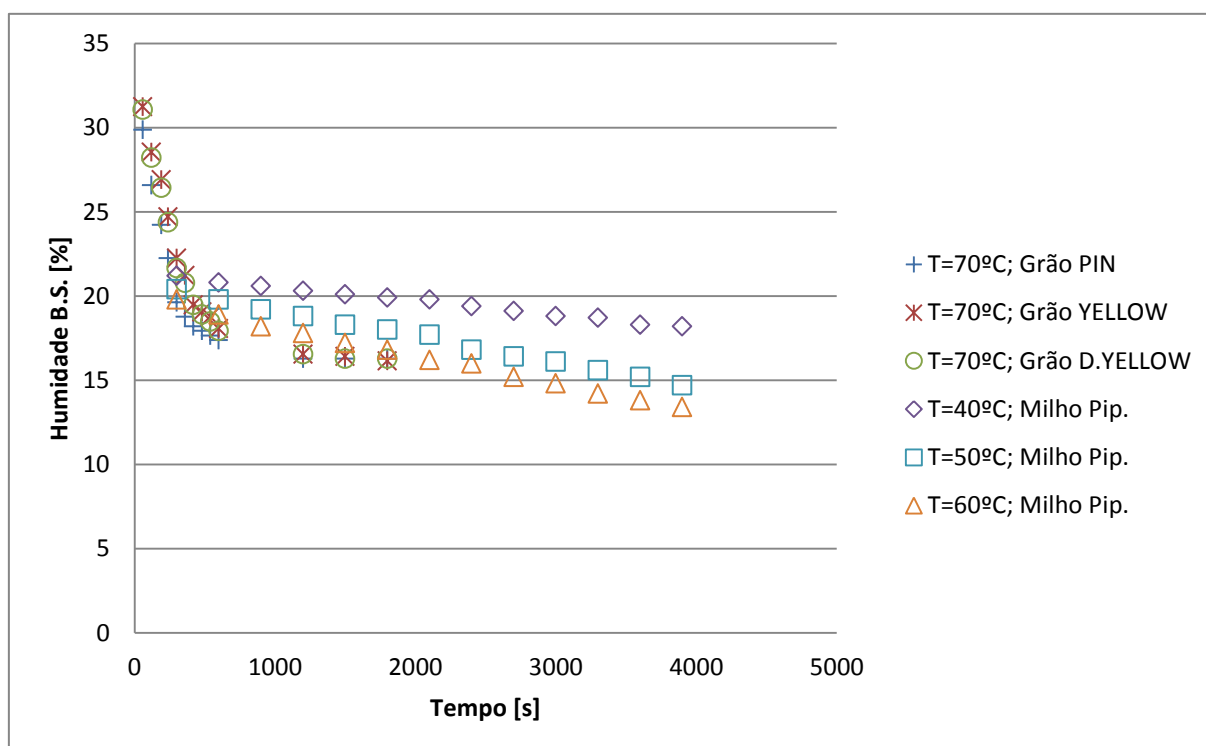


Figura 12: Agrupamento dos dados de ambas as experiências

Neste momento, partindo das curvas apresentadas no gráfico da figura 12 é possível, usando o conceito do teor de humidade adimensionalizado, obter-se uma curva geral que poderá posteriormente ser introduzida no modelo matemático a ser utilizado no dimensionamento do secador.

Vários autores apresentam expressões para o processo de secagem, e por exemplo, no caso de secagem de rolhas de cortiça num leito fixo, Martins (1990) apresentou um modelo simples dado pela expressão:

$$\phi = \exp(-kt^n) \quad \text{EQ 3.9}$$

Magalhães (2004) aprofundou a ideia e apresentou a correlação seguinte, mas para a secagem de rolhas de cortiça de leito em jorro:

$$\phi = \exp(-6284T^{-3,27}U^{0,78}t^{(0,0063T^{1,1}U^{0,25})}) \quad \text{EQ 3.10}$$

De forma a apresentar uma expressão que forneça resultados satisfatórios e que não obrigue a inúmeros dados experimentais, foi usada a análise dimensional, neste caso apresentando um enunciado da relação entre uma função expressa em termos de parâmetros dimensionais e uma função correspondente expressa em termos de parâmetros adimensionais. Como foi referido anteriormente de uma maneira teórica, o teorema dos Pi de Buckingham permite desenvolver esses parâmetros de um modo fácil e rápido.

O objectivo é, a partir de resultados experimentais, obter-se uma expressão da taxa de secagem dos grãos de milho em função das condições do ar de secagem, das propriedades dessas mesmas partículas de milho e do tempo de secagem. Esta expressão será depois inserida no modelo matemático do secador de forma a se conseguir chegar ao seu dimensionamento.

3.1.1.2 Determinação dos grupos Pi de Buckingham

Para listar todos os elementos envolvidos, sabe-se que a descida da humidade numa partícula resulta de várias características. Sendo assim, a função deverá conter os seguintes parâmetros:

$$\phi = f(\rho_{\text{milho}}, \rho_{\text{ar}}, d_{\text{grão}}, U, T, t, \mu_{\text{ar}}, c_{\text{milho}}) \quad n = 8 \text{ parâmetros dimensionais} \quad \text{EQ 3.11}$$

Em que:

ρ_{milho} - Massa volúmica do grão de milho;

ρ_{ar} - Massa volúmica do ar;

$d_{\text{grão}}$ - Diâmetro da partícula;

U - Velocidade superficial do ar;

T - Temperatura do ar ;

t - Tempo;

μ_{ar} - Viscosidade dinâmica do ar;

c_{milho} - Calor específico do milho;

ϕ - Humidade adimensionalizada - $\phi = (X - X_{\text{ref}})/(X_i - X_{\text{ref}})$.

A humidade absoluta não é contabilizada pois sendo definida por $\text{kg}_{\text{ar}}/\text{kg}_{\text{água}}$, já se encontra adimensionalizada, assim como deve ser referido que a humidade do ar não entrou na avaliação dos parâmetros adimensionais porque ao se utilizar, mais adiante na formulação, a humidade relativa do ar, esta já se considera como parâmetro adimensional.

Como dimensões primárias são referidas M, L, T e θ , onde M representa a massa, L o comprimento, T refere-se ao tempo e θ à temperatura (graus Celcius), apresentado assim $r = 4$ dimensões primárias:

Então:

$$\rho_{\text{milho}}, \rho_{\text{ar}}, d_{\text{grão}}, U, T, t, \mu_{\text{ar}}, c_{\text{milho}}$$

fica,

$$\frac{M}{L^3}, \frac{M}{L^3}, L, \frac{L}{T}, \theta, T, \frac{M}{LT}, \frac{L^2}{T^2\theta}$$

ou seja,

$$ML^{-3}, ML^{-3}, L, LT^{-1}, \theta, T, ML^{-1}T^{-1}, L^2T^{-2}\theta^{-1}$$

Escolhido como conjunto de recurso:

$$\theta, T, \mu, d_{gr\tilde{a}o} \quad m = r = 4 \text{ parâmetros repetentes } (\theta \equiv t)$$

resultando em $n - m = 4$ grupos adimensionais:

$$\prod_1 = d^a \theta^b T^c \mu^d \rho_{milho} \quad \text{EQ 3.12}$$

$$\prod_2 = d^e \theta^f T^g \mu^h \rho_{ar} \quad \text{EQ 3.13}$$

$$\prod_3 = d^i \theta^j T^k \mu^l U \quad \text{EQ 3.14}$$

$$\prod_4 = d^m \theta^n T^o \mu^p c p_{milho} \quad \text{EQ 3.15}$$

Substituindo obtém-se:

$$\prod_1 = (L)^a \theta^b (T)^c (ML^{-1}T^{-1})^d (ML^{-3}) = M^0 L^0 T^0 \theta^0 \quad \text{EQ 3.16}$$

$$\prod_2 = (L)^e \theta^f (T)^g (ML^{-1}T^{-1})^h (ML^{-3}) = M^0 L^0 T^0 \theta^0 \quad \text{EQ 3.17}$$

$$\prod_3 = (L)^i \theta^j (T)^k (ML^{-1}T^{-1})((LT^{-1})) = M^0 L^0 T^0 \theta^0 \quad \text{EQ 3.18}$$

$$\prod_4 = (L)^m \theta^n (T)^o (ML^{-1}T^{-1})^p (L^2 T^{-2} \theta^{-1}) = M^0 L^0 T^0 \theta^0 \quad \text{EQ 3.19}$$

Equacionando os expoentes M, L, T e θ para o primeiro grupo resulta:

$$M: d + 1 = 0 \quad a = 2$$

$$L: a - d - 3 = 0 \quad b = 0$$

$$T: c - d = 0 \quad c = -1$$

$$\theta: b = 0 \quad d = -1$$

Ficando:

$$\prod_1 = \frac{d_{gr\tilde{a}o}^2 \rho_{milho}}{t\mu} \quad \text{EQ 3.20}$$

De modo semelhante:

$$\prod_2 = \frac{d_{gr\tilde{a}o}^2 \rho_{ar}}{t\mu} \quad \text{EQ 3.21}$$

$$\prod_3 = \frac{Ut}{d_{gr\tilde{a}o}} \quad \text{EQ 3.22}$$

$$\Pi_4 = \frac{T t^2 c_{milho}}{d_{grão}^2} \quad \text{EQ 3.23}$$

Então, sem aprofundar as propriedades físicas dos intervenientes, a expressão da transferência de humidade entre o grão e o ar circundante virá dada por:

$$\phi = a \, Hr^b \, \Pi_1^c \Pi_2^d \, \Pi_3^e \, \Pi_4^f \quad \text{EQ 3.24}$$

É de referir no entanto que os grupos adimensionais 1 e 2 são semelhantes, e não apresenta qualquer interesse estudar ambos da mesma maneira. Sendo assim apenas será utilizado Π_2 no formato calculado mas o grupo Π_1 passará a ser um produto dos dois, resultando assim numa relação entre as massas volúmicas do milho e do ar. A formulação final da relação entre os números adimensionalizados será então,

$$\phi = a \, Hr^b \left(\frac{\rho_{ar}}{\rho_{milho}} \right)^c \left(\frac{d_{grão}^2 \rho_{ar}}{t \mu} \right)^d \left(\frac{U t}{d_{grão}} \right)^e \left(\frac{T t^2 c p_{milho}}{d_{grão}^2} \right)^f \quad \text{EQ 3.25}$$

Conhecida a expressão, resta saber os respectivos expoentes, os quais foram calculados com a ajuda do Solver, componente do programa Excel. Inicialmente foram registados todos os dados da experiência na folha de cálculo e calculado o erro relativo entre os valores adimensionais da humidade calculados e experimentais, e depois, utilizando o Solver do Excel e recorrendo à equação 3.26, foi minimizado o desvio médio de todos os dados, através da atribuição de valores aos expoentes a, b, c, d, e f que minimizassem tal desvio. Conseguiu-se deste modo um desvio médio de 12,71 %, calculado de acordo com a equação 3.26, valor perfeitamente aceitável para este tipo de testes (Magalhães, 2004 e Julião, 2008).

$$Desv_{médio} = \sqrt{\frac{\left(\frac{(\phi_{calculado} - \phi_{experimental})}{\phi_{experimental}} \right)^2}{N_{pontos}}} * 100 \quad \text{EQ 3.26}$$

É agora possível enunciar a expressão final que representa o comportamento da evolução da humidade num grão de milho:

$$\phi = 25,57 \text{ Hr}^{-0,6} \left(\frac{\rho_{ar}}{\rho_{milho}} \right)^{1,06} \left(\frac{d_{grão}^2 \rho_{ar}}{t\mu} \right)^{2,56} \left(\frac{Ut}{d_{grão}} \right)^{-0,92} \left(\frac{Tt^2 c_{milho}}{d_{grão}^2} \right)^{-0,03} \quad \text{EQ 3.27}$$

Sendo:

$$d_{grão} = 0,004 \text{ m};$$

$$\rho_{milho} = 1253,5 \text{ kg/m}^3 \text{ (médio);}$$

$$\mu = \text{Entre } 1,96 \times 10^{-5} \text{ e } 2,05 \times 10^{-5} \text{ Pa s (dependente da temperatura do ar);}$$

$$\rho_{ar} = \text{Entre } 1,03 \text{ e } 1,12 \text{ kg/m}^3 \text{ (dependente da temperatura do ar);}$$

$$c_{milho} = 1691 \text{ J/(kg.K)}.$$

É necessário referir que os valores apresentados acima foram retirados das experiências efectuadas, (César *et al*, 2001, e Chinnabun *et al.*, 2004).

Adimensionalizando os valores experimentais e utilizando a equação da humidade calculada, é possível agora a elaboração de um gráfico (teórico e experimental), de maneira a verificar a qualidade da equação encontrada pelo método Pi de Buckingham.

É perceptível que o comportamento das curvas experimentais é bastante similar quando comparado com as mesmas curvas calculadas teoricamente, o que reflecte o mesmo comportamento para as mesmas características.

Com a análise à figura 13 é melhor entendida a aproximação entre os valores experimentais (símbolos) e os valores calculados (linhas).

É importante referir que esta aproximação poderia ser maior e assim o erro mais reduzido se fosse utilizado um método mais específico na elaboração da equação, o que levaria claro a um estudo mais aprofundado nesta área.

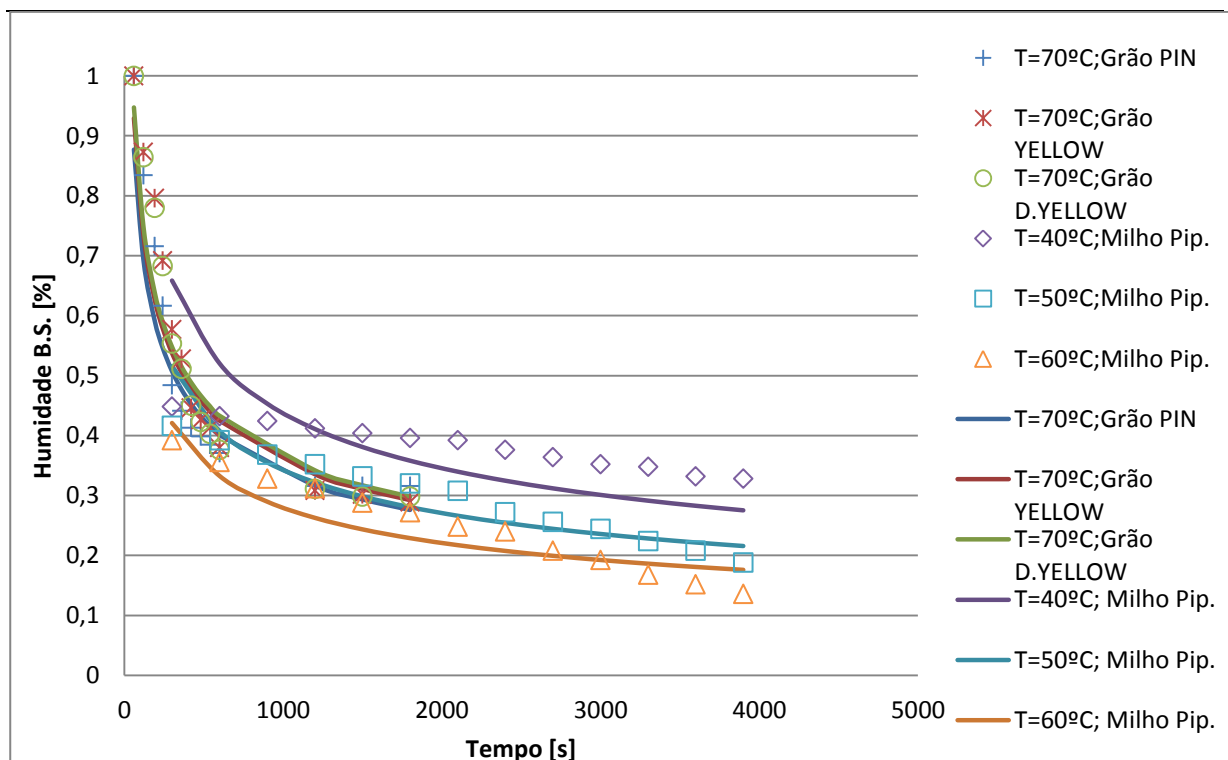


Figura 13: Comparação das curvas calculadas (linhas) e experimentais (pontos)

Neste momento, depois de determinada a curva da evolução do teor de humidade adimensional, é importante referenciar, ou mesmo resumir, as correlações disponíveis para o cálculo do modelo matemático a elaborar, de maneira a, de um modo sucinto, ser verificado como será o desenvolvimento do cálculo.

Sendo assim, é iniciado o estudo com a equação da conservação da energia aplicada a volumes uniformes:

$$Q_{perdas} = m_{grão}c_{milho}(T_{t'} - T_t) + m_{grão}c_{wl}(X_{t'}T_{t'} - X_tT_t) + \dot{m}_{as}\Delta t[(cp_{ar}(T_{t'}^s - T_e) + cp_v(\omega_{t'}^sT_{t'}^s - \omega_eT_e) + h_{lv}(\omega_{t'}^s - \omega_e)] \quad \text{EQ 3.28}$$

De maneira a completar um pouco mais este estudo, e de saber efectivamente o que acontece na realidade, as perdas para o exterior através da condução pelas paredes da câmara de secagem serão contabilizadas de maneira a ser possível uma percepção da importância do isolamento nestes casos. Para tal é utilizada a equação da transferência de calor por condução empregando o conceito de resistência térmica associada à transferência de fluxo de calor,

considerando que as paredes do secador em estudo são compostas por uma camada de aço, uma camada intermédia de isolamento e uma camada exterior de alumínio.

$$Q_{perdas} = \frac{T_e - T_{ext}}{\frac{1}{\alpha_{int} \times r_1 \times 2 \times \pi \times L_{re}} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \times \pi \times L \times K_{aço}} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2 \times \pi \times L_{re} \times K_{isolamento}} + \frac{\ln \frac{r_4}{r_3}}{2 \times \pi \times L_{re} \times K_{alum}} + \frac{1}{\alpha_{ext} \times r_4 \times 2 \times \pi \times L_{re}}}$$

EQ 3.29

Efectuando também o balanço energético associado à transferência de calor entre o ar de passagem e os grãos de milho, a temperatura do ar de saída em cada instante é determinada:

$$\dot{m}_a \Delta t (c p_{ar} T_{t'}^s + \omega_{t'}^s (c p_v T_{t'}^s + h_{lv})) - \dot{m}_a \Delta t (c p_{ar} T_e + \omega_e (c p_v T_e + h_{lv})) = h_p \left(\frac{T_e + T_{t'}^s}{2} - T_t \right) A_t \Delta t$$

EQ 3.30

Elaborando desta vez um balanço de massa à câmara de secagem é possível encontrar a humidade absoluta do ar à saída da câmara em cada instante de tempo:

$$\dot{m}_a \Delta t (\omega_s - \omega_e) = m_g (X_{t'} - X_t)$$

EQ 3.31

Finalmente, utilizando a correlação encontrada da evolução do teor de humidade no grão, é possível determinar em cada instante a percentagem de água no grão de milho:

$$\phi = 25,57 \text{ Hr}^{-0,6} \left(\frac{\rho_{ar}}{\rho_{milho}} \right)^{1,06} \left(\frac{d_{grão}^2 \rho_{ar}}{t \mu} \right)^{2,56} \left(\frac{U t}{d_{grão}} \right)^{-0,92} \left(\frac{T t^2 c_{milho}}{d_{grão}^2} \right)^{-0,03}$$

EQ 3.32

3.1.2 Equipamento

Depois da consulta de catálogos de equipamentos similares e do estudo e funcionamento do programa efectuado, foi procurada a melhor solução em termos de reduzir a potência necessária mas possuindo um tempo de secagem interessante para que seja aceite no mercado. As dimensões do equipamento ficaram então estabelecidas em 2 metros de diâmetro interior por 4 metros de altura, sendo este o diâmetro interior, estando a ele acrescidas as espessuras das paredes e do isolamento, que ficaram também estabelecidas em 0,01 metros para as paredes interior e exterior (aço inoxidável e alumínio respectivamente), e 0,02 metros para o isolamento (fibra de vidro).

Relativamente à velocidade do ar imposta para o início do estudo foi de 1,1 m/s (velocidade média das experiências consultadas), e como este processo tem também recirculação de ar, ou seja, parte do ar utilizado para a secagem é novamente aquecido e inserido na câmara, o que é interessante do ponto de vista económico apesar de influenciar directamente todo o processo, sendo importante encontrar a melhor solução para determinada aplicação, neste caso foi utilizado como ponto de partida para os cálculos 50 % de ar recuperado, apesar de se terem efectuado outros estudos.

Como verificado na figura 14, é sabido que todos os parâmetros estão interligados, logo, é necessário encontrar a melhor solução como um conjunto e não individualmente, e por isso, depois da realização de várias simulações numéricas, a temperatura do ar de entrada foi imposta em 50 ° C. Este valor foi também a temperatura média das experiências consultadas. A velocidade do ar de entrada foi estabelecida em 0,76 m/s pois refere o melhor compromisso entre parâmetros de modo a obter o tempo de secagem pretendido sem a utilização de equipamentos de elevada performance e assim dispendiosos.

Como condições ambiente, foram consideradas as de Inverno, pois são as menos favoráveis para o processo de secagem.

Para facilitar esta visualização e entender as diferenças funcionais com a mudança de parâmetros dimensionais, foi elaborada uma aplicação no próprio EES, onde o utilizador pode proceder à mudança de características importantes para o processo, de maneira a tornar este estudo mais abrangente aos interesses dos utilizadores.

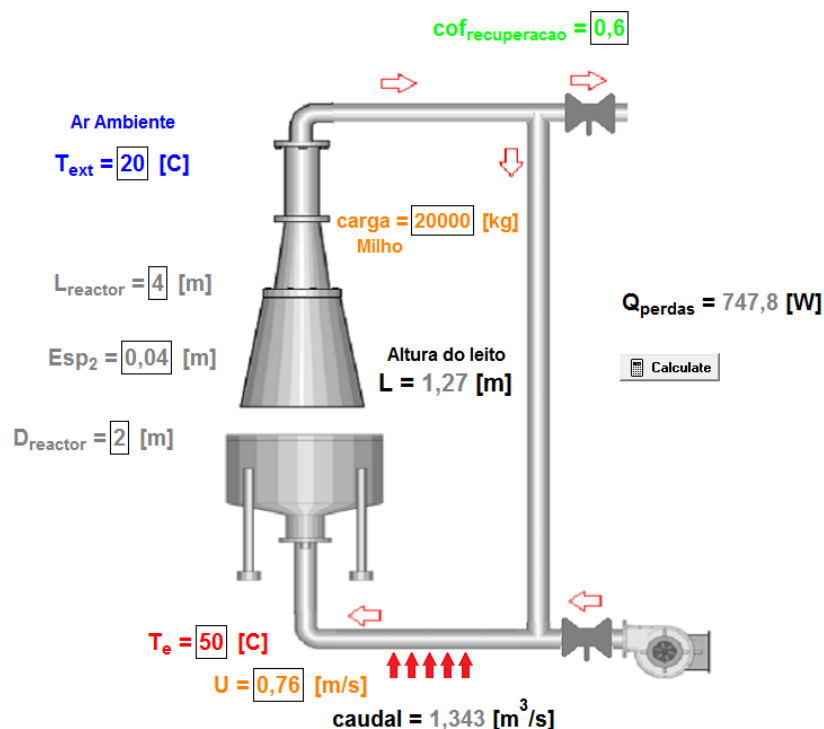


Figura 14: Exemplo de interface do EES – Câmara de secagem

Com se pode ver na figura 14, é possível obter como dados de saída o valor das perdas térmicas, ou mesmo o caudal necessário, variando parâmetros como por exemplo a velocidade do ar, a sua temperatura de entrada e ambiente, ou ainda a própria carga a secar.

Como aspectos dimensionais possíveis de alterar existem as dimensões da câmara e a espessura de isolamento.

Como se constata depois da consulta à tabela 15, o EES prima pela organização e apresentação dos resultados, e assim ter uma melhor percepção de todos os intervenientes no processo de cálculo bem como os seus valores.

Relativamente ao funcionamento do equipamento, este cumpriu com o objectivo proposto, demorando menos tempo que o inicialmente previsto de 2 horas, proporcionando uma descida da humidade do grão até aos valores necessários para o comércio. Estas considerações serão mencionadas pormenorizadamente mais à frente neste trabalho, mais propriamente no Capítulo 4, Ponto 4.1, onde é estudada a curva de secagem do grão de milho.

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$A_p = 0,00005027 \text{ [m}^2\text{]}$	$A_{tt} = 9422 \text{ [m}^2\text{]}$	$carga = 20000 \text{ [kg]}$	$caudal = 1,343 \text{ [m}^3\text{/s]}$	$cof_{recuperacao} = 0,6$	$cp_{ar} = 1005 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$
$cp_v = 1884 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$	$C_d = 0,6506$	$c_g = 1691 \text{ [J/kg}\cdot\text{C]}$	$c_{wl} = 4187 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$	$D = 0,004 \text{ [m]}$	$\Delta P = 0,0001 \text{ [kPa]}$
$\delta_t = 20 \text{ [s]}$	$d_i = 1,5 \text{ [m]}$	$D_{reactor} = 2 \text{ [m]}$	$D_{reactor,2} = 2,01 \text{ [m]}$	$D_{reactor,3} = 2,05 \text{ [m]}$	$D_{reactor,4} = 2,06 \text{ [m]}$
$E_{sp1} = 0,01 \text{ [m]}$	$E_{sp2} = 0,04 \text{ [m]}$	$E_{sp3} = 0,01 \text{ [m]}$	$f = 0,1163$	$Fluid\$ = 'air_ha'$	$F_d = 0,000006606 \text{ [N]}$
$h_e = 65,38 \text{ [kJ/kg]}$	$h_{ext} = 2,598 \text{ [W/m}^2\text{K]}$	$h_H = 8,646 \text{ [W/m}^2\text{K]}$	$h_p = 68,84 \text{ [W/m}^2\text{K]}$	$h_T = 8,646 \text{ [W/m}^2\text{K]}$	$h_{vl} = 2501 \text{ [J/kg]}$
$k_{aco} = 15,19 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$	$k_{alu} = 236 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$	$k_{isolamento} = 0,038 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$	$L = 1,27 \text{ [m]}$	$L_{reactor} = 4 \text{ [m]}$	$massa_{carga} = 20000 \text{ [kg]}$
$\dot{m}_{ar} = 1,467 \text{ [kg/s]}$	$m_{gs} = 20000 \text{ [kg]}$	$Nusselt = 10,12$	$Nusselt2 = 406,8$	$Nusselt_T = 706,4$	$N_p = 1,874E+08$
$P = 101,3 \text{ [kPa]}$	$P_1 = 101,3 \text{ [kPa]}$	$Q_{perdas} = 747,8 \text{ [W]}$	$Ra = 6,284E+10$	$Re = 52372$	$ro_{ar} = 1,031 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
$ro_{grao} = 1254 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$r_1 = 1 \text{ [m]}$	$r_2 = 1,005 \text{ [m]}$	$r_3 = 1,025 \text{ [m]}$	$r_4 = 1,03 \text{ [m]}$	$r_i = 0,75 \text{ [m]}$
$seccao = 1,767 \text{ [m}^2\text{]}$	$T_1 = 20 \text{ [C]}$	$T_{condutibilidade} = 26 \text{ [C]}$	$T_e = 50 \text{ [C]}$	$T_{ext} = 20 \text{ [C]}$	$T_{parede} = 11,2 \text{ [C]}$
$T_s = 26,28 \text{ [C]}$	$U = 0,76 \text{ [m/s]}$	$U_{superior} = 1,194 \text{ [m/s]}$	$visc_{ar} = 0,00001964 \text{ [kg/m}\cdot\text{s]}$	$Volume = 15,96 \text{ [m}^3\text{]}$	$V_{int} = 0,9154 \text{ [m}^3\text{/kg]}$
$w_e = 0,0058$	$X_e = 0,1 \text{ [-]}$	$X_i = 0,255 \text{ [-]}$			

Figura 15: Janela de soluções fornecida pelo EES

3.1.2.1 Velocidade mínima de jorro

Como já foi referido, a secagem será feita por leito em jorro, onde existirá um escoamento gás sólido na parte central do leito sob a forma de um jorro. Ao longo da pesquisa várias correlações foram encontradas para o cálculo da velocidade mínima de jorro e por isso será mais interessante o estudo de algumas das mais importantes e entender as suas diferenças para o mesmo objecto de estudo, do que apenas a utilização de uma das fornecidas na literatura.

Segundo Mathur e Epstein (1974), a melhor e mais simples correlação empírica para estimar a velocidade mínima de jorro é:

$$U_{ms} = \left(\frac{D_p}{D_c}\right) \left(\frac{D}{D_c}\right)^{0,33} \left(\frac{2gH_0(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g}\right)^{0,5} \quad \text{EQ 3.33}$$

Mas de acordo com os autores, a equação 3.33 foi desenvolvida recorrendo à análise dimensional a partir de resultados para um número de materiais restrito em colunas com diâmetros entre os 0,076 m e 0,305 m, usando como fluido tanto ar como água. Ao longo do tempo foi verificado que esta equação manteve-se válida para uma maior gama de condições, mas apenas para colunas com diâmetros inferiores a 0,61 m (Mathur e Epstein, 1974).

Uemaki *et al.*, (1983) desenvolveram também uma correlação que previa a velocidade mínima de jorro para partículas de tamanhos não uniformes entre 0,5 e 2,3 centímetros:

$$U_{ms} = 0,977 \left(\frac{D_p}{D_c}\right)^{0,615} \left(\frac{D}{D_c}\right)^{0,274} \left(\frac{2gH(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g}\right)^{0,324} \quad \text{EQ 3.34}$$

a literatura apresenta outras correlações para cálculo de velocidade de mínimo jorro, como por exemplos as seguintes:

Ogino *et al.*, (1993):

$$U_{ms} = 0,015 \left(\frac{\varepsilon^4}{2(1-\varepsilon)}\right)^{0,5} \left((1-\varepsilon) \frac{\rho_p(\rho_p - \rho_g)gD_c^3}{\mu^2}\right)^{0,2} \left(\frac{D_p}{D_c}\right) \left(\frac{D}{D_c}\right)^{1/3} \left(\frac{2gH(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g}\right)^{0,5}$$

EQ 3.35

Choi e Meisen (1992)

$$U_{ms} = 18,5 \times \left(\frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} \right)^{0,263} \times \left(\frac{H}{D_c} \right)^{-0,103} \times \left(\frac{D_p}{D_c} \right)^{1,19} \times \left(\frac{D}{D_c} \right)^{0,373} \times \sqrt{2 \times g \times H} \quad \text{EQ 3.36}$$

King e Harrison (1980) mostraram que a velocidade minima de jorro diminui consideravelmente com o aumento da pressão até 19,7 atm e propuseram uma relação modificada da correlação de Mathur e Epstein:

$$U_{ms} = \left(\frac{\rho_g}{\rho_{g,amb}} \right)^{0,2} \left(\frac{D_p}{D_c} \right) \left(\frac{D}{D_c} \right)^{1/3} \left(\frac{2gH(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g} \right)^{0,5} \quad \text{EQ 3.37}$$

Andrade (1998) mostrou que, para um leito em jorro rectangular com tamanhos de partículas não uniformes (entre $1,18 \times 10^{-3}$ e 2×10^{-3} m) a velocidade minima de jorro não difere muito quando comparada com as relações existentes obtidas para leitos cilindricos

$$U_{ms} = \left(\frac{\rho_g}{\rho_{g,amb}} \right)^{0,2} \left(\frac{D_p}{D_c} \right) \left(\frac{D}{D_c} \right)^{1/3} \left(\frac{2gH(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g} \right)^{0,5} \quad \text{EQ 3.38}$$

Em todas as correlações anteriormente apresentadas, utilizando o Sistema Internacional de Unidades, o significado das variáveis será:

D_p - Diâmetro da partícula;

D_c – Diâmetro da coluna;

D – Diâmetro do orifício de entrada;

g – Aceleração da gravidade;

H – Altura inicial do leito;

ρ_p – Massa volúmica do milho;

ρ_g – Massa volúmica do fluido;

$\rho_{g,amb}$ – Massa volúmica do fluido às condições ambiente ($T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 1 \text{ atm}$);

μ – Viscosidade do ar.

Na tabela III são apresentados os resultados obtidos para U_{ms} usando as diferentes correlações.

Tabela III. Resultado das diferentes correlações usadas para o cálculo da velocidade mínima de jorro

Correlação	U_{ms} (m/s)
Mathur e Epstein (1974)	0,40
Uemaki <i>et al.</i> , (1983)	0,61
Ogino <i>et al.</i> , (1993)	0,81
King e Harrison (1980)	0,39
Choi e Meisen (1992)	0,40
Andrade (1998)	0,91

É importante referir que para estes cálculos, as condições são as representadas na tabela IV:

Tabela IV. Condições de cálculo – Velocidade mínima de jorro

$D_p[m]$	$D_c[m]$	$D[m]$	$g[m/s]$	$H[m]$	$\rho_p[kg/m^3]$	$\rho_f[kg/m^3]$	$\mu[kg/ms]$
0,004	1,5	0,4	9,81	2,3	1254	1,031	0,00002

3.2 Permutador de calor

Para o aquecimento do ar que entra na câmara de secagem foi utilizado um permutador de calor onde são cruzados os fluxos de ar frio (ar recuperado e ar novo) e ar quente (gases de combustão provenientes do queimador) de maneira a que o ar entre na câmara a 50 °C como já foi referido.

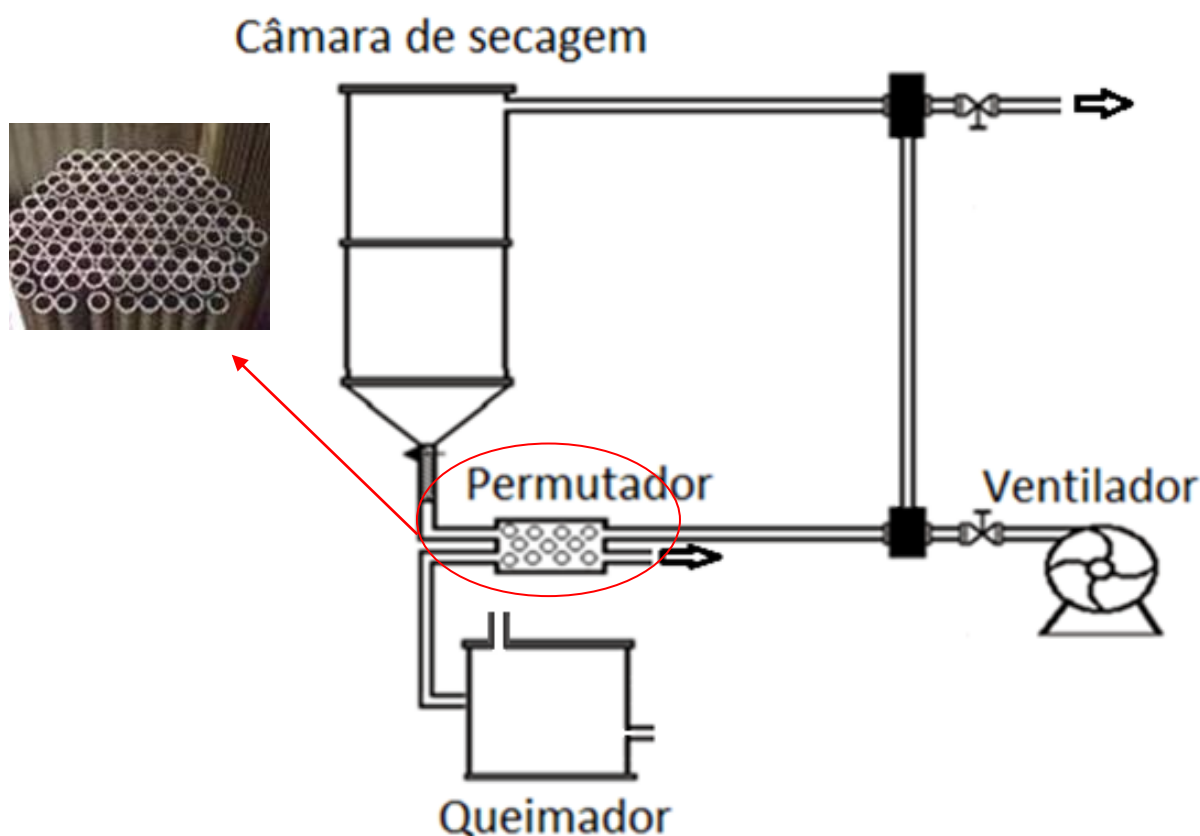


Figura 16: Constituintes do equipamento de secagem – Permutador de calor

Através do processo de dimensionamento será encontrado o número de tubos necessário ao permutador para cumprir o objectivo, com base nas temperaturas de serviço do ar de entrada e saída tanto do fluido frio como do fluido quente (composto por uma mistura de ar com produtos de combustão do gás propano). Um factor importante é também o arranjo escalonado dos próprios tubos e a sua dimensão e distância entre eles. Em termos de orientações de escoamento, a corrente de ar frio passa da direita para esquerda, entrando seguidamente na câmara de secagem, e o fluido quente (gases de combustão) passa no plano perpendicular à folha e por isso perpendicular ao fluido frio (como pode ser melhor visualizado na figura 17), e é posteriormente expelido.

3.2.1 Desempenho do permutador

Para fornecer calor ao ar que irá entrar na câmara de secagem e de maneira a maximizar o coeficiente de transferência de calor por convecção e diminuir assim o volume do equipamento, foi seleccionado um permutador de fluxo cruzado com escoamento dos fluidos de trabalho perpendiculares entre si e com o arranjo tubular que está representado na figura 17.

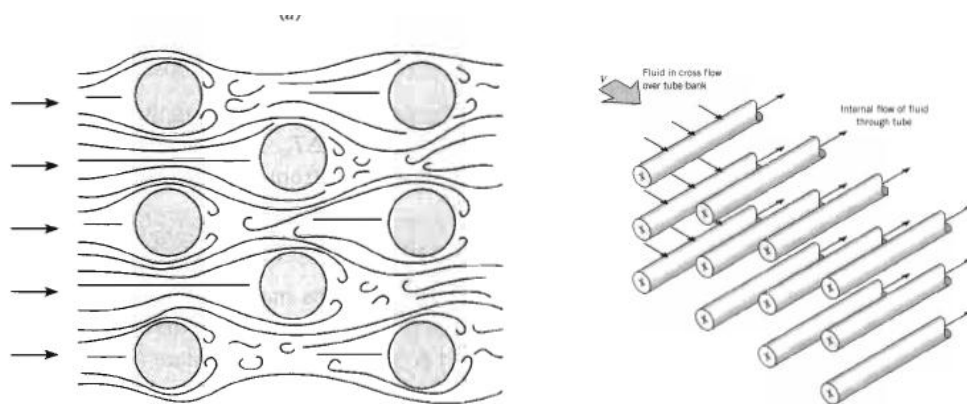


Figura 17: Exemplo da orientação tubular no permutador (Incropera, 2002)

Para a determinação da área de transferência necessária do fluido quente para o fluido frio será utilizada a equação seguinte:

$$\dot{Q} = U \times A \times N_{tubos} \times \Delta T_{lm} \quad \text{EQ 3.39}$$

Onde:

U = Coeficiente global de transferência de calor;

N_{tubos} - Número de tubos necessários;

ΔT_{lm} - Diferença de temperatura média logarítmica;

A – Área exterior de cada tubo.

Relativamente ao coeficiente de transferência de calor, este foi calculado com base nos conhecimentos de transferência de calor em permutadores sem alhetas com a possibilidade de existência de incrustações, Incropera *et al* (2002):

$$\frac{1}{U \times A} = \frac{1}{\alpha_i \times A_i} + \frac{1}{\alpha_e \times A_e} + \frac{\Delta x}{\lambda \times Alm} + Rf \quad \text{EQ 3.40}$$

Então, com a aplicação à configuração cilíndrica do permutador:

$$U \times A = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{int} \times A_{int}} + \frac{R_{inc.ar quente}}{A_{int}} + \frac{\ln \frac{D_{ext}}{D_{int}}}{2 \times \pi \times \lambda \times N \times L} + \frac{R_{inc.ar frio}}{A_{ext}} + \frac{1}{\alpha_{ext} \times A_{ext}}}$$

EQ 3.41

Para o cálculo do coeficiente de convecção interior (α_{int}) foi mais uma vez utilizada a rotina “PipeFlow” da biblioteca do EES na secção de convecção interior (de modo semelhante aquando a sua utilização para o coeficiente de convecção interior dentro da câmara de secagem).

Em relação à convecção exterior aos tubos de ar quente, com atenção ao tipo de arranjo tubular existente e à orientação dos fluidos, figura 18, também uma sub rotina do EES foi utilizada, mais particularmente “External Flow Staged Bank”, que retrata o escoamento exterior nos tubos dentro do permutador.

No Anexo F é possível consultar algumas informações referentes a estas rotinas.

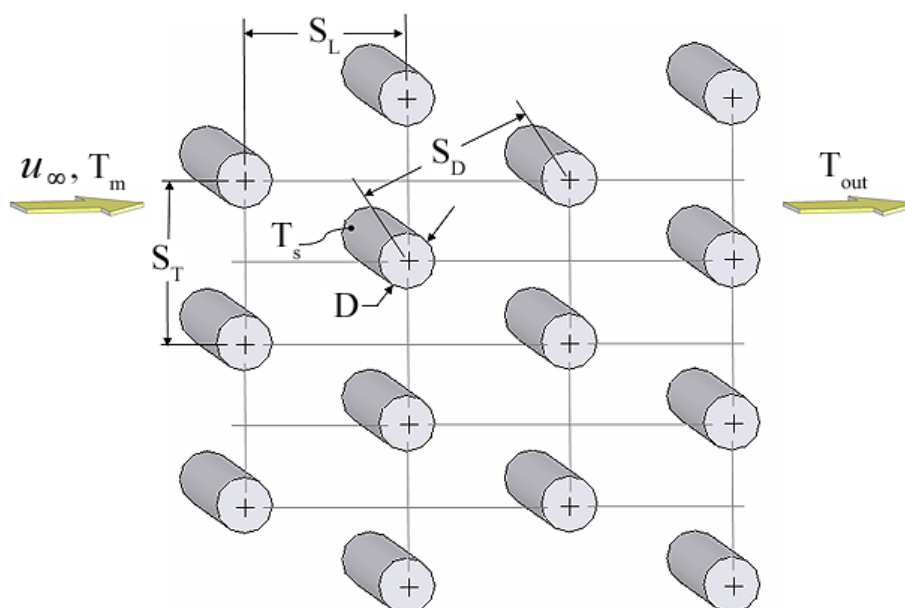


Figura 18: Pormenor do arranjo tubular e orientação do escoamento (EES)

Sendo alguns dos parâmetros já conhecidos, outros foram escolhidos de maneira a cumprir o objectivo, como a espessura e diâmetro dos tubos, mas é possível a sua alteração de maneira a encontrar outra solução através de uma pequena aplicação realizada no EES.

As temperaturas do ar quente e frio, à saída e entrada, foram também impostas de acordo com o processo.

É de referir que a entrada do ar frio no permutador foi considerada não os 20 °C da temperatura ambiente mas 30 °C pois devido à recirculação, este ar vem aquecido comparativamente ao ambiente, mas esta temperatura é para a situação mais desfavorável do processo, ou seja, na sua fase de arranque. A título de curiosidade, pela consulta da figura 19, é possível verificar que a temperatura do ar depois da mistura e início do processo é cerca de 26 °C e tende a subir e estabilizar, atingindo os 46 °C aproximadamente. Este gráfico foi elaborado através do EES, onde as várias características do ar, como humidade, entalpia e temperatura são analisadas em função do tempo decorrido ao longo da secagem.

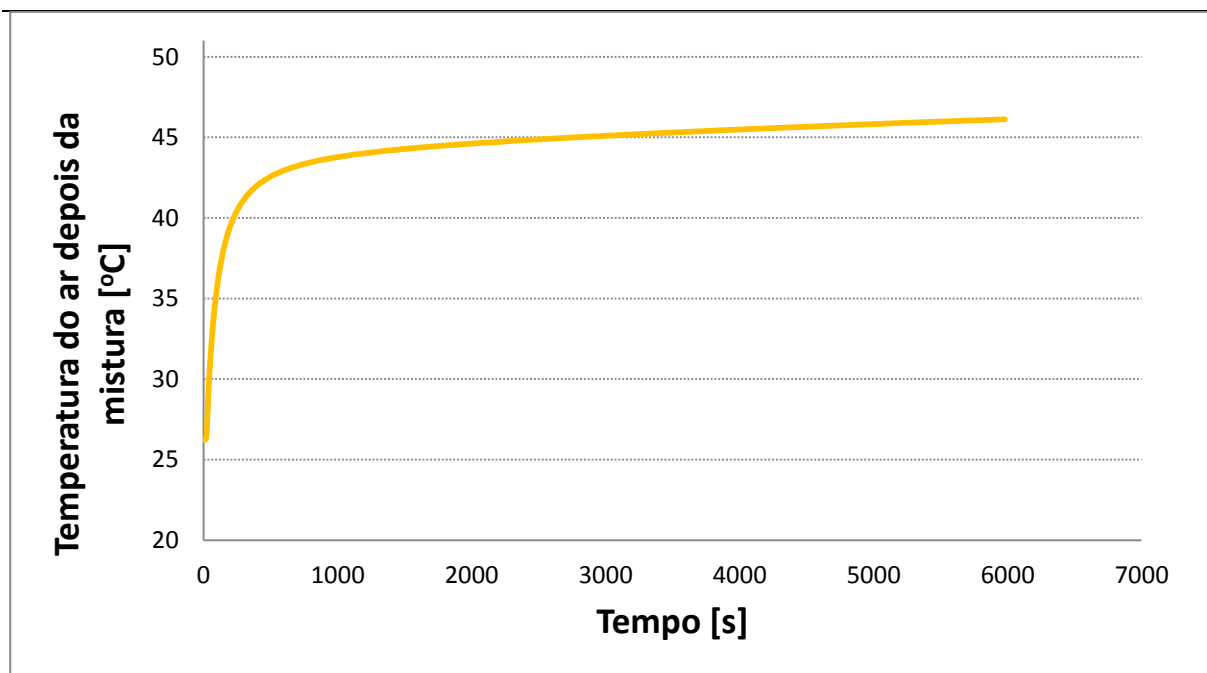


Figura 19: Comportamento da temperatura do ar de secagem à entrada do permutador de aquecimento depois da mistura com ar novo.

Para determinar o factor correctivo devido às incrustações que possam ocorrer no interior dos tubos foram consultados os valores tipicos de vários factores de sujamento ou de incrustações³, tabela 20, e foi considerado ar comprimido para as incrustações devido ao ar frio, e gases de exaustão para as incrustações devido à passagem do ar quente.

Gás e vapor		
	Hidrogénio	0,00176
	Gases de exaustão de motor	0,00176
	Vapor	0,00009
	Vapor com vestígios de óleo	0,00018
	Vapor de líquido de refrigeração com vestígios de óleo	0,00035
	Vapor de solventes orgânicos	0,00018
	Ar comprimido	0,00035
	Gás natural	0,00018

Figura 20: Factor de incrustações para diferentes fluidos (the-engineering-page.com)

³ Valores retirados de “the- engineering-page.com”, Heat Exchangers, em 18 de Maio de 2011 às 16 horas e 50 minutos.

Para o cálculo da diferença de temperatura média logarítmica foi usada a expressão seguinte:

$$\Delta T_{mL} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} F \quad \text{EQ 3.42}$$

3.2.2 Equipamento

Vários parâmetros são necessários para este dimensionamento (tabela V) e por isso foi elaborada uma área onde o utilizador consegue modificar várias características, e assim ser imediato o cálculo do número de tubos necessários para as condições impostas.

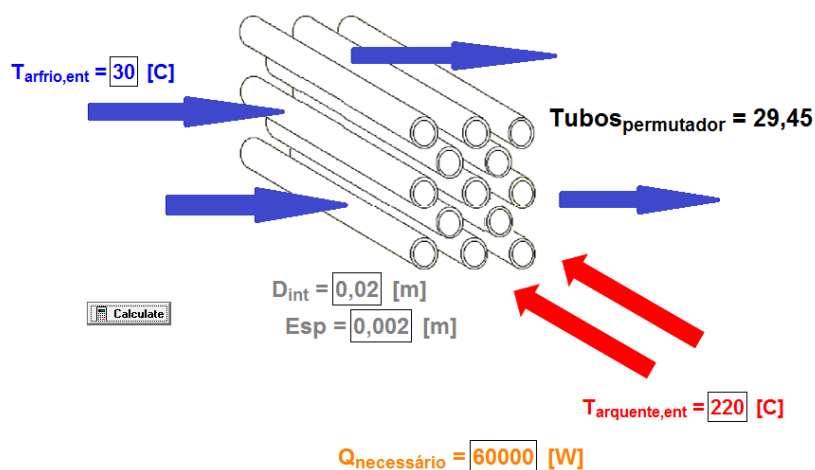


Figura 21: Exemplo de interface do EES - Permutador

Tabela V. Condições de operação no permutador

T. gases comb. (Entrada)	T. gases comb. (Saída)	T. ar frio (Entrada)	T. ar frio (Saída)	Diâmetro int. Tubos	Comp. Tubos	Nº de linhas	Nº de colunas
220 °C	120 °C	30 °C	50 °C	0,02 m	1 m	5	6

Como é possível verificar, para estas condições serão necessários cerca de 30 tubos de maneira a completar a área de transferência de calor necessária.

Unit Settings: [kJ]/[C]/[kPa]/[kg]/[degrees]

$area_{int} = 0.06283 \text{ [m}^2\text{]}$	$A_{tubo,ext} = 0.09425 \text{ [m}^2\text{]}$	$condutibilidade = 17.88 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$	$cp_{arrio} = 1.007 \text{ [kJ/kg}\cdot\text{K]}$	$c_{p,fq} = 1.019 \text{ [kJ/kg}\cdot\text{K]}$
$\Delta P = 41733$	$\delta_{pp} = 1.443 \text{ [kPa]}$	$\Delta I_m = 108.8 \text{ [C]}$	$D_{ext} = 0.03 \text{ [m]}$	$D_{int} = 0.02 \text{ [m]}$
$Esp = 0.002 \text{ [m]}$	$f = 0.07371$	$Fluid\$ = 'Air'$	$h = 211.9 \text{ [W/m}^2\cdot\text{K]}$	$h_H = 30804 \text{ [kW/m}^2\cdot\text{K]}$
$h_T = 30804 \text{ [kW/m}^2\cdot\text{K]}$	$Inc_{arrio} = 0.0005$	$Inc_{ar quente} = 0.0005$	$L_{tubo} = 1 \text{ [m]}$	$\dot{m}_{arrio} = 1.3 \text{ [kg/s]}$
$\dot{m}_{finalq} = 0.7703 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_{fq} = 0.01605 \text{ [kg/s]}$	$Num_{colunas} = 8$	$Num_{linhas} = 6 \text{ [-]}$	$Nusselt = 226.4$
$Nusselt_T = 17216$	$N_{tubos} = 48 \text{ [-]}$	$P_{atm} = 101.3 \text{ [kPa]}$	$Q_{necessário} = 60000 \text{ [W]}$	$Re1 = 64735$
$Re2 = 1.991E+06$	$\rho_{arrio} = 1.059 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$\rho_{ar quente} = 0.7964 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$seccao_{int} = 0.0003142 \text{ [m}^2\text{]}$	$Sec_{arrio} = 0.27 \text{ [m}^2\text{]}$
$Sec_{tubo,ext} = 0.0007069 \text{ [m}^2\text{]}$	$S_L = 0.045 \text{ [m]}$	$S_T = 0.045 \text{ [m]}$	$Tubos_{permutador} = 37.21$	$T_{arrio,ent} = 30 \text{ [C]}$
$T_{arrio,sai} = 90 \text{ [C]}$	$T_{ar quente,ent} = 220 \text{ [C]}$	$T_{ar quente,sai} = 120 \text{ [C]}$	$T_{media,q} = 170 \text{ [C]}$	$U = 14.82 \text{ [kW/m}^2\cdot\text{K]}$
$U_{ar quente} = 64.14 \text{ [m/s]}$	$vel_{arrio} = 4.545 \text{ [m/s]}$	$Vel_{max} = 13.63 \text{ [m/s]}$		

Figura 22: Janela de solução do EES

3.3 Ventilador

De maneira a possibilitar a circulação do ar dentro do equipamento, será instalado um ventilador que forçará a entrada de ar na câmara de secagem, e através de duas válvulas, será regulado o fluxo de ar reaproveitado e pretendido pelo utilizador.

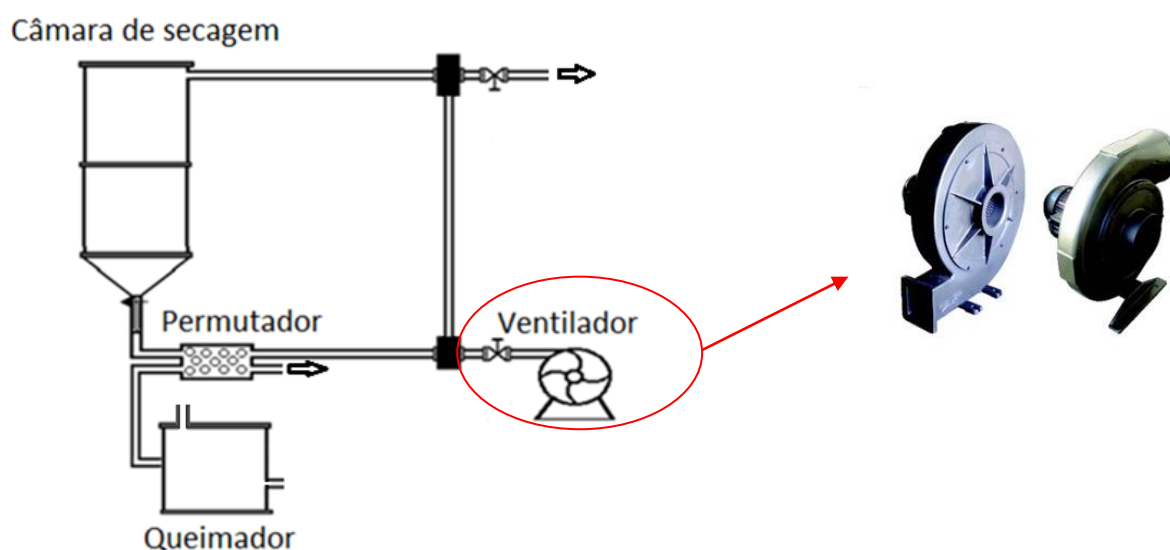


Figura 23: Constituintes do equipamento de secagem – Ventilador de insuflação

Para melhor entender a circulação de ar no interior das condutas é importante neste momento a visualização da figura 24, onde é dada atenção apenas ao transporte e sentido do ar.

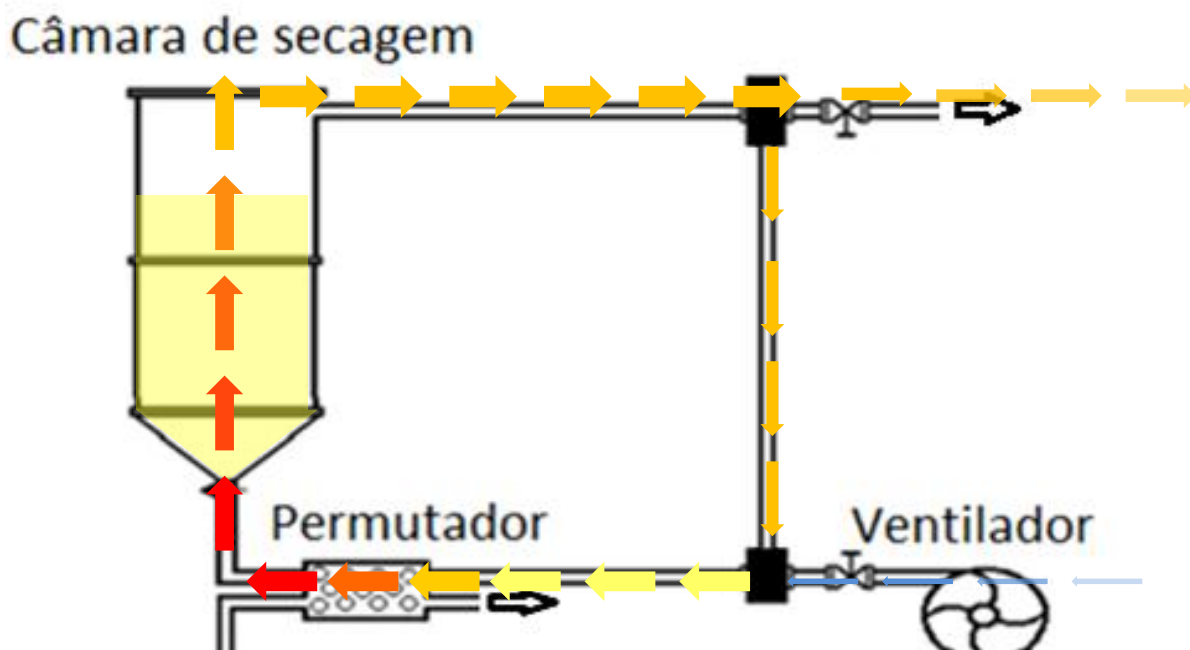


Figura 24: Orientação do escoamento do ar no equipamento

Para o cálculo da potência do ventilador será necessário saber a perda de carga que este terá de vencer. Desprezando as perdas de carga das condutas, serão apenas consideradas as perdas de carga no leito de milho, no permutador e na região cilindro-cônica de entrada da câmara de secagem.

Começando então pelo leito, e com base nos estudos e correlações de Mathur e Epstein (1974), será calculada a perda de carga máxima ou de pico no leito em jorro. Foi considerada esta perda pois como este não é um sistema contínuo, o ventilador terá de ser capaz de superar as fases iniciais de “arranque” diárias e assim proporcionar o jorro do leito, o que irá obrigar ao inconveniente de uma maior potência de ventilação.

Sendo assim:

$$\frac{\Delta P_m}{H \rho_b g} = 1 + 0,062 \left(\frac{D}{D_i} \right)^{2,54} \left(\left(\frac{D}{D_i} \right) - 1 \right) \left(\frac{\tan \theta}{2} \right)^{-0,18} \quad \text{EQ 3.43}$$

Em que:

$$D = D_i + 2 \times H \times \frac{\tan \theta}{2} \quad \text{EQ 3.44}$$

Onde H corresponde à altura do leito, ρ_b à massa volúmica do milho, D e D_i correspondem ao diâmetro da coluna e ao diâmetro da entrada, respectivamente, e θ ao ângulo das paredes do cone de entrada com a vertical.

$$\frac{\Delta P_m}{1,03 \times 1253,5 \times 9,8} = 1 + 0,062 \left(\frac{0,69}{0,4} \right)^{2,54} \left(\left(\frac{0,69}{0,4} \right) - 1 \right) \left(\frac{\tan 15,94}{2} \right)^{-0,18}$$

EQ 3.45

$$\Delta_{p,câmara} = 15\,877,6 \text{ Pa}$$

Apesar de mínima quando comparada com os outros componentes, será agora calculada a queda de pressão em linha no cilindro de entrada da câmara, mais especificamente, recorrendo à expressão de perda de carga em cilindros de paredes lisas, Incropera *et al* (2002):

$$\Delta_p = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2} \rho$$

EQ 3.46

Sendo que L e D são respectivamente altura e diâmetro dos tubos, v a velocidade do fluido e ρ a massa volúmica do fluido, f será função de Reynolds e descoberto com a ajuda do Diagrama de Moody.

Então:

$$\Delta_{p,entrada} = 0,10 \times \frac{0,2}{0,4} \times \frac{0,8^2}{2} \times 1,0308$$

$$\Delta_{p,entrada} = 0,0164 \text{ Pa}$$

Mas é sabido que o permutador de calor fornece também uma perda de carga considerável e por isso é necessária a sua contabilização.

Sendo assim, assumindo que o ar passa perpendicularmente ao feixe de tubos, a equação que apresenta a perda de carga em permutadores com arranjo escalonado de tubos é:

$$\Delta_p = N_l \times x \times \left(\frac{\rho v_{máx}^2}{2} \right) \times f$$

EQ 3.47

Em que N_L corresponde ao número de linhas, x corresponde a um factor de correcção, f é o coeficiente de fricção, $v_{máx}$ e ρ a velocidade máxima do fluido e a massa volúmica do fluido, respectivamente.

Para o factor de correcção e de fricção foi consultado o gráfico da figura 25 retirado de Incropera *et al* (2002) para o presente caso.

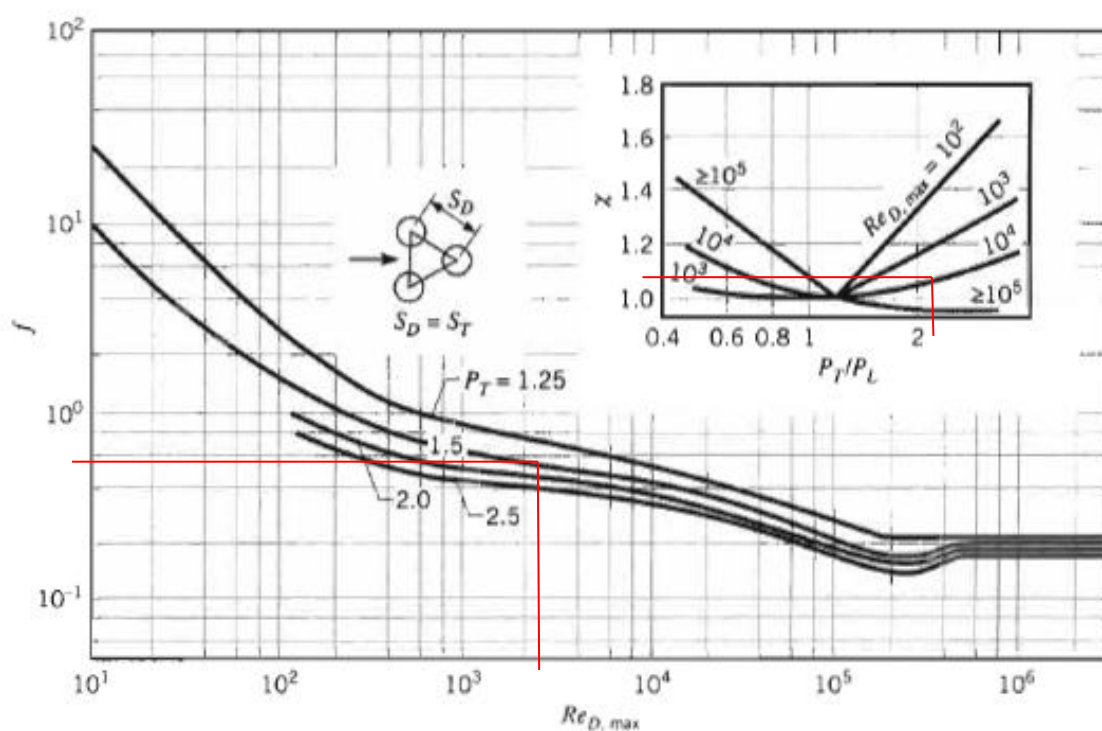


Figura 25: Factor de fricção e de correcção para arranjo escalonado de tubos (Incropera *et al*, 2002)

Então:

$$\Delta_p = 5 \times 1,05 \times \left(\frac{1,03 \times 13,6^2}{2} \right) \times 0,58 \quad \text{EQ 3.48}$$

$$\Delta_{p,permutador} = 290 \text{ Pa}$$

Sendo que a queda de pressão total fica:

$$\Delta_{p,total} = 290 + 15\,877,66 + 0,0164 = 16\,167,67 \text{ Pa} \quad \text{EQ 3.49}$$

Para o cálculo da potência do ventilador necessário para a alimentação do ar à câmara foi inicialmente utilizado um método expedito, pois, sabendo o caudal mássico e calculando a perda de carga na câmara é possível saber a potência necessária.

$$W = \dot{V} \times \Delta_{p,total} = \left(\frac{0,1}{1,0308} \right) \times 16\,167,67 \quad \text{EQ 3.50}$$

$$W = 1\,568,46 \text{ W}$$

Mas na verdade o ar é um fluido compressível e considerando que o escoamento através do ventilador é isotérmico, então:

$$W = R \times T_2 \times \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad \text{EQ 3.51}$$

Então:

$$W = 0,287 \times (30 + 273,15) \times \ln\left(\frac{117525,66}{101300}\right) \quad \text{EQ 3.52}$$

$$W = 1\,703,85 \text{ W}$$

Foi então seleccionado no catálogo da AERO Mack, o ventilador VCE-09, onde este tem capacidade até 50 m³/min, com a potência máxima até 2900 W. A curva de desempenho e algumas características são demonstradas no Anexo C.



Figura 26: Exemplo do ventilador utilizado

A este ventilador deverá estar acoplado um variador de frequência de maneira a controlar a velocidade de rotação do motor e assim regular o caudal de ar de entrada.

3.4 Queimador

Mediante o processo de combustão, será necessário um equipamento que terá por fim realizar a transformação de energia química de um combustível em calor. O combustível será neste caso o gás propano.

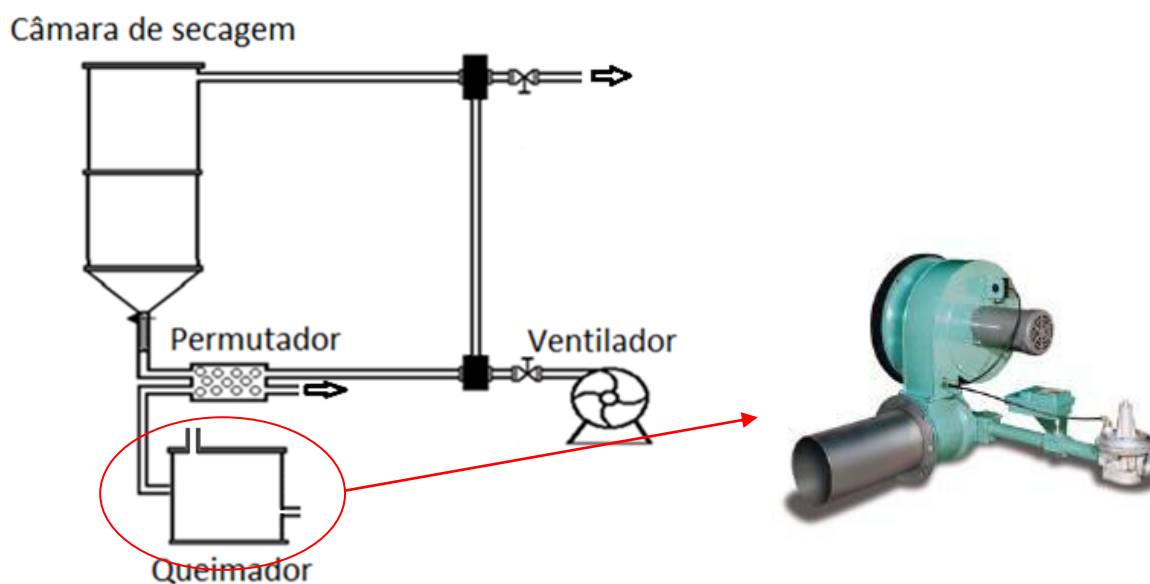


Figura 27: Constituintes do equipamento de secagem - queimador

O objectivo primordial será o cálculo da massa de combustível necessária e entender se este combustível é vantajoso em termos económicos quando comparado com o uso da electricidade comum.

É importante desde já referir que a temperatura de 220 °C necessária no permutador (para o aquecimento do ar frio) é possível devido à mistura dos gases de combustão com ar frio proveniente do exterior, pois é perceptível, que se os gases fossem enviados directamente do queimador para o permutador, iria provocar estragos devido à alta temperatura a que este se

encontra. Sendo assim, e não aprofundando esta matéria, a figura 28 é uma representação grosseira do que se passa na realidade.

Com a consulta à figura 28, são perceptíveis as temperaturas de funcionamento no queimador:

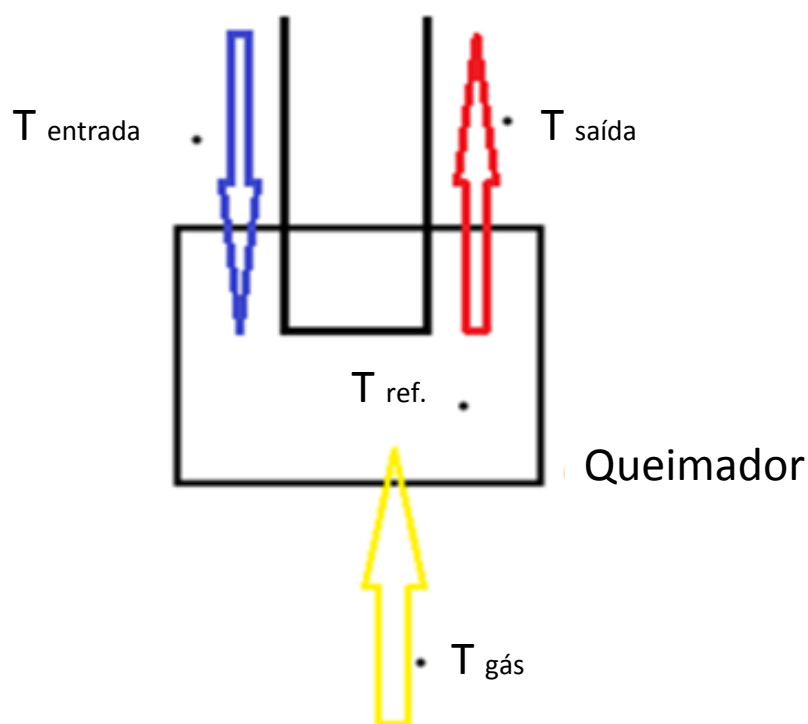


Figura 28: Temperaturas no interior do queimador.

Onde:

$T_{ref.}$ - Temperatura de referência de combustão de 25 °C (Abbott *et al.*, 2001);

$T_{gás}$ - Temperatura ambiente;

$T_{entrada}$ - Temperatura do ar de entrada no queimador;

$T_{saída}$ - Temperatura dos gases de combustão com ar de diluição.

Realizando um balanço energético ao queimador e considerando uma combustão completa, chega-se a que:

$$-\dot{Q} = (m_{CO_2} \times C_{p,CO_2} + m_{H_2O} \times C_{p,H_2O} + m_{O_2} \times C_{p,O_2} + m_{N_2} \times C_{p,N_2}) \times (T_{perm} - t_{ref}) - PCI \times m_{comb} - m_{ar} \times C_{p,ar} \times (T_{ar} - t_{ref}) - C_{p,comb} \times (T_{comb} - T_{ref}) \times \dot{m}_{comb} \quad \text{EQ 3.53}$$

São importantes algumas considerações relativamente a este balanço:

- O calor específico dos produtos é constante na gama de temperaturas considerada, de maneira a uma simplificação analítica,
- Foi considerada que a pressão de combustão é a pressão ambiente de referência, ou seja, 1 bar, de maneira a aplicar a consideração de que $\Delta H = Q$.

Mais uma vez o programa EES foi fundamental no fornecimento de alguns dados necessários para o cálculo, mais propriamente calores específicos e entalpias dos produtos da combustão.

Para o cálculo da massa de combustível (gás propano), da massa de ar e do PCI do gás, foi consultada a sebenta de Pinho (2011).

$$m_{comb} = 1 \times (N_{MC} \times \text{massa molar } C + N_{MH} \times \text{massa molar } H) \quad \text{EQ 3.54}$$

$$m_{ar} = \left[\left((1 + e) \times \left[N_{MC} + \frac{N_{MH}}{4} \right] \right) \times (1 + 3,76) \right] \times \text{massa molar } Ar \quad \text{EQ 3.55}$$

$$PCI = PCS - \frac{m_{H_2O}}{m_{comb}} \times h_{lv} \quad \text{EQ 3.56}$$

Foi elaborada também uma pequena aplicação, visualizada na figura 29, para verificar o comportamento da queima do combustível com a alteração de alguns parâmetros.

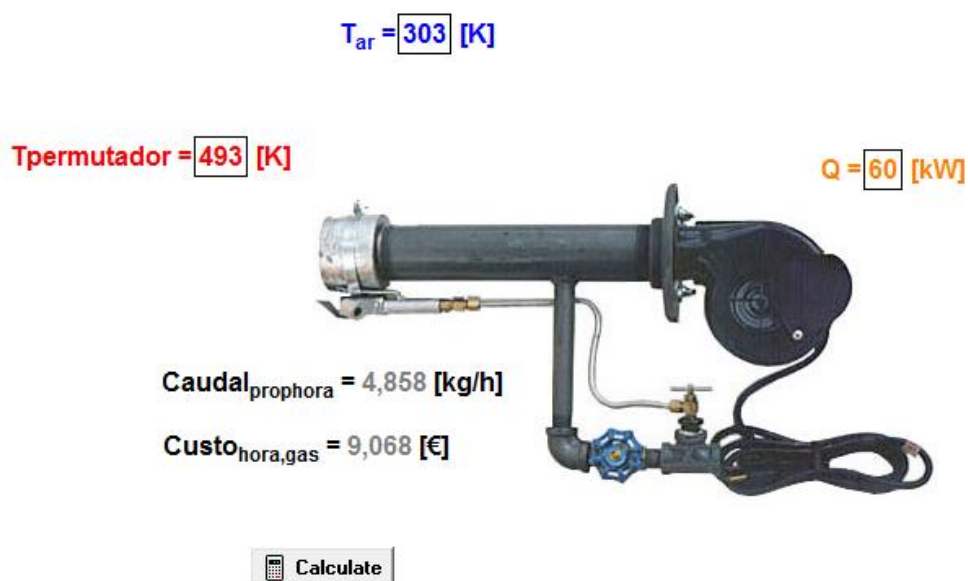


Figura 29: Exemplo de interface do EES – queimador

Tabela VI. Condições de operação no queimador

T. ar (Entrada)	T. ar (saída)	Combustível	Potência do queimador
30 °C	220 °C	Propano	60 kW

Pode seguidamente ser vista a tabela de valores fornecida pelo EES, figura 30:

Unit Settings: [kJ]/[K]/[bar]/[kg]/[degrees]

$\text{caudal}_{\text{comb}} = 0.001419 \text{ [kg/s]}$	$\text{caudal}_{\text{comb,H}} = 0.00135 \text{ [kg/s]}$	$\text{Caudal}_{\text{prophora}} = 4.86 \text{ [kg/h]}$	$\text{Cp}_{\text{ar}} = 1.005 \text{ [kJ/kg·K]}$	$\text{Cp}_{\text{CO}_2} = 0.9324 \text{ [kJ/kg·K]}$
$\text{Cp}_{\text{comb}} = 1.644 \text{ [kJ/kg·K]}$	$\text{Cp}_{\text{H}_2\text{O}} = 1.895 \text{ [kJ/kg·K]}$	$\text{Cp}_{\text{N}_2} = 1.042 \text{ [kJ/kg·K]}$	$\text{Cp}_{\text{O}_2} = 0.9377 \text{ [kJ/kg·K]}$	$\text{Custo}_{\text{hora,electricidade}} = 7.636$
$\text{Custo}_{\text{hora,gas}} = 8.101 \text{ [€]}$	$\text{Custo}_{\text{propano}} = 1.667 \text{ [€]}$	$e = 0.2$	$\text{har} = 303.4 \text{ [kJ/kg]}$	$\text{har}_r = 293.4 \text{ [kJ/kg]}$
$h_{\text{CO}_2} = -8857 \text{ [kJ/kg]}$	$h_{\text{CO}_2,r} = -8945 \text{ [kJ/kg]}$	$h_{\text{H}_2\text{O}} = -13244 \text{ [kJ/kg]}$	$h_{\text{H}_2\text{O},r} = -13432 \text{ [kJ/kg]}$	$h_{\text{N}_2} = 98.81 \text{ [kJ/kg]}$
$h_{\text{N}_2,r} = -5.361 \text{ [kJ/kg]}$	$h_{\text{O}_2} = 87.88 \text{ [kJ/kg]}$	$h_{\text{O}_2,r} = -4.749 \text{ [kJ/kg]}$	$\text{KWH} = 0.1273$	$m_{\text{ar}} = 827.3 \text{ [kg]}$
$M_C = 12 \text{ [kg/kmol]}$	$m_{\text{CO}_2} = 132 \text{ [kg]}$	$m_{\text{comb}} = 44.06 \text{ [kg]}$	$\dot{m}_1 = 0.028 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_2 = 0.521 \text{ [kg/s]}$
$\dot{m}_3 = 0.549 \text{ [kg/s]}$	$m_{\text{H}_2\text{O}} = 72.06 \text{ [kg]}$	$m_{\text{N}_2} = 632 \text{ [kg]}$	$m_{\text{O}_2} = 32 \text{ [kg]}$	$\text{PCI} = 46387 \text{ [kJ/kg]}$
$\text{PCS} = 50400 \text{ [kJ/kg]}$	$\text{Preco}_{45\text{Kg,propano}} = 75 \text{ [€]}$	$Q = 60 \text{ [kW]}$	$T_{\text{med}} = 393 \text{ [K]}$	$T_{\text{permutador}} = 493 \text{ [K]}$
$T_{\text{sai}} = 393 \text{ [K]}$	$T_{\text{ar}} = 303 \text{ [K]}$	$T_{\text{comb}} = 293 \text{ [K]}$	$T_{\text{ref}} = 293 \text{ [K]}$	$x = 3 \text{ [kmol]}$
$y = 8 \text{ [kmol]}$				

Figura 30: Janela de soluções referentes ao queimador

Foi também seleccionado um queimador de maneira cumprir com as necessidades deste processo.

Foi consultado um catálogo da reconhecida marca italiana CUENOD Thermotechnique, e escolhido o modelo NC.6 GX, a gás propano. Algumas das características estão representadas no Anexo D.



Figura 31: Ilustração do modelo de queimador utilizado (Catálogo Cuenod - NC.6 GX).

Capítulo 4 – Avaliação Final dos Resultados

Capítulo 4. Avaliação final dos resultados

Foi elaborada uma verificação para avaliar a consistência do estudo e entender se o modelo, dentro do seu domínio de aplicação, se comporta de maneira suficientemente satisfatória em relação aos objectivos dos estudos teóricos consultados ao longo deste trabalho. Com os valores fornecidos pelo EES ao longo do tempo da secagem, é possível visualizar facilmente a conduta de determinados aspectos através da realização de gráficos do comportamento de uma característica particular.

4.1 Propriedades do milho e do ar de secagem

É de referir que toda a modelação foi efectuada baseada em condições específicas de funcionamento e com o objectivo de secar 60 toneladas por dia de grãos de milho, e por isso é importante mencionar essas condições:

- Foram consideradas como condições exteriores, a temperatura ambiente de 20 °C e humidade relativa de 50%;
- As condições do grão foram baseadas nas experiências utilizadas, onde este possuía uma humidade inicial média de entrada de 25,5 % e um diâmetro de 4 milímetros;
- Em relação ao ar de secagem, este foi adaptado para cumprir com o objectivo, e apesar da temperatura de entrada ser de 50 °C, a mesma que utilizada nas experiências, a velocidade foi alterada para 0,76 m/s;
- A carga por etapa utilizada foi a já referida de 20 toneladas, porque se estimou que cada carga levaria 1 hora e 30 minutos a secar e que se poderiam processar 3 cargas por dia perfazendo o total de 60 t/dia.

Então, como parâmetros iniciais consideraram-se os apresentados na tabela VII:

Tabela VII. Parâmetros do processo

T. ar Ambiente	T. ar entrada	Velocidade do ar (Entrada)	Humidade exterior	Humidade do grão	Percentagem de recirculação
20°C	50°C	0,76 m/s	50%	25,5 %	0,6

Um dos aspectos mais importantes é efectivamente o tempo necessário ao milho para descer da humidade de 25,5 % para os 14,5 % impostos pelo mercado.

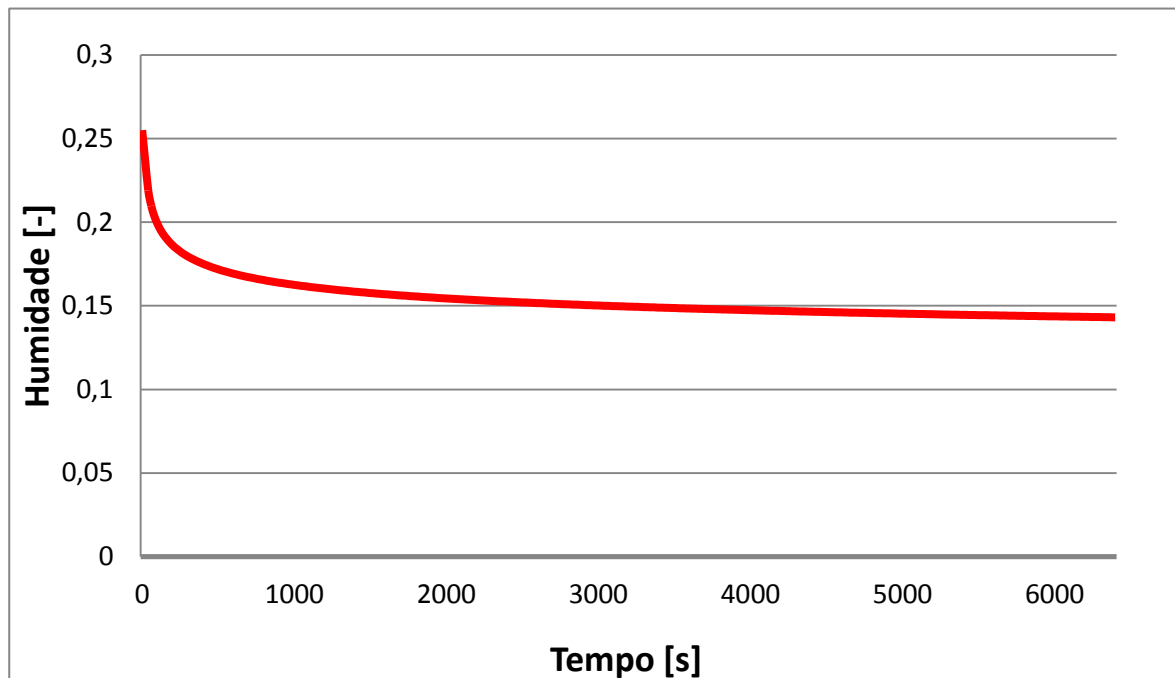


Figura 32: Curva de secagem para milho

Devido à equação do comportamento da humidade (equação 3.27) de um grão de milho, é possível a elaboração do gráfico anterior, e pela sua análise, é verificado que para o milho atingir os 14,5% de humidade demora pouco mais de 5000 segundos, mas mais especificamente, pela consulta da tabela fornecida pelo EES (figura 33), é sabido que demora 5160 segundos, perfazendo um total de 1 hora e 43 minutos, mais do que foi estimado anteriormente mas perfeitamente dentro do limite de tempo de 2 horas e 10 minutos por carga.

.4	113.3	23.24	54.75	31.59	5080	13.35	34.81	0.0193	0.03954	0.1452
.2	113	23.2	54.5	31.62	5100	13.41	34.84	0.01923	0.03938	0.1451
.1	112.6	23.16	54.25	31.64	5120	13.46	34.86	0.01917	0.03923	0.1451
.9	112.3	23.12	54	31.67	5140	13.52	34.89	0.01911	0.03907	0.1451
74	112	23.07	53.75	31.7	5160	13.57	34.91	0.01905	0.03892	0.145
58	111.6	23.03	53.51	31.73	5180	13.63	34.94	0.01898	0.03876	0.145
42	111.3	22.99	53.27	31.76	5200	13.69	34.96	0.01892	0.03861	0.145
27	111	22.95	53.03	31.79	5220	13.74	34.99	0.01886	0.03846	0.1449
11	110.7	22.91	52.79	31.81	5240	13.8	35.01	0.0188	0.03831	0.1449
6	110.4	22.87	52.55	31.84	5260	13.85	35.04	0.01874	0.03816	0.1448
.8	110	22.83	52.32	31.87	5280	13.91	35.06	0.01869	0.03801	0.1448

Figura 33: Valores exemplo do EES

Foi também calculada a temperatura interna do grão com o decorrer do seu decréscimo de humidade, tendo em consideração o balanço térmico explicitado pela equação 3.2, cujo comportamento é representado na figura 34.

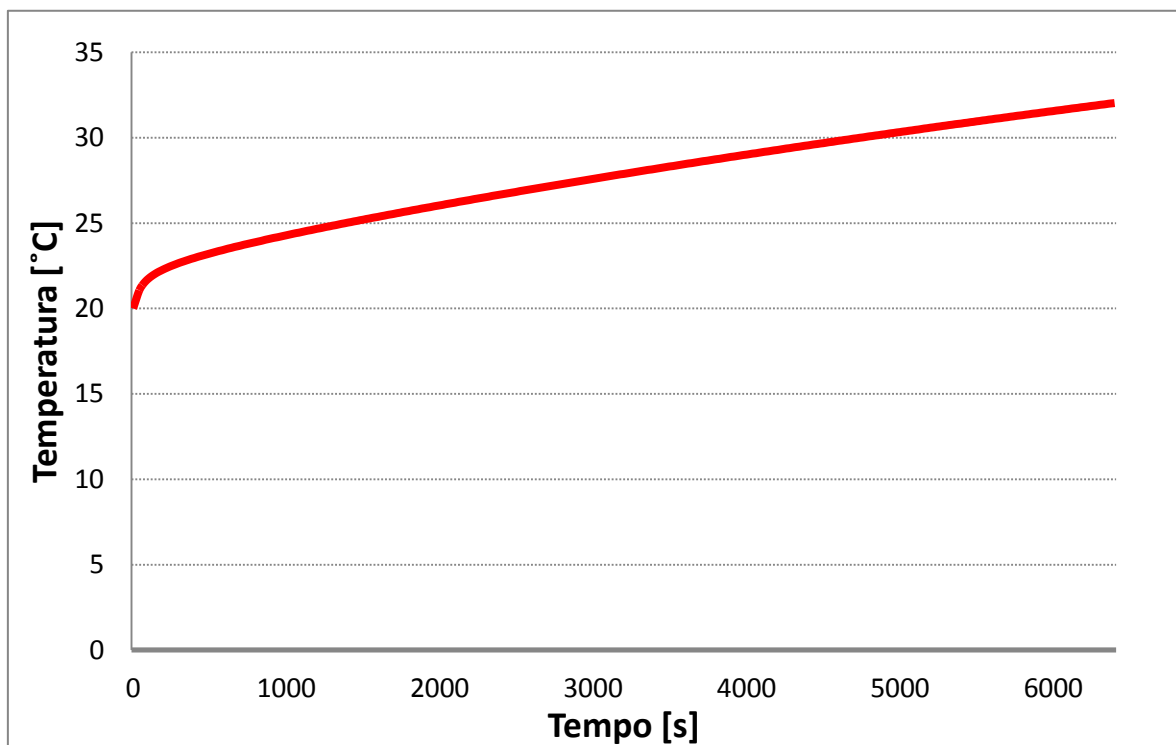


Figura 34: Variação da temperatura do grão com o tempo

Como era de esperar, a sua temperatura inicial de colheita de 20 °C sobe exponencialmente tendendo para a temperatura do ar de entrada.

Continuando a avaliar o desempenho do secador apresenta-se agora a evolução, ao longo do tempo, da temperatura do ar à saída, figura 35.

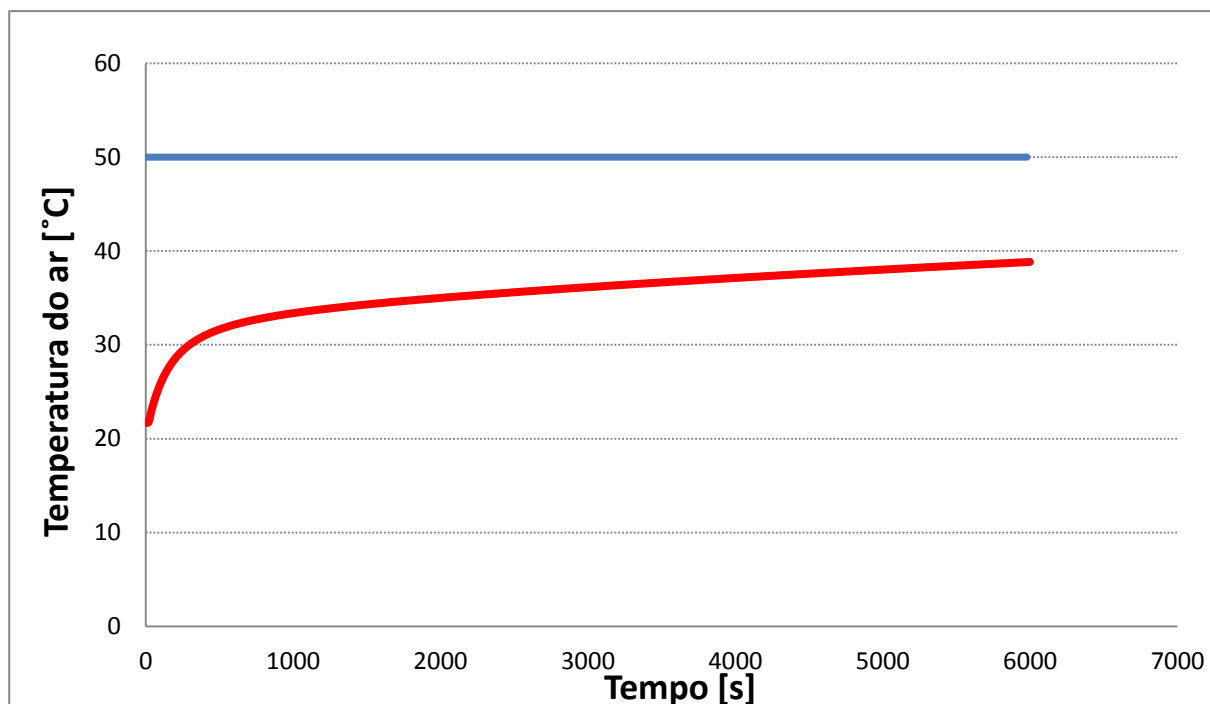


Figura 35: Variação da temperatura ar de entrada (a azul), e respectiva temperatura de saída (a vermelho)

Relativamente à temperatura do ar é possível identificar (figura 35) a linha a azul como a temperatura constante imposta ao ar de entrada a 50 °C. A temperatura do ar à saída da câmara, representada a vermelho, tende a subir pois há menor transferência de calor para as partículas à medida que o processo de secagem avança no tempo e consequentemente há menor extracção de humidade de modo que a energia térmica associada ao ar é transferida cada vez em menor quantidade, ou seja, este passa a sair cada vez mais quente.

A título de resumo, a figura 36 foi elaborada agrupando as informações disponíveis do ar nas diferentes etapas do processo e assim ser mais acessível a comparação.

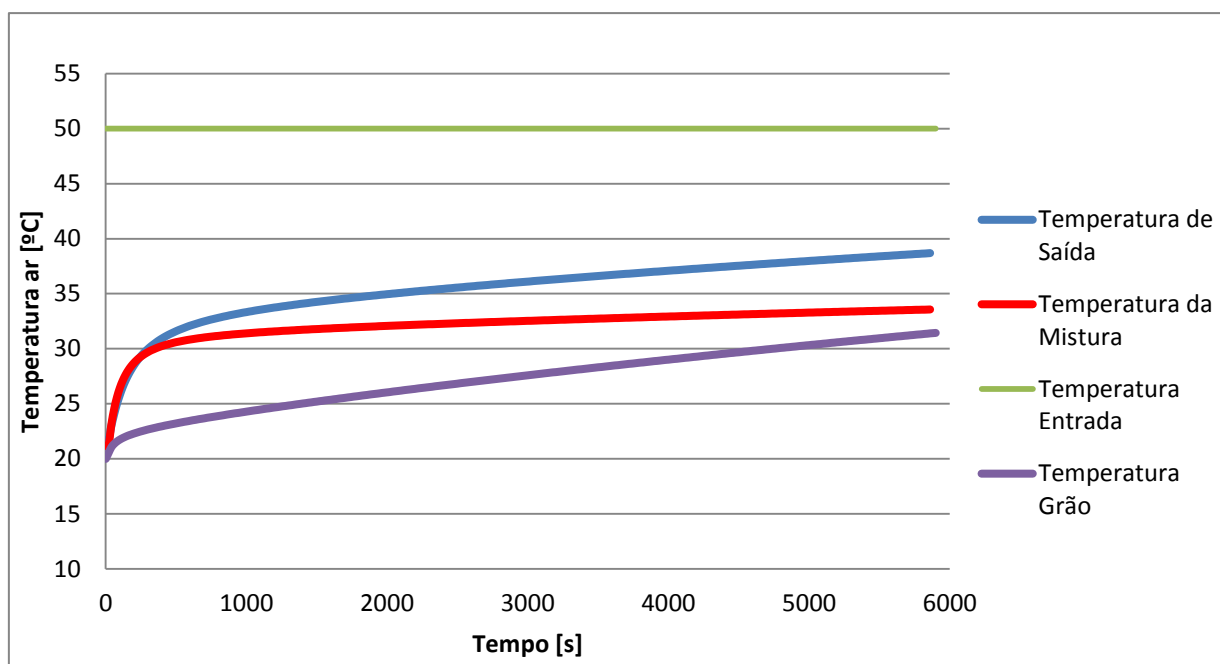


Figura 36: Variação da temperatura do ar em diferentes etapas do processo

Através da figura 36 é melhor visualizado o comportamento das diferentes temperaturas no mesmo instante temporal e nas diferentes etapas do processo.

A temperatura que ainda não foi falada e que pode ser vista na figura 36 é a temperatura do ar depois da mistura com o ar novo (temperatura de mistura, linha vermelha).

É possível reparar que esta temperatura tende mais lentamente para a temperatura imposta de entrada de 50 °C quando comparada com a temperatura de saída, mas é importante não esquecer que este ar é uma mistura de ar recuperado e ar novo inserido a 20 °C, e por isso, devido a este facto, o comportamento irá variar mais notoriamente consoante o coeficiente de recuperação for alterado.

É seguidamente representado o comportamento da humidade absoluta do ar longo tempo, figura 37.

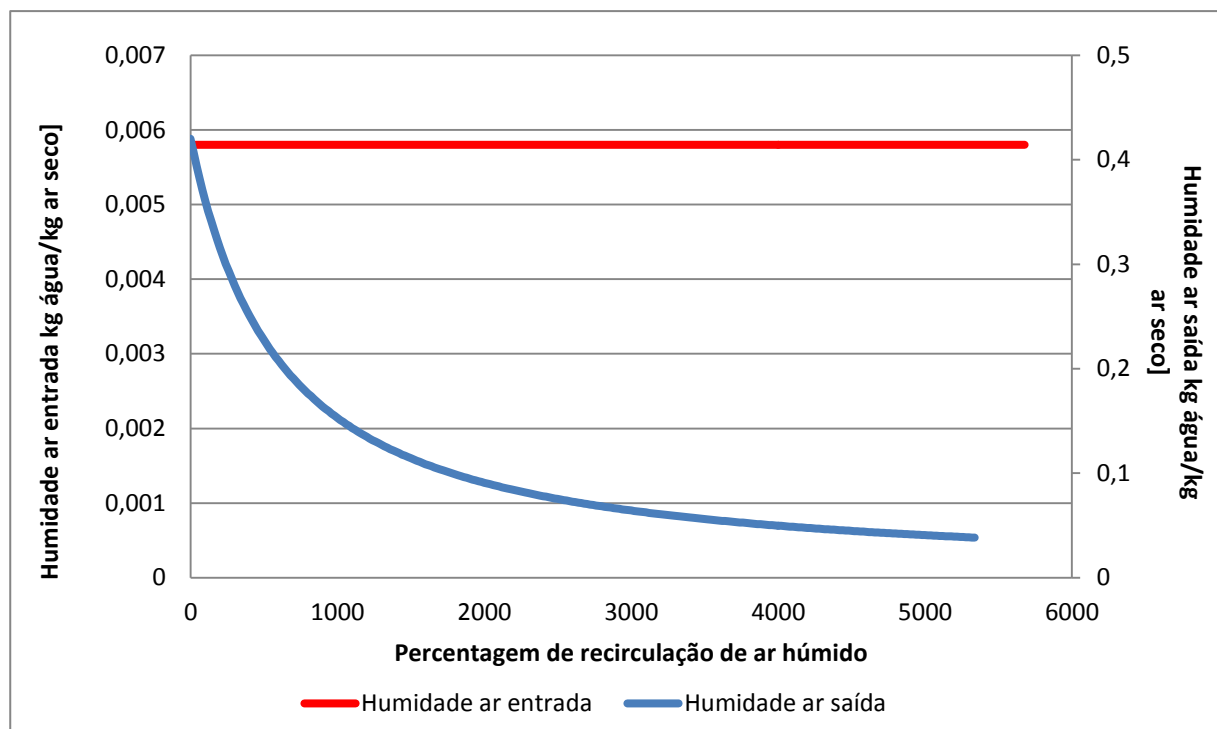


Figura 37: Gráfico do comportamento da humidade do ar, humidade do ar de saída (azul) e humidade do ar de entrada (vermelho)

Como esperado, a humidade absoluta à saída tende a aproximar-se da sua humidade de entrada e com uma escala mais elevada e mais passos temporais era possível verificar-se tal aproximação assintótica.

Analisando este aspecto, é visível que ao longo do tempo de secagem, existe uma menor percentagem de água a retirar do milho, sendo de esperar que no início a humidade do ar à saída seja elevada, mas que vá diminuindo tal como a percentagem de água da carga, ou seja, a taxa de extracção de água reduz-se ao longo do tempo.

As humidades referidas são absolutas, assim sendo, como o aquecimento do ar pelo permutador é sensível, a humidade absoluta ambiente é igual à humidade depois do ar aquecido e é maior depois da passagem pelo milho. Este comportamento é importante, e para ser melhor interpretado é apresentada a sua variação no diagrama psicrométrico, antes do permutador, depois deste, e à saída da câmara de secagem.

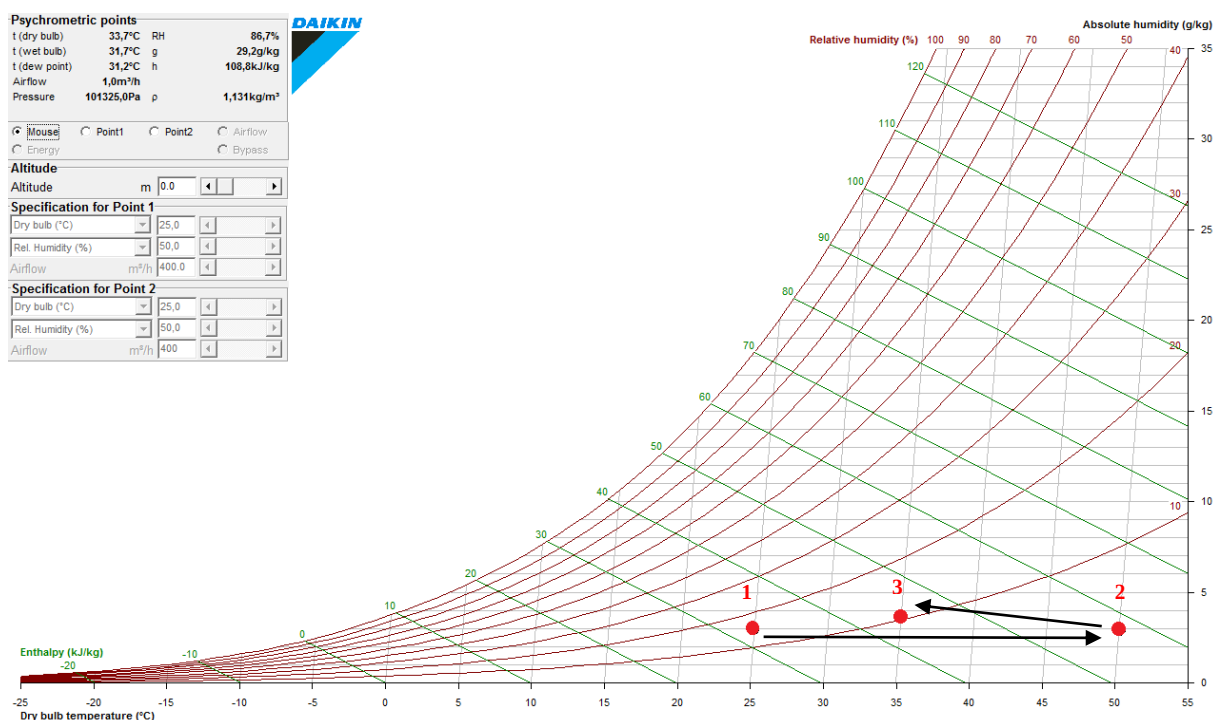


Figura 38: Exemplo da humidade num ponto aleatório – Diagrama psicrométrico (1-ar depois da mistura, 2-ar depois do permutador, 3-ar à saída da câmara)

De acordo com o diagrama apresentado (figura 38) e relativamente a um espaço temporal aleatório (por exemplo aos 600 segundos), é possível verificar que no ponto 1, referente ao estado do ar depois da mistura, este se encontra razoavelmente quente e com alguma humidade, mas depois da evolução sensível ao passar no permutador, esta temperatura sobe para a temperatura imposta de 50 °C, mantendo-se a humidade absoluta mas logicamente reduzindo-se a humidade relativa. Depois da passagem pela câmara de secagem, naturalmente o ar arrefece e ganha humidade, como representado no ponto 3. Este comportamento repete-se ao longo de todo o processo, embora existam variações na linha que liga os pontos 2 e 3 já que a localização deste ponto 3 vai mudando ao longo do processo de secagem devido à redução da quantidade de água extraída da carga de milho com o tempo. Assim as posições destes pontos estariam diferentemente situados se o espaço temporal utilizado fosse outro, como no início ou fim da secagem.

4.1.1 Comentário

Foi verificado que todos os comportamentos resultantes são os esperados e que as principais alterações físicas ocorrem nos primeiros minutos do processo, estabilizando-se com o decorrer do tempo.

Os valores dados pela equação encontrada para a caracterização da curva de secagem do grão de milho corresponderam às expectativas, apesar de ser importante referir mais uma vez que apenas é aplicável a dois tipos de milho.

Todos os gráficos apresentados têm como limite os 6000 segundos aproximadamente. Isto acontece para ser mais perceptível o comportamento das propriedades em termos de escala. Foram ainda efectuados outros testes do funcionamento deste programa para diferentes condições operacionais, como por exemplo considerando o aumento da velocidade do ar de maneira a secar o milho mais rapidamente, apenas com o propósito de verificar alguns aspectos lógicos, como a temperatura do milho e do ar de saída nunca superar a temperatura de entrada, ou a humidade de saída não ser inferior à humidade ambiente, bem como outros aspectos funcionais, como os valores máximos da humidade em vários pontos e a potência necessária de aquecimento.

O resultado foi satisfatório conferindo assim alguma consistência ao programa, e podem ser visualizados os últimos passos temporais cedidos pelo EES nesta experiência em forma de tabela no Anexo B deste trabalho.

4.2 Potência de aquecimento

Relativamente à potência necessária para aquecer o ar de entrada, esta é também variável com o tempo e expectável a sua descida devido às condições do ar de recirculação.

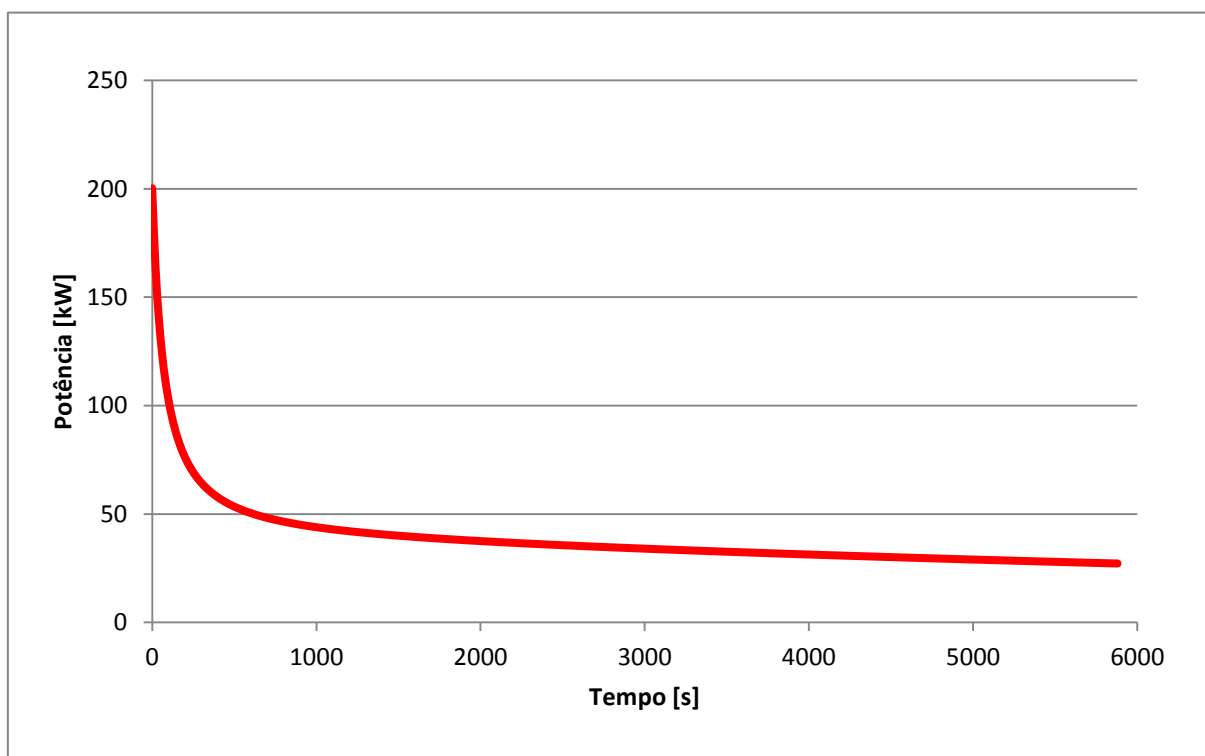


Figura 39: Comportamento da potência de aquecimento

Como é visível, a potência necessária decresce com o aumento do tempo de secagem, o que era de esperar visto o ar a ser recepcionado estar cada vez mais quente, devido ao grau de recirculação empregue e ao aquecimento e secagem do leito de grãos que ocorre ao longo do tempo. Por isso menos potência é requerida para o seu aquecimento à medida que a secagem se processa.

É visível também no gráfico que a potência necessária no início do processo é de 220 kW, o que na prática adquirir um equipamento para esta potência não é viável, tanto que esta só é necessária nos primeiros minutos utilização.

Isto acontece pois este não é um processo de secagem em regime permanente e por isso há interrupções entre cargas, logo é essencial a estabilização do equipamento no início de funcionamento.

Sendo assim, ao tempo total necessário para a secagem será acrescentado o tempo dessa estabilização, fornecendo assim ao cliente um tempo máximo mais preciso, sobredimensionando também o equipamento pois o tempo entre cargas não será o suficiente para as propriedades da máquina voltarem aos valores ambientes.

Para determinar então a potência necessária foi verificado que a exponencial não apresenta um forte patamar de estabilização mas num certo momento a descida de potência é menos acentuada, entre os 650 e 700 segundos. Com a consulta do programa efectuado é visível que a estabilização ocorre nesses momentos e tende para os 55 kW. Como referido na secção 3.4 – Queimador, o modelo seleccionado possui 60 kW disponíveis.

Sendo assim, esta será a potência do queimador de maneira a não adquirir um equipamento mais potente mas que apenas é necessário nos primeiros minutos de utilização.

4.2.1 Comentário

Relativamente à potência, o seu comportamento foi também o esperado, no entanto, uma outra solução era também reformular o programa elaborado de maneira a impor uma potência de aquecimento constante e fazer variar a temperatura de entrada do ar na câmara, apesar de teoricamente aumentar o consumo energético pois o equipamento estaria sempre a fornecer a mesma potência imposta. Esta ideia foi tentada, mas problemas do EES devido ao baixo limite de incógnitas possíveis na versão disponibilizada pela FEUP aos alunos, não foram conseguidos resultados.

Aumentando então o tempo de estabilização de 680 segundos aos 5180 segundos do tempo de secagem perfaz um total de 1 hora e 43 minutos de funcionamento.

4.3 Perdas de calor

Um factor também importante é a quantidade de calor libertado devido a perdas do sistema pois é potência perdida, e consequentemente um peso económico está associado. Estas perdas foram calculadas considerando posteriormente o sistema não adiabático e com o recurso à expressão 4.1.

$$Q_{perdas} = \frac{T_e - T_{ext}}{\frac{1}{\alpha_{int} \times r_1 \times 2 \times \pi \times L_{re}} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \times \pi \times L \times K_{aço}} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2 \times \pi \times L_{re} \times K_{isolamento}} + \frac{\ln \frac{r_4}{r_3}}{2 \times \pi \times L_{re} \times K_{alum}} + \frac{1}{\alpha_{ext} \times r_4 \times 2 \times \pi \times L_{re}}}$$

EQ 4.1

Na equação anterior, α_{int} e α_{ext} correspondem respectivamente à convecção interior e exterior da câmara de secagem e foram calculados com o recurso mais uma vez às rotinas fornecidas pelo programa EES (Pipe_Flow para a convecção interior, considerada convecção forçada, e para o parâmetro da convecção exterior, considerada convecção natural).

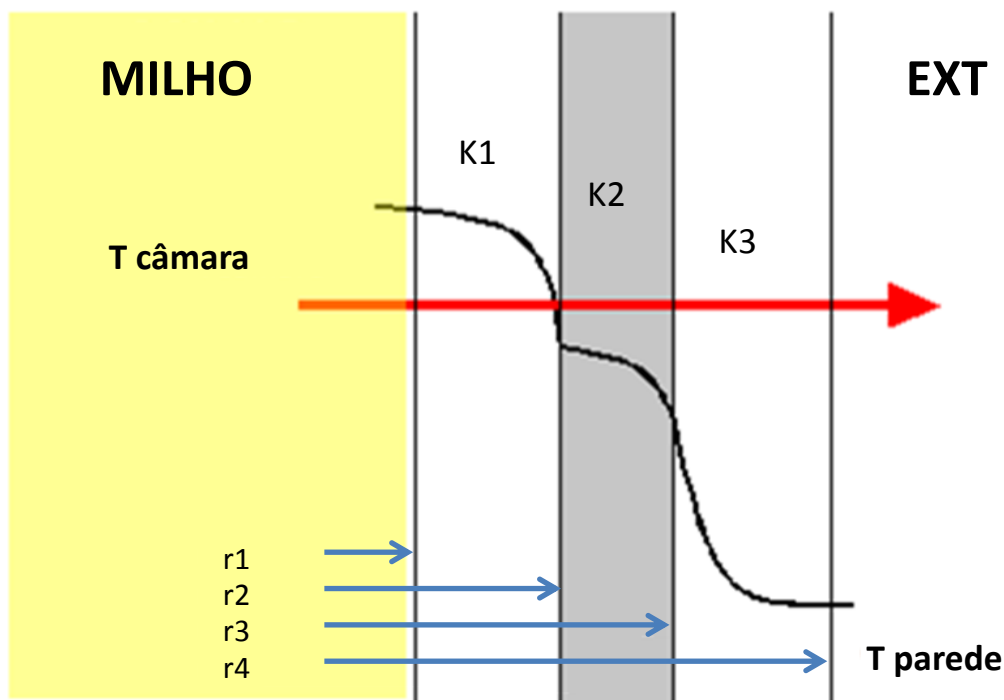


Figura 40: Transferência de calor no interior da câmara

Pela consulta à figura 40 são também perceptíveis as dimensões r_1 , r_2 , r_3 e r_4 presentes na equação 4.1.

Sendo assim, foi feito um estudo em que foram mudados alguns parâmetros importantes no processo, como a espessura de isolamento (figura 41), temperatura de entrada do ar (figura 42), velocidade do ar de entrada (figura 43), e variação da carga utilizada (figura 44).

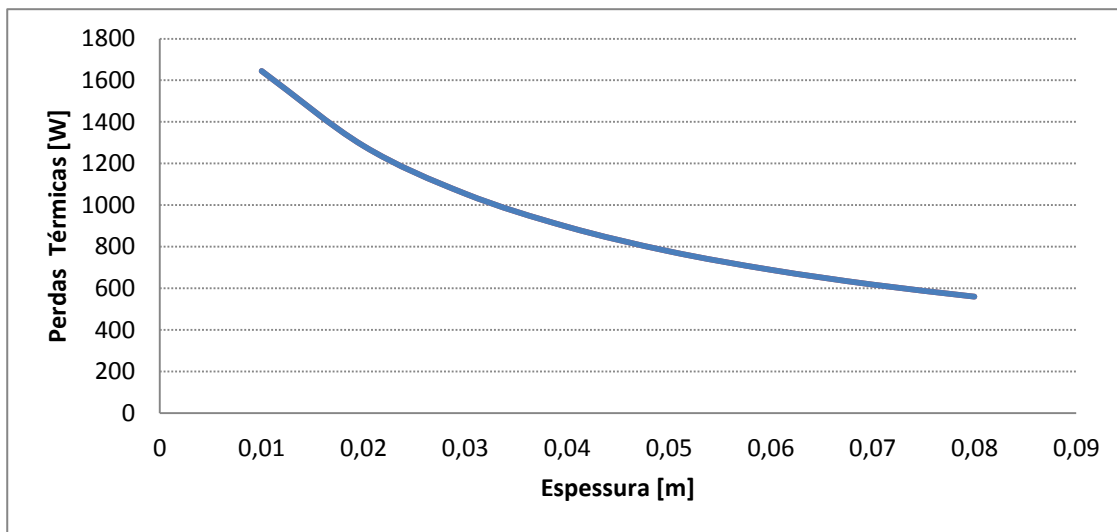


Figura 41: Evolução das perdas térmicas com a mudança da espessura de isolamento

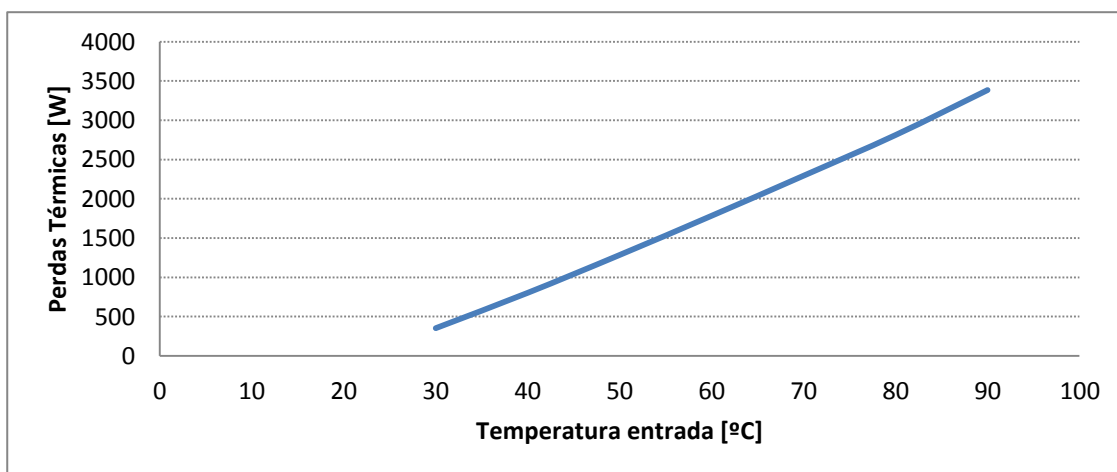


Figura 42: Evolução das perdas térmicas com a mudança da temperatura do ar de entrada

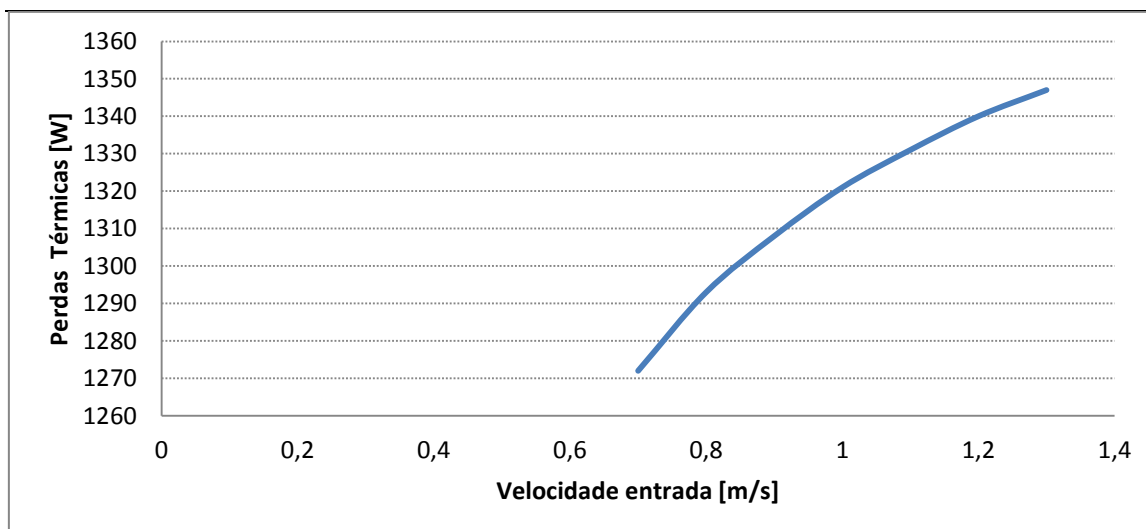


Figura 43: Evolução das perdas térmica som a mudança da velocidade do ar entrada

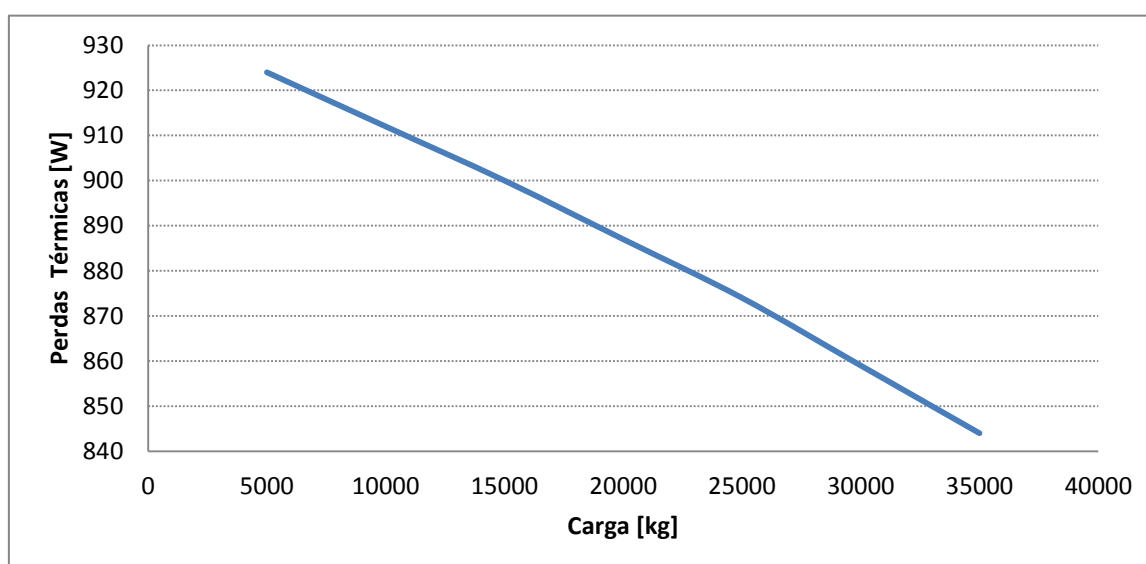


Figura 44: Evolução das perdas térmicas com a quantidade de carga utilizada

É visível a maior ou menor importância de cada parâmetro na evolução das perdas. A espessura do isolamento desempenha um papel importante no isolamento do calor, mas que é facilmente ultrapassado pela evolução da temperatura do ar de entrada na câmara, pois por cada 10 °C de aumento são perdidos cerca de 500 W de potência calorífica (figura 42).

É também verificado na figura 43, que para um aumento da velocidade de entrada, as perdas caloríficas também aumentam. Este facto deve-se a que o aumento da velocidade provoca o aumento do coeficiente de convecção interior o que logicamente eleva as perdas caloríficas.

Capítulo 5 – Funcionamento do Secador Sob Diferentes Condições de Operação

De maneira a compreender a interacção dos parâmetros constituintes do estudo, a sua variação entre estes é importante na medida em que possibilita a análise de cada um desses parâmetros e assim perceber a sua importância no processo de secagem.

Capítulo 5. Funcionamento do secador sob diferentes condições de operação

Como já foi referido, os parâmetros utilizados foram ao encontro das necessidades de secagem impostas, mas de maneira a perceber se realmente o comportamento de determinado factor ou condição, é importante o seu estudo e consequentemente a sua variação, pois mais facilmente é perceptível a sua contribuição no sistema.

Sendo assim foram efectuados estudos para diferentes condições operacionais, com a sua apresentação gráfica para uma melhor visualização.

Foi optado por variar cada parâmetro individualmente de maneira a entender a sua importância, ou seja, em cada simulação apenas foi um parâmetro alterado.

5.1 Câmara de secagem

5.1.1 Variação da velocidade do ar de entrada

Foi pensada a variação deste parâmetro pois além da velocidade do ar transferir a energia térmica para o milho, a fim de evaporar a água, também retira o vapor de água evaporada da superfície do grão e transporta-a para o exterior, não esquecendo que ao aumento da velocidade do ar à entrada da câmara corresponde um aumento do caudal de ar de secagem.

Para os mesmos parâmetros foi então variada a velocidade do ar à entrada da câmara para os valores de 0,6, 0,7 e 0,9 m/s.

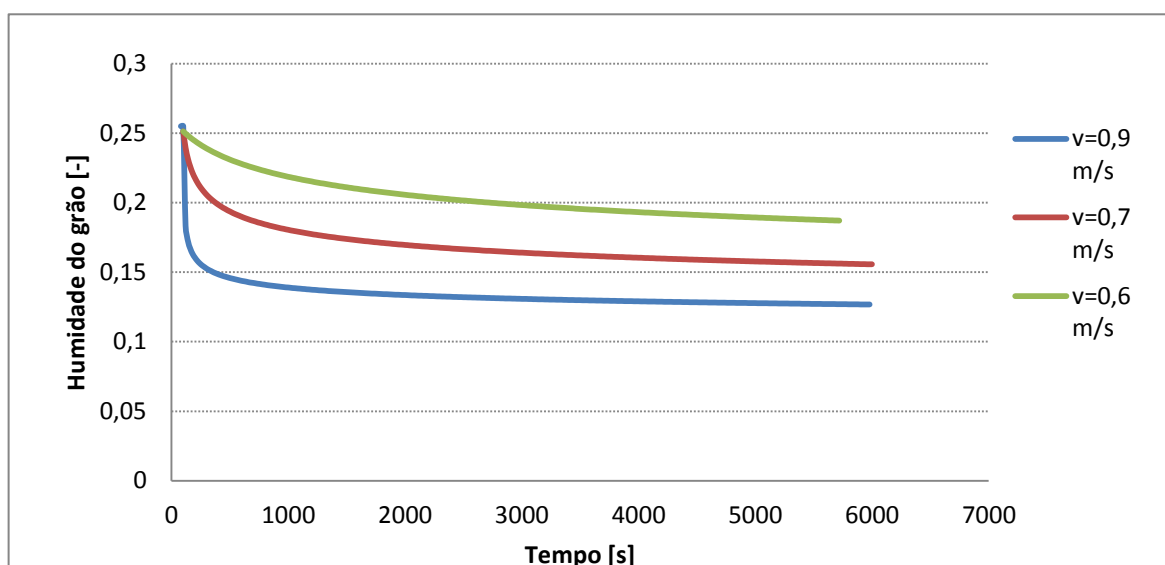


Figura 45: Variação da humidade do grão para diferentes velocidades de ar de entrada

Como era esperado, o tempo de secagem é menor com o aumento da velocidade, pois além da secagem do milho depender fortemente da velocidade, esta é também usada no cálculo do coeficiente de convecção exterior ao grão, o qual, como é conhecido, é função da velocidade.

É possível ver, por exemplo, que para as condições enunciadas, uma velocidade de 0,6 m/s evitaria o uso de um potente ventilador mas era inviável o tempo de secagem proposto, sendo que seria necessário alterar outras características.

É necessário no entanto ter em atenção os limites mínimo e máximo de velocidades superficiais no leito para uma correcta secagem, sendo que para a velocidade do ar de entrada mínima utilizada de 0,6 m/s, o jorro ainda é possível.

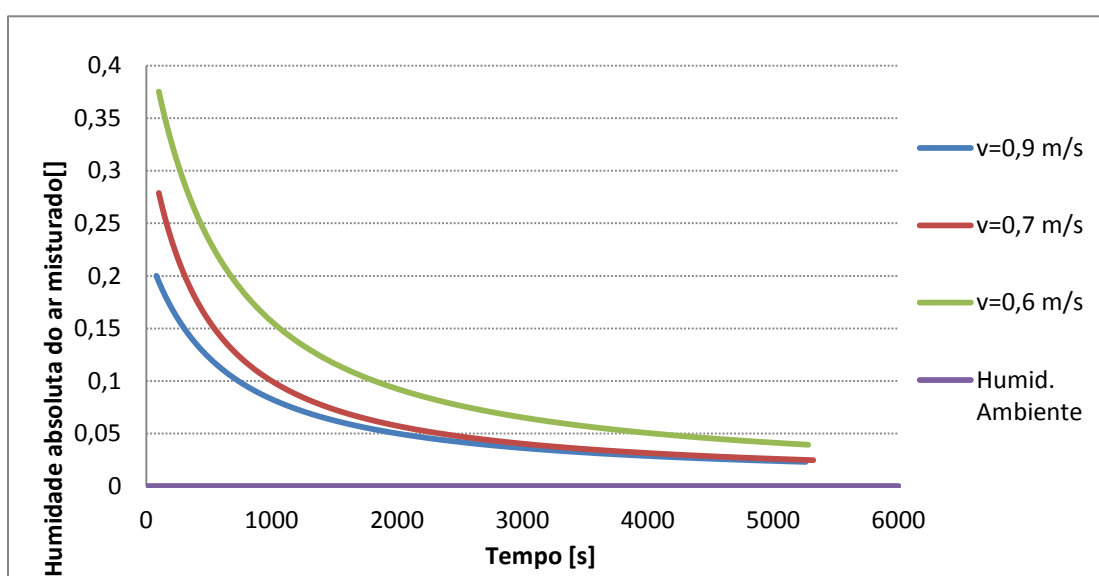


Figura 46: Variação da humidade do ar para diferentes velocidades de ar

Como é visível, uma maior velocidade promove uma maior taxa de secagem, e todas as curvas tendem para a estabilização.

É de salientar que no gráfico 46, a humidade observada nas curvas é superior à humidade do ar, o que acontece pois, no momento da mistura, o ar está a uma temperatura e humidade superiores devido à elevada recirculação do caudal de secagem.

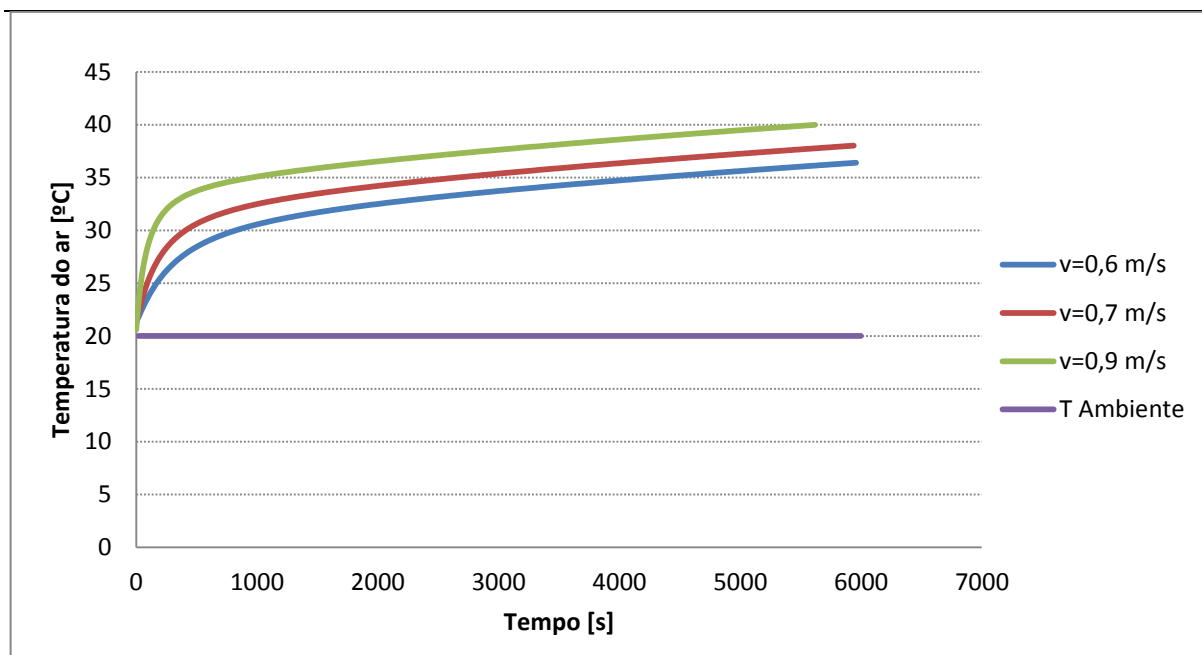


Figura 47: Comportamento da temperatura do ar à saída

Também a temperatura do ar de saída tende a subir com o aumento da velocidade, conforme se pode verificar a partir da figura 47.

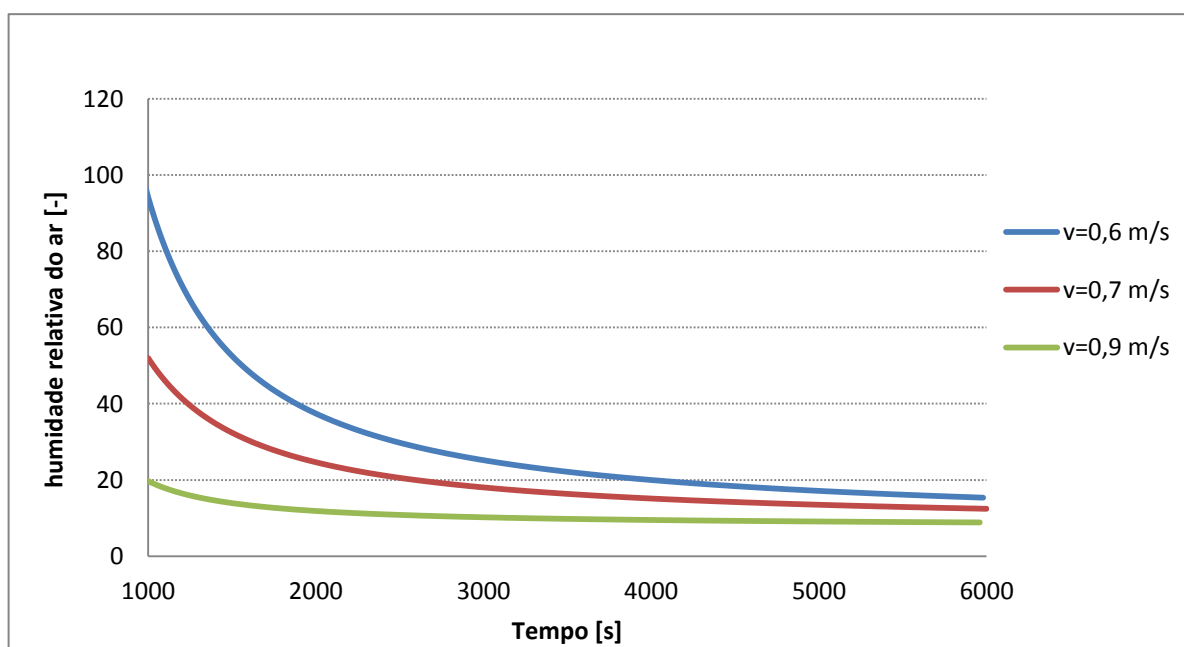


Figura 48: Variação da humidade na mistura

Da mesma maneira, com a diminuição da humidade do grão, a humidade do ar misturado tende a ser menor também (figura 48).

5.1.1.1 Comentário

De uma maneira geral, foi verificado que para os conteúdos de humidade verificados, a taxa de secagem aumenta com o aumento do caudal de ar de secagem. No entanto é sabido que altas velocidades fornecem maiores riscos de controlo, mas baixas velocidades podem provocar deformações, descolorações e assim uma secagem não uniforme do grão. Sendo assim, esta velocidade é uma ferramenta importante para controlar a taxa de secagem, apesar de que, por experiências consultadas, foi verificada uma maior importância desta ferramenta em sólidos com teores de humidade superiores a 40 %. (Santini e Haselein, 2002).

Então é possível dizer que para uma dada temperatura do ar de entrada, uma baixa velocidade do ar pode requerer uma baixa humidade relativa para aumentar a taxa de secagem ao nível pretendido, e assim cumprir o objectivo imposto.

Foi verificado também que um aumento da taxa de recirculação de ar promove a economia do sistema, pois requer, além de equipamento menos potente, menos trabalho deste e consequentemente um menor desgaste de todo o equipamento, inclusivamente os filtros do ar novo inserido no sistema.

5.1.2 *Variação do coeficiente de recirculação*

A necessidade da recirculação de ar na secagem tem prioritariamente a ver com a redução de consumo energético e assim encontrar uma melhor solução energética para o comerciante.

Então, a principal característica a analisar será o comportamento da potência necessária à secagem.

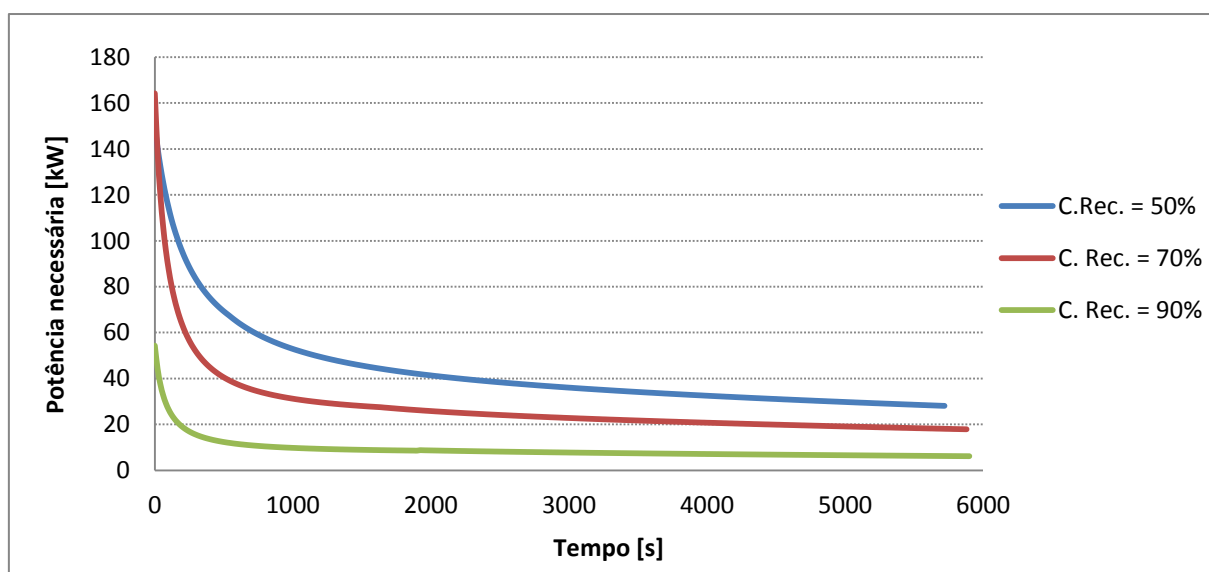


Figura 49: Comportamento da potência para diferentes recuperações de ar

A conclusão retirada imediatamente é que a potência necessária diminui com o aumento do ar recuperado.

Devido a alguns parâmetros inconstantes nos segundos iniciais, a potência necessária nestes momentos é demasiadamente alta e tal comportamento foi referido anteriormente assim como a solução adoptada, mas é possível ver que a estabilização do sistema ocorre mais depressa quanto maior a percentagem de ar recuperado, o que possibilita a selecção de um queimador de menor potência.

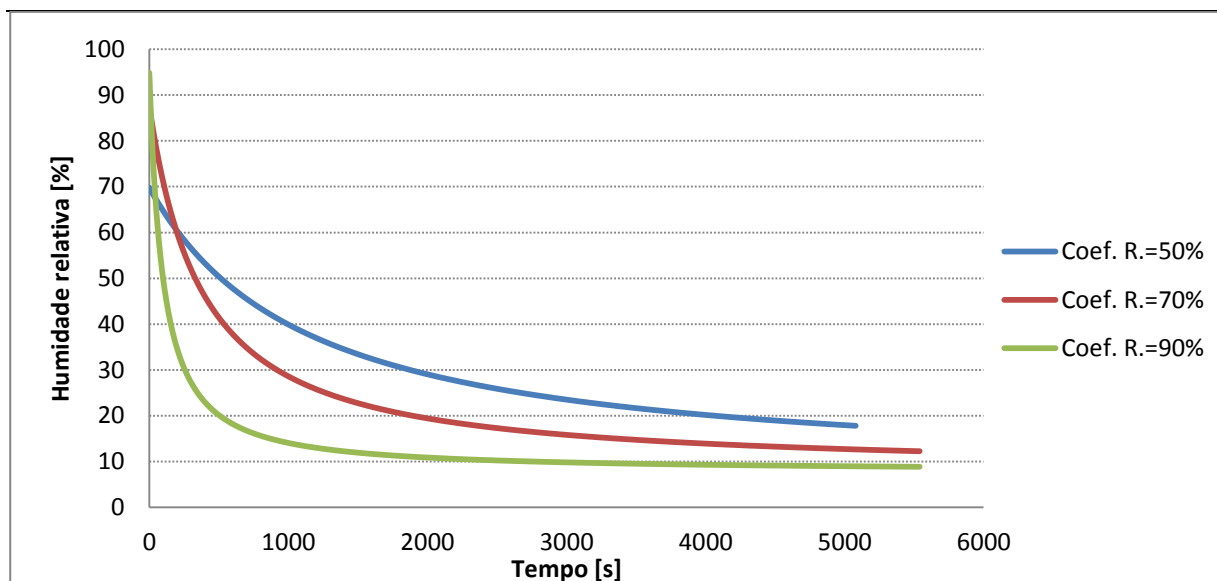


Figura 50: Evolução da humidade da mistura para diferentes recuperações

É verificado, como seria de esperar, que para uma maior recirculação a humidade aquando a mistura é maior pois menos ar novo é inserido, mas com o decorrer da secagem, a necessidade de ar novo diminui para uma maior recirculação. Isto acontece pois o coeficiente de recuperação é constante durante todo o processo, e o ideal seria a variação deste, de maneira a promover uma elevada recirculação nos primeiros minutos e esta ser diminuída posteriormente.

Foi também elaborado o comportamento entálpico do ar com 70 % de recuperação, para a saída da câmara, depois de a mistura ser efectuada e depois do aquecimento, ou seja, do permutador.

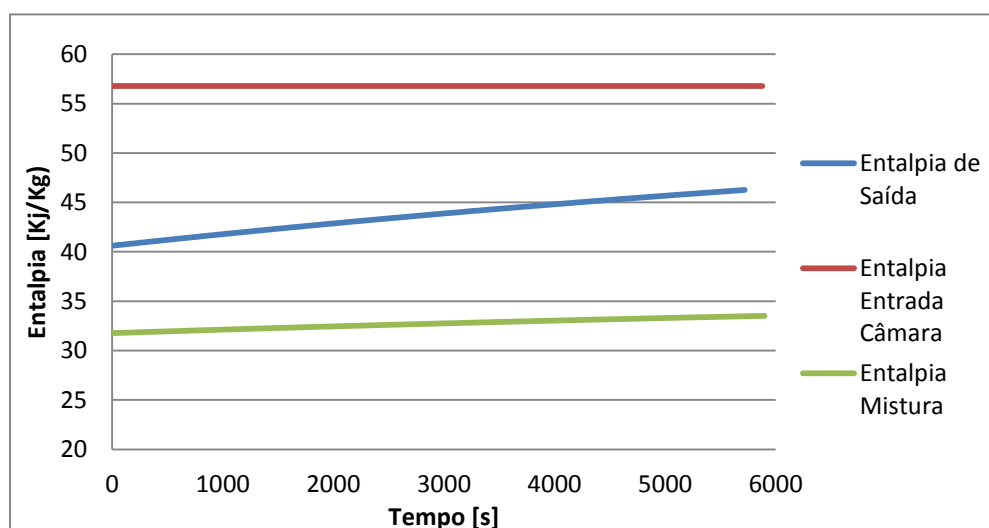


Figura 51: Comportamento da entalpia em vários pontos do sistema

O comportamento das entalpias do ar nos diferentes pontos tem o comportamento esperado, pois sabemos da primeira lei que $\Delta H = Q$, logo, quando a energia trocada em forma de calor aumenta, a entalpia também aumenta, o que é verificado, por exemplo, no ar de saída, pois à medida que o grão aquece, aumenta também a temperatura de saída do ar, aumentando consequentemente a sua entalpia.

É importante verificar que a entalpia do ar de entrada da câmara é constante pois a temperatura do ar é imposta, ou seja, o potencial energético à entrada do secador é constante.

Pela consulta à figura 52 é também perceptível a importância da recuperação de ar relativamente à potência necessária, a qual decresce com o aumento da recirculação pois o ar é recepcionado mais quente. Também a temperatura do ar depois de misturado com ar novo é maior, quanto maior a percentagem de ar recuperado.

É necessário desde já referir que, o gráfico da figura 52 foi efectuado para um mesmo instante do processo mas variando a percentagem de ar recuperado, ou seja, devido à aplicação elaborada no EES, foram efectuadas simulações para as diferentes percentagens de recuperação e em cada uma dessas simulações, num instante aleatório (passo 30, aos 600 segundos) foi retirado o valor da temperatura do ar e da potência de aquecimento para a elaboração do gráfico.

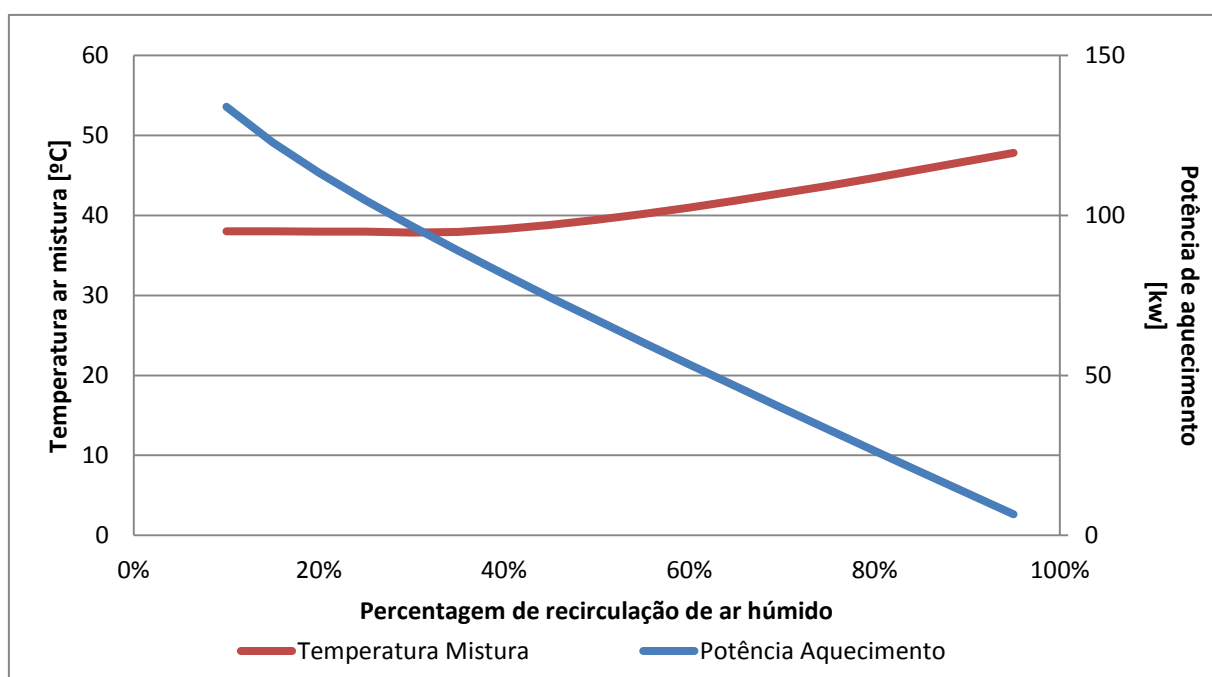


Figura 52: Variação da temperatura do ar depois da mistura e da potência necessária, com a variação da percentagem de ar recuperado 600 segundos depois do início da secagem.

5.1.3 Situações exemplo

Como foi visto, é importante a procura da melhor solução para o processo de secagem onde os vários parâmetros possam ser equilibrados.

Serão então, apresentadas a título de curiosidade, duas soluções distintas do ponto de vista talvez mais importante, a vertente económica, de maneira a entender genericamente a diferença dos comportamentos e o domínio do estudo.

São então apresentadas as duas situações em que na primeira o custo operativo não é importante, e uma segunda onde foram reduzidos parâmetros essenciais para a economia do processo.

Tabela VIII. Condição dispendiosa

Temperatura ar (Entrada)	Velocidade ar (Entrada)	Fracção de recirculação
60 °C	0,75 m/s	20%

Tabela IX. Condição económica

Temperatura ar (Entrada)	Velocidade. ar (Entrada)	Fracção de recirculação
40 °C	0,7 m/s	70%

Todos os outros parâmetros são semelhantes entre si.

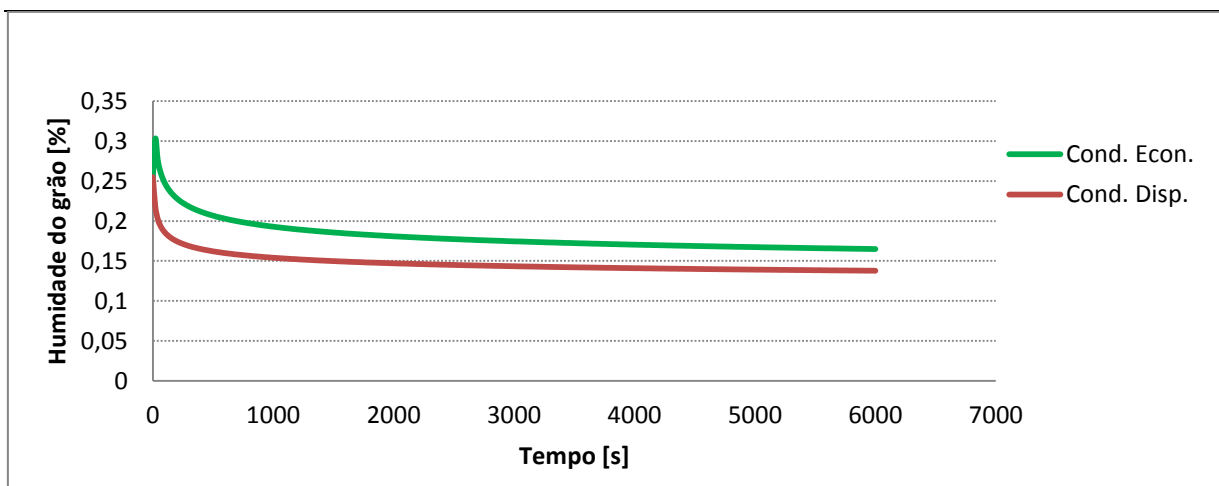


Figura 54: Comportamento da humidade do grão para ambas as condições

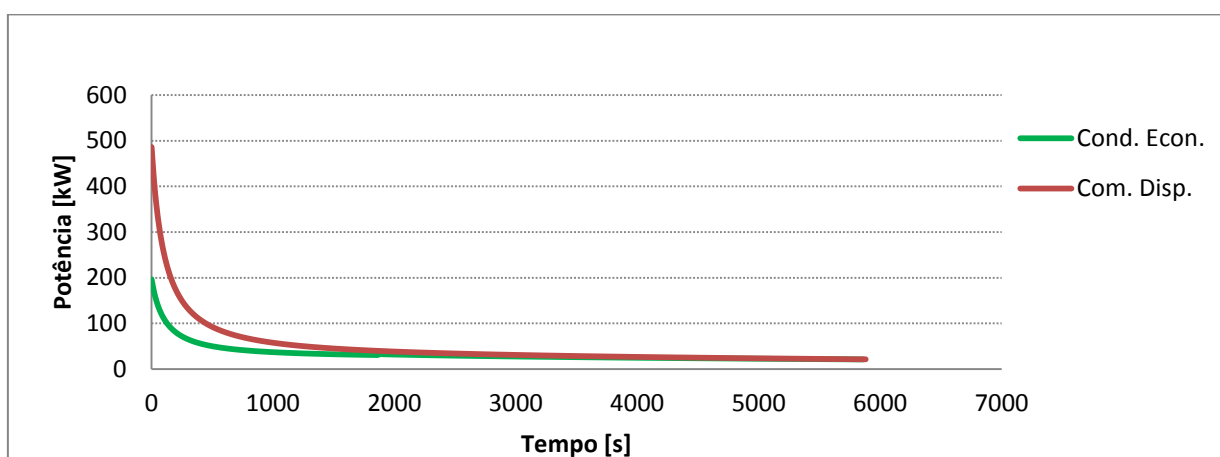


Figura 55: Variação da potência necessária em ambas as situações

Analisando o tempo necessário ao grão chegar aos 14,5 % (figura 54), são visualizados os cerca de 3000 segundos na situação dispendiosa face aos mais de 7000 segundos da situação económica. Em contra partida e como era de esperar, a diferença de potência entre os dois métodos para os 1000 segundos é cerca de 25 kW, figura 55.

Sendo assim é encontrado um processo rápido mas dispendioso do ponto de vista do equipamento, face a um processo muito lento comercialmente mas com requisitos técnicos baixos.

Para um estudo mais aprofundado seria necessário avaliar o custo por unidade de tempo do combustível a usar, assim como o valor comercial dos equipamentos necessários.

Sabendo que estas são duas situações extremas, ficaria ao critério do cliente a escolha do método a utilizar de acordo com as suas necessidades, sendo que na indústria, é utilizada claramente uma situação razoavelmente intermédia.

5.2 Permutador

5.2.1 *Variação da temperatura do ar quente*

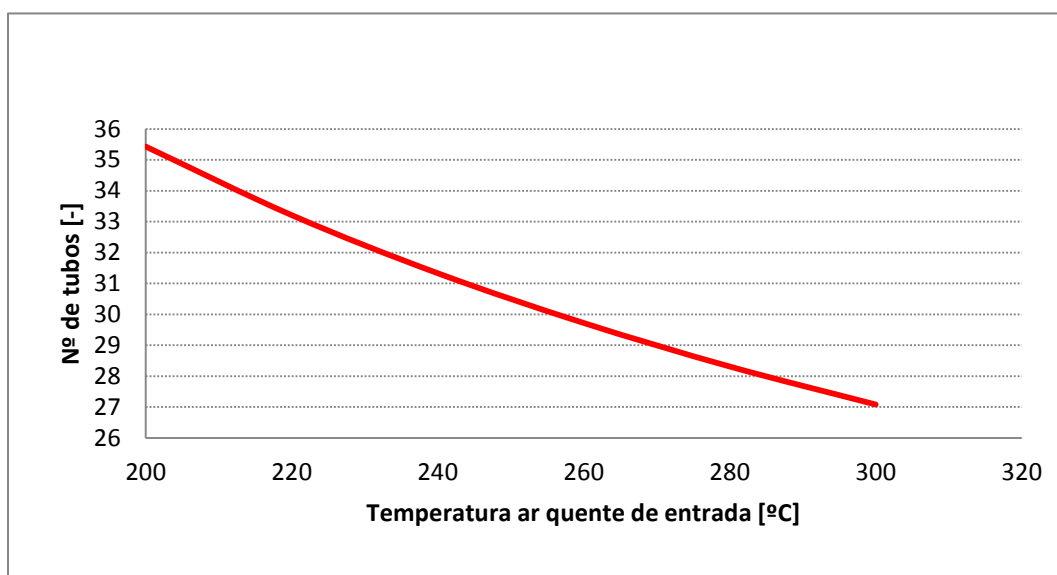


Figura 56: Variação do número de tubos com a temperatura do ar quente (entrada)

Sendo que todos os parâmetros se mantêm constantes, o aumento da temperatura do ar vindo do queimador promove uma diminuição do número de tubos devido à maior disponibilidade de calor a fornecer (figura 56), ou seja, se for aumentada a temperatura dos gases de combustão, a área necessária de transferência de calor do fluido quente para o fluido frio é menor.

5.2.2 Variação da temperatura de entrada do ar frio

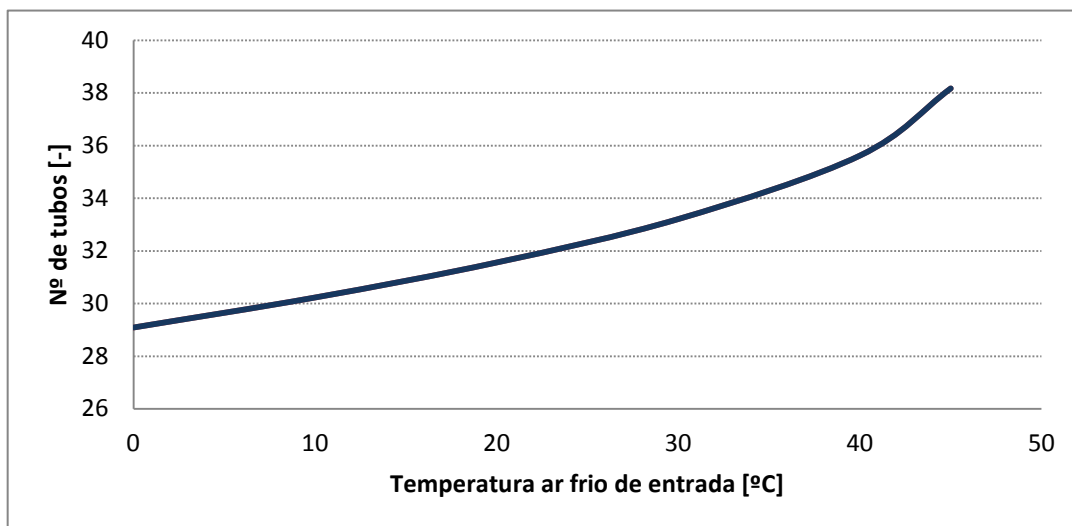


Figura 57: Variação do número de tubos com a temperatura do ar frio (entrada)

Por outro lado, o aumento da temperatura do ar de entrada aumenta o número de tubos necessários, pois é lógico que quanto menor for o gradiente entre as temperaturas dos fluidos, menor é o rendimento do permutador, e uma maior área de transferência é necessária, figura 57.

5.2.3 Variação do diâmetro interior

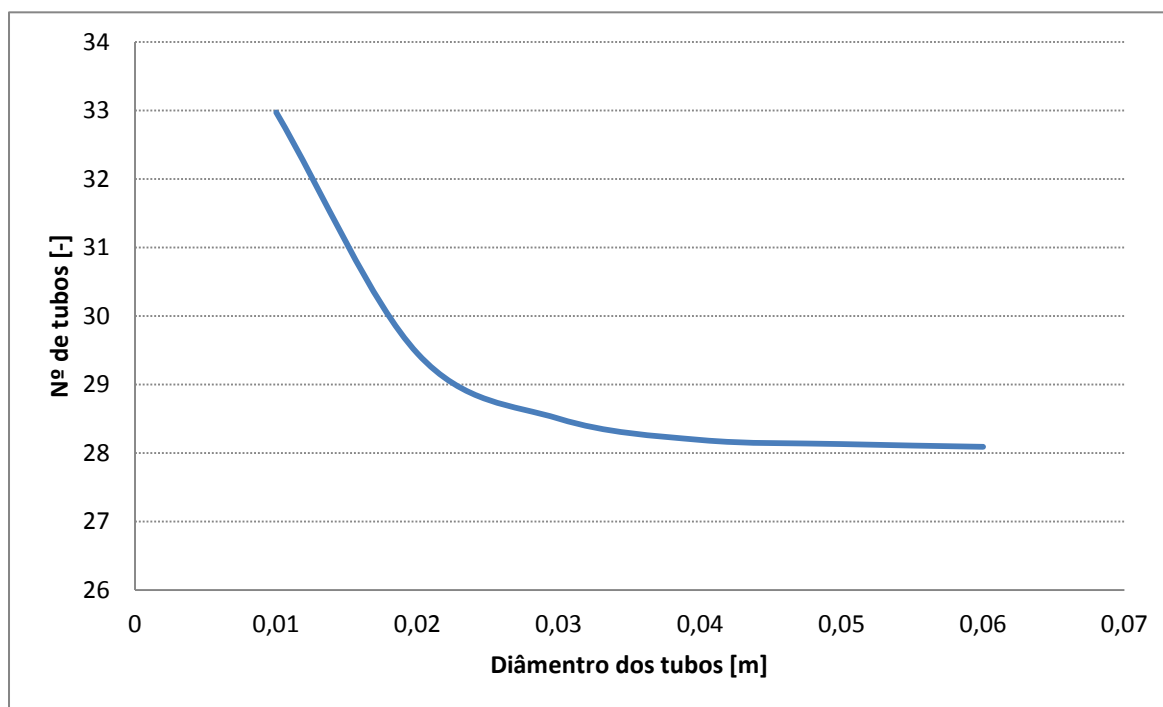


Figura 58: Variação do número de tubos com a mudança do seu diâmetro interior

O resultado apresentado na figura 58 era bastante previsível pois para o aumento da área de transferência de calor de um tubo, o objectivo do aquecimento do mesmo ar para a mesma temperatura era claramente cumprido com a diminuição do número de tubos.

Capítulo 6 -Análise Económica Simplificada

Para se maximizar o retorno sobre um investimento, neste caso um equipamento de secagem, diversos parâmetros apresentam grande contribuição como a redução de custos de operação, a ampliação do retorno ou a diminuição dos prazos de retorno do investimento.

Capítulo 6. Análise económica simplificada

De maneira a ter uma ideia geral do custo necessário à secagem de uma carga de milho foi calculada a energia total consumida no processo de queima tendo atenção que este não é um processo permanente.

Sendo assim, com a ajuda da curva de potência e da equação da linha de tendência do comportamento dessa potência foi calculado o integral a toda a área de tempo.

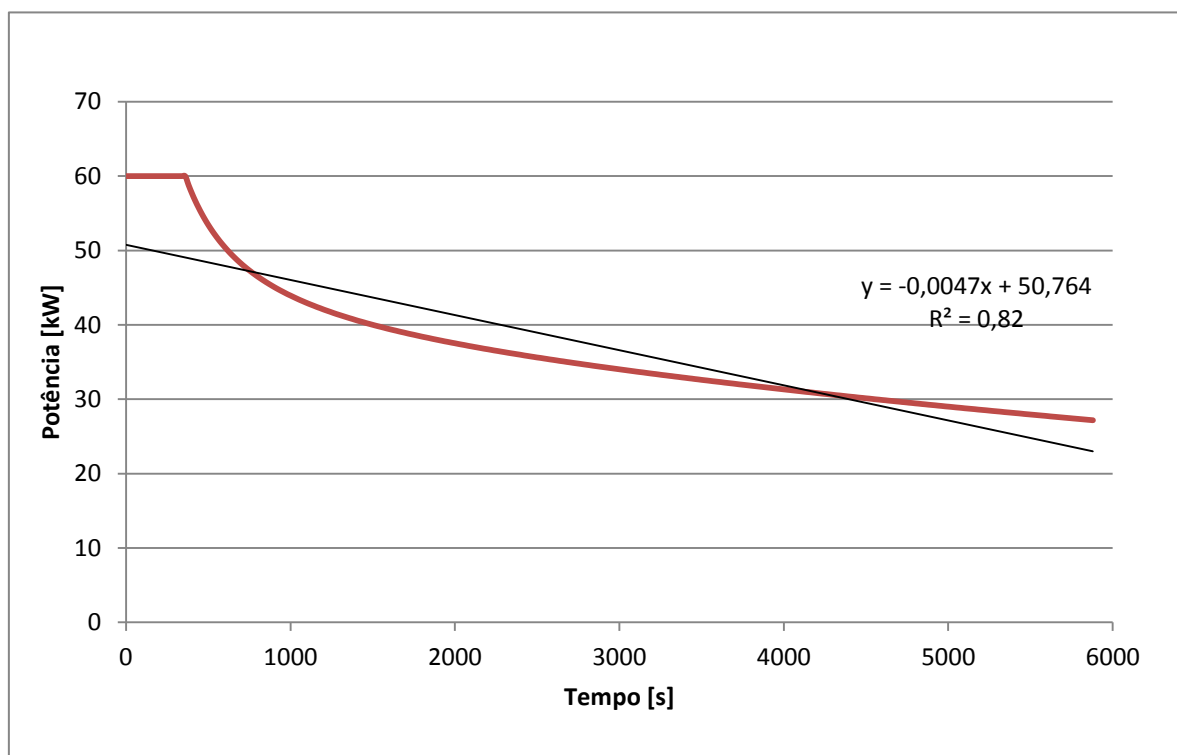


Figura 59: Comportamento da potência no processo de secagem

Sendo assim:

$$E_{Total} = \int_0^t P_{total} dx = \int_0^{6000} -0,0047x + 50,764 dx \quad \text{EQ 6.1}$$

$$E_{total,queimador} = 219,9 kWh$$

Como não é conhecido o comportamento do ventilador, sendo que este também varia o seu caudal, será considerado o seu funcionamento a plena carga durante todo o processo.

Relativamente ao ventilador, este será a electricidade com potência de 2,9 kW, e sendo o valor comercial da electricidade de 0,13 €⁴ por kWh e tempo de funcionamento de 1 hora e 43 minutos então:

$$P_{total,ventilador} = 2,9 \times 1,73 = 5,017 \text{ kWh}$$

$$Custo_{ventilador} = 0,13 \times 5,017 = 0,65 \text{ €/carga}$$

Relativamente ao queimador sendo este a gás propano e com o custo de 98,28 €⁵ por uma garrafa de 45 kg proveniente da ESSO, e um caudal necessário de 4,86 kg/h, o valor final será:

$$Custo_{queimador,gás} = \frac{4,86 \times 1,43 \times 98,28}{45} = 15,17 \text{ €/carga} \quad \text{EQ 6.2}$$

No entanto, pode ser considerada a hipótese de de aquecer o ar de entrada através de, por exemplo uma resistência eléctrica, então o seu custo de operação por carga ficaria:

$$Custo_{electricidade} = 0,13 \times 219,9 = 28,58 \text{ €/carga}$$

Sendo assim é verificado desde já que a utilização de gás propano é mais vantajosa em termos de consumo quando comparado com a electricidade, no entanto, será apresentada no capítulo seguinte, outra alternativa de aquecimento do ar.

⁴ Valor retirado da página da EDP para 2011 e tarifas simples em hora de ponta à taxa legal de 6 % de IVA

⁵ Valor retirado de “A loja do Gás” em Bragança e acrescido o IVA de 6 %

6.1 Alternativa energética - Peletes

Como alternativa à electricidade e ao gás propano já referido, a possibilidade da utilização de um queimador de peletes é colocada devido às suas diversas vantagens ambientais, económicas e mesmo a de possibilitar uma menor dependência energética relativamente a outros combustíveis.



Figura 60: Amostra exemplificativa de peletes (esquerda) e exemplo esquemático de um queimador de peletes (direita)⁶.

Sendo assim, pelo contacto com a empresa Peletesar, sediada em Viana do Castelo, foi possível verificar alguns dados relativos a este combustível ecológico, que se apresentam na tabela X.

Tabela X. Características das peletes de madeira

Preço por embalagem (15 kg)	Preço por kg	Poder calorífico	Rendimento de combustão	Custo energético
3,45 €	0,23 €/kg	4,8 kWh/kg	90 %	0,053 €/kWh

⁶ Imagens retiradas de www.mlive.com e www.canalcentro.pt, respectivamente, em 2 de Junho de 2011, às 17 horas.

Pelos valores indicados na tabela X, é possível saber o custo por carga utilizando como combustível as peletes de madeira:

$$Custo_{queimador,pellets} = 0,053 \times 219,9 = 11,65 \text{ €/carga}$$

São então apresentados alguns gráficos para uma melhor visualização das hipóteses consideradas.

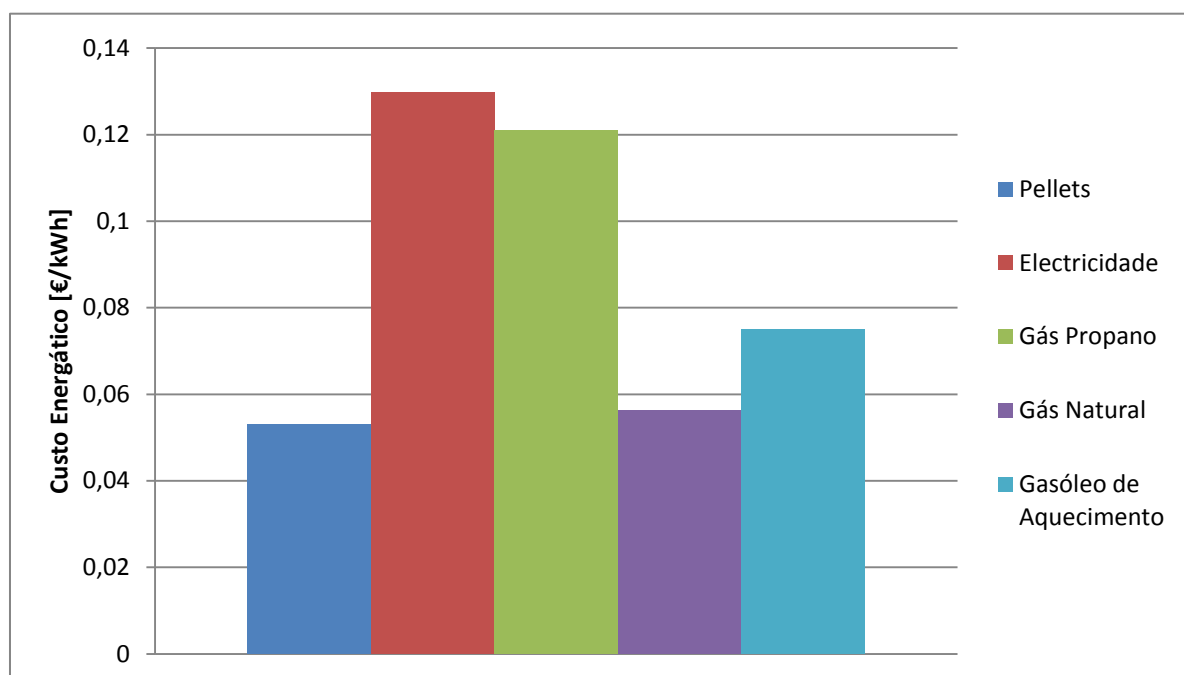


Figura 61: Custo energético de várias soluções de aquecimento

Na figura 61 são apresentados os custos da energia consumida para as várias fontes energéticas consideradas⁷, bem como do gás natural e do gasóleo de aquecimento, de forma a obter uma ideia mais abrangente das soluções existentes.

É no entanto importante referir que, só estão contabilizados os custos das várias formas de energia consumidas, não se entrando em consideração com os respectivos equipamentos.

⁷Dados retirados das empresas FélixTérmica – Climatização e EDP, em 5 de Junho de 2011 às 10:20 h.

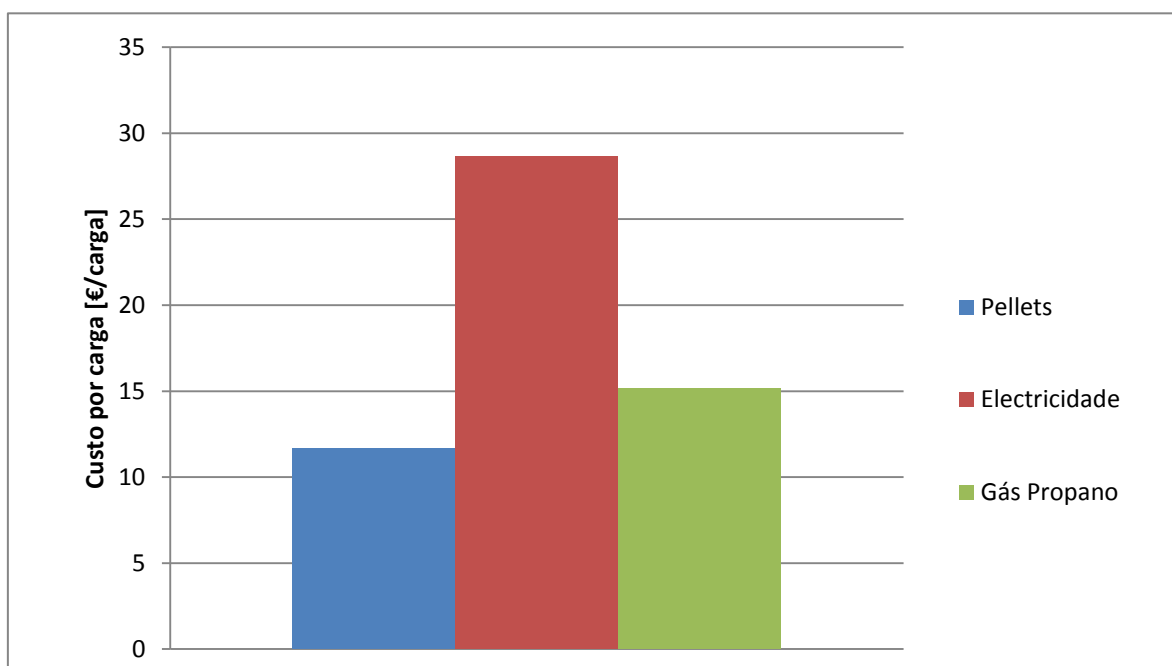


Figura 62: Custo por carga de 20 toneladas das três soluções de aquecimento consideradas no estudo

Na figura 62 é facilmente perceptível que a electricidade é o método de fornecimento de calor mais dispendioso, mas é importante lembrar que é o único em que não há a necessidade de investimento em equipamento de combustão, ao contrário do queimador de peletes e de gás propano, no entanto será necessária uma avaliação financeira para os três equipamentos, de forma a apurar-se a melhor solução, essa análise será apresentada no capítulo 6.2.

6.2 Avaliação financeira dos equipamentos

A avaliação financeira dos equipamentos assenta na comparação dos custos e proveitos financeiros associados ao investimento, considerando-se que existe viabilidade económico-financeira quando os proveitos excedem os custos necessários a suportar.

Para o efeito, vai ser elaborado um estudo sobre os custos inerentes à aquisição e laboração dos equipamentos em análise, bem como os proveitos oriundos destes.

Para cada um dos investimentos alternativos será considerado um investimento inicial correspondente ao valor do equipamento.

Serão também estimadas vendas anuais na ordem dos 79 200,00 €, valor que corresponde à venda de três cargas diárias de 20 toneladas cada, multiplicadas por 22 dias úteis de laboração em 12 meses. Através da consulta à página do Ministério da Agricultura - Desenvolvimento Rural e das Pescas⁸, foi retirado o valor de venda de 16,95 €/tonelada para milho colhido com 25 % de humidade, no entanto este valor engloba a colheita, secagem e silagem, e por pesquisa efectuada foi verificado que o valor apenas de secagem varia entre os 5 € e 7 €, tendo sido considerado 5 €/tonelada como valor de venda de cada tonelada de milho, sendo que, este valor é apenas uma referência, pois o valor final de venda depende também do tipo de milho a ser vendido.

A previsão das vendas assenta no pressuposto de que a taxa de ocupação é de 100%, ou seja, será rentabilizada ao máximo.

Após a elaboração dos mapas financeiros previsionais de cada um dos investimentos (electricidade, gás propano e peletes) e aferidos os respectivos fluxos financeiros, o passo seguinte comporta na análise da sua viabilidade, que consiste no desconto dos “cash flows”, ou seja, apurar em que medida os “cash flows” gerados no decorrer da actividade, compensam os “cash flows” necessários á sua implementação.

Seguidamente será feita uma avaliação de cada um dos projectos, escolhendo para o efeito o modelos de avaliação VAL (Valor Actual Líquido) com vista à selecção do equipamento que apresenta um maior VAL, sendo que por VAL é entendido o cálculo matemático-financeiro capaz de determinar o valor presente de pagamentos futuros descontados a uma taxa de juros apropriada, menos o custo do investimento inicial (equação 6.3), ou seja, quanto maior for o VAL, maior será a probabilidade do projecto ser viável economicamente, já que um VAL positivo significa que as receitas geradas são superiores aos custos.

$$VAL = -CI + \sum_{t=1}^n \frac{CFE_t}{(1+k_t)^t} \quad \text{EQ 6.3}$$

Onde:

CFE_t – Cash Flow de Exploração no período t ;

⁸ Site do Ministério da Agricultura - Desenvolvimento Rural e das Pescas, consultado em 5 de Outubro de 2010, às 11 horas e 15 minutos.

CI – Custo do investimento;

k_t - Taxa de actualização;

n - Duração da vida útil do equipamento.

Relativamente à equação anterior (equação 6.3), alguns conceitos devem ser apresentados para uma melhor percepção do estudo realizado.

Designa-se por Cash Flow de exploração o saldo entre as entradas e saídas de capital de uma empresa durante um determinado período de tempo, sendo calculado através da construção de um mapa de fluxos de tesouraria. Pelas suas características é um importante indicador da capacidade de autofinanciamento da empresa.

Período de recuperação do capital investido corresponde ao número de períodos necessários para através dos “cash flows” de exploração gerados, recuperar o capital investido, conforme fórmula abaixo apresentada.

$$PRC = t + \left(\frac{\text{despesa de investimento} - \sum_{i=1}^t CFE_i}{CFE_{t+1}} \right) \quad \text{EQ 6.4}$$

K representa a taxa de rentabilidade exigida pelo agente económico k , que pode decompor-se em R_f que é o equivalente à remuneração de uma aplicação sem risco acrescida do prémio de risco, como poderá ser visualizada na seguinte equação.

$$k = R_f + \text{prémio de risco} \quad \text{EQ 6.5}$$

Por fim, entende-se por prémio de risco, a compensação exigida pelo investidor para o remunerar pelo risco incorrido (Soares *et al*, 2008).

6.2.1 Secador de milho – Electricidade

Foi então elaborada uma simulação de custos e proveitos provenientes de um investimento de secador a electricidade, da qual originaram os seguintes resultados:

Tabela XI. Cálculo do VAL- Electricidade

Máquina Electricidade	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5
Investimento	-40.000 €					
Vendas		79.200 €	79.200 €	79.200 €	79.200 €	79.200 €
Custos Variáveis		22.604 €	22.604 €	22.604 €	22.604 €	22.604 €
Cash Flow	-40.000 €	56.596 €	56.596 €	56.596 €	56.596 €	56.596 €
Factor de actualização	1	0,91	0,83	0,75	0,68	0,62
Cash Flow Actualizado	-40.000 €	51.451 €	46.774 €	42.522 €	38.656 €	35.142 €
VAL	174.545 €					
	-40.000 €	11.451 €	58.225 €	100.747 €	139.403 €	174.545 €
Payback	9,3 Meses					

Para uma ideia do investimento inicial do equipamento a electricidade, foi consultado o fabricante Changzhou - *Drying Equipment Factory* e retirado o valor de um equipamento similar, com a mesma capacidade produtiva, sendo este, apenas uma aproximação ao equipamento dimensionado neste trabalho.

Sendo o investimento inicial de 40 000,00€ de forma a estimar o “cash flow” anual, sobre as vendas foram subtraídos os custos variáveis e o custo do investimento, resultando assim num cash flow negativo de -40 000,00 € no ano 0, e positivo nos seguintes anos.

A taxa de actualização é de $1/(1+0,10)^n$ actualizado ao longo dos 5 anos.

Para o cálculo do VAL foi necessário estimar um factor de actualização que neste caso concreto foi de 10 %, de forma a poder calcular o “cash flow” actualizado, e por conseguinte o VAL, que para a alternativa de electricidade foi de 174 545,00 €, e apresentando um VAL positivo, o secador a electricidade é de implementar.

Relativamente ao *payback* resultou em 9,3 meses.

6.2.2 *Análise de custos – Gás Propano*

Relativamente ao investimento a gás propano, o investimento inicial será de 41 231 €⁹, as vendas serão as mesmas que do investimento a electricidade e a peletes, ou seja, de 79 200 €/ano, durante 5 anos.

Tabela XII. Cálculo do VAL- Gás propano

Máquina Gás	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5
Investimento	-41.231 €					
Vendas		79.200 €	79.200 €	79.200 €	79.200 €	79.200 €
Custos Variáveis		12.015 €	12.015 €	12.015 €	12.015 €	12.015 €
Cash Flow	-41.231 €	67.185 €	67.185 €	67.185 €	67.185 €	67.185 €
Factor de actualização	1	0,91	0,83	0,75	0,68	0,62
Cash Flow Actualizado	-41.231 €	61.078 €	55.525 €	50.477 €	45.889 €	41.717 €
VAL	213.454 €					
	-41.231 €	19.847 €	75.372 €	125.849 €	171.738 €	213.454 €
Payback	8,1 Meses					

⁹Corresponde ao valor do equipamento (40 000,00 €) acrescido do valor do queimador (1 231,00 €) - modelo específico NC.6 GX e fornecido pela VENTRON, revendedor certificado da CUENOD.

Relativamente aos custos variáveis (matéria-prima), estes são de 12 015,00 €/ ano.

A taxa de actualização é de 1 % no ano 0.

O “cash flow” actualizado no ano de arranque (ano 0) é negativo de -41 231,00 €, e positivo nos anos seguinte, sendo o *payback period* de 8,1 meses.

6.2.3 *Análise de custos – Peletes*

Por último, num investimento a peletes, o custo inicial é de 47 141,00 €¹⁰, o que significa dizer que o “cash flow” no ano zero é no mesmo montante.

Tabela XIII.Cálculo do VAL - Peletes

Máquina Peletes	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5
Investimento	-47.141 €					
Vendas		79.200 €	79.200 €	79.200 €	79.200 €	79.200 €
Custos Variáveis		9.227 €	9.227 €	9.227 €	9.227 €	9.227 €
Cash Flow	-47.141 €	69.973 €	69.973 €	69.973 €	69.973 €	69.973 €
Factor de actualização	1	0,91	0,83	0,75	0,68	0,62
Cash Flow Actualizado	-47.141 €	63.612 €	57.829 €	52.572 €	47.793 €	43.448 €
VAL	218.112 €					
	-47.141 €	16.471 €	74.300 €	126.872 €	174.665 €	218.112 €
Payback	8,9 Meses					

¹⁰ Valor de 7 141,00 € fornecido pela CANALCENTRO S.A., modelo GRA 50 RO de 50 kW.

Os custos variáveis são de 9 227,00 €, que correspondem á matéria-prima necessária anual para este tipo de equipamento.

A taxa de actualização é de 1% no ano 0.

O “cash flow” actualizado a partir do primeiro ano de laboração é sempre positivo, significando que o projecto é de implementar, uma vez apresentar um VAL positivo ao longo da vida útil do equipamento.

O *payback period* secador de milho a peletes é de 8,9 meses.

6.2.4 Comentário

Dos investimentos em análise aquele que seria de implementar, seria o investimento do secador de milho a peletes, uma vez ser aquele que apresenta o maior VAL, em termos comparativos o investimento a peletes apresenta um VAL de 218 112,00 € contra um VAL de 213 454,00 € a gás propano, e contra 174 545,00 € a electricidade.

Em termos percentuais a diferença entre o maior VAL (peletes) e o menor VAL (electricidade) é de 20 %, o que significa dizer que o VAL das peletes poderia decrescer 20% que continuaria preferível à electricidade. Relativamente ao gás propano, a diferença percentual é de 2%.

Em relação à diferença do Período de Recuperação do Capital, se tais alterações ocorressem nessas percentagens, o *payback period* também sofria alterações, passando a incorporar mais 10 dias na máquina a electricidade, e 17 dias na máquina a gás, aproximadamente, conforme tabela abaixo apresentada:

Tabela XIV. Comparação percentual entre o melhor VAL e os restantes

Máquina	VAL	Diferença %	Payback	Diferença Dias
Máquina Electricidade	185.973 €	-20%	9,2	9,4
Máquina Gás	227.021 €	-2%	8,0	-17,1
Máquina Peletes	232.242 €		8,7	

A título ilustrativo será apresentado um gráfico (figura 62) que retrata a evolução dos “cash flows” actualizados ao longo dos 5 anos de análise, para os três tipos de combustíveis.

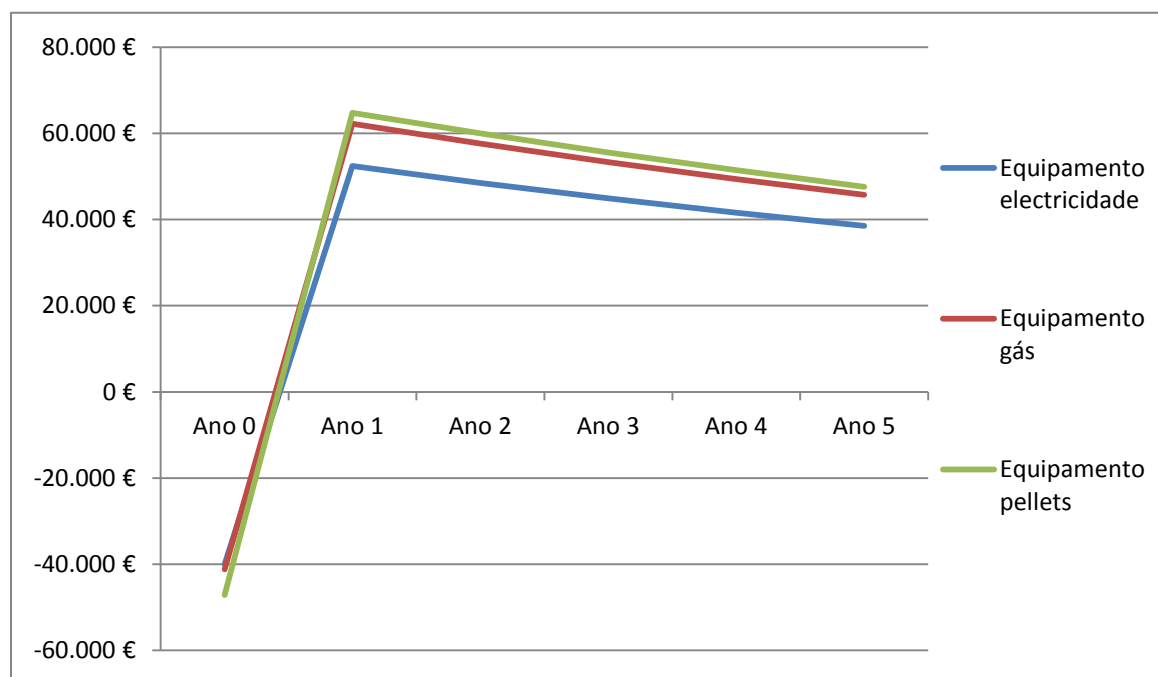


Figura 63: Evolução anual dos “cash flows” actualizados para os diferentes equipamentos

É visível que no ano 0 o “cash flow” actualizado mais vantajoso será o da electricidade no montante de -40 000 €, seguido do gás de -41 231 €, e das peletes -47 141 €, no entanto, a partir do primeiro ano e nos anos seguintes o equipamento que apresenta um maior “cash flow” actualizado é o das peletes com 64 790,00 €, contra os 62 209,00 € do gás e 52 404,00 € da electricidade, o que leva á conclusão de que a partir do 1º ano as peletes são preferíveis ao gás e á electricidade, pois no 1º ano esta apresenta um “cash flow” actualizado superior ao do gás em 2 581,00 € e em relação á electricidade de 12 386,00 €, o que compensa em muito a diferença obtida no ano 0.

Na tabela XV apresentada poderão ser visualizados os valores relativamente aos “cash flows” actualizados mencionados, bem como o comportamento dos mesmos para os anos seguintes de qualquer um dos equipamentos em análise.

Tabela XV. Apresentação dos “cash flows” actualizados

Máquina	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5
Máquina a Electricidade	-40.000 €	52.404 €	48.522 €	44.928 €	41.600 €	38.519 €
Máquina a Gás	-41.231 €	62.209 €	57.601 €	53.334 €	49.383 €	45.725 €
Máquina a Peletes	-47.141 €	64.790 €	59.991 €	55.547 €	51.432 €	47.623 €

6.3 Financiamento a médio e longo prazo

De entre as principais fontes de financiamento por capitais alheios, foi seleccionado o crédito bancário, de médio e longo prazo, o que é desejável no caso de investimentos a longo prazo.

Deve ter-se em conta o tipo de taxa de juro (fixa ou indexada), o horizonte e a periodicidade dos reembolsos (com ou sem período de carência), o tipo de garantias prestadas (hipotecas avales, etc.). Nas taxas indexadas, existe um indexante (por exemplo Euribor) e um diferencial (Spread), que consiste na remuneração da instituição financeira, sendo a taxa revista periodicamente (Soares *et al* 2008).

Como complemento deste estudo, foram solicitadas à Caixa Geral de Depósitos de Vila Nova de Gaia, três simulações de financiamento a médio e longo prazo, para o equipamento em questão, variando estas no montante a financiar, em virtude do combustível em análise. No entanto, só será apresentada a simulação correspondente ao equipamento a peletes, uma vez ter-se concluído na secção 6.2- Avaliação Financeira dos Equipamentos, a solução mais rentável para o investidor, neste caso concreto.

As restantes simulações encontram-se apresentadas no Anexo E.

Foi elaborada uma simulação de financiamento para o equipamento em análise, pois existem em determinadas alturas incentivos por parte do governo, com vista á modernização dos equipamentos agrícolas, usufruindo assim os agricultores de taxas mais vantajosas ou até mesmo financiamentos a fundo perdido.

No entanto, após a visita à instituição de crédito Caixa Geral de Depósitos de Vila Nova de Gaia, concluiu-se que durante este ano não existe nenhum incentivo para o sector agrícola, e

no caso de financiamento a Leasing pressupõe uma entrada inicial correspondente a 30% do valor do equipamento.

Como alternativa foi então solicitado uma simulação para um financiamento a médio e longo prazo, tendo como finalidade aquisição de equipamento agrícola, conforme a tabela XVI seguidamente apresentada.

Tabela XVI. Simulação do financiamento

Montante da Operação	47 141, 00€
Prazo	60 Meses
Entrada Inicial	0 €
Tipo de Taxa	Indexada
Indexante	Euribor a 12 Meses ¹¹
Spread	5 %
TAN	6,71 %
TAEG	8,14 %
Primeiro Pagamento	
Primeira Prestação (ano 1)	1 067,87 €
Comissão de Estudo e Montagem	156,00 €
Comissão de Avaliação	520,00 €
Comissão de Contracto	82,00 €
Restantes Prestações	
Valor (médio)	930,70 €

A simulação supra apresentada, para um financiamento no montante de 47 141,00 € a ser amortizado num período de 60 meses, teve como resultada uma TAN de 6,71 %, TAEG de

¹¹ As prestações são indexadas à Euribor a 12 meses na base 360 dias, apurada uma função da média aritmética simples das cotações diárias do mês anterior ao período de contagem de juros.

8,14 % e taxa de juro indexada à Euribor a 12 meses acrescida de um *spread* de 5,00%. Para o investimento em causa não foram solicitadas garantias para o financiamento, uma vez não existirem dados concretos do investidor em causa.

Conclusões

Capítulo 7. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Desenvolveu-se um programa destinado ao dimensionamento de um sistema de secagem capaz de processar 60 t/dia de grãos de milho.

É de referir que vários parâmetros apesar de não ser notório nos valores apresentados, são inconstantes nos momentos iniciais. Este facto pode ser devido ao próprio transporte do ar pelas condutas e passagem pelos equipamentos, como permutador, e ventiladores, aspectos que não foram contabilizados e que podem alterar este comportamento de transporte, ou mesmo questões numéricas associadas ao passo de cálculo utilizado no EES

Apesar do programa utilizado ter um enorme potencial em problemas termodinâmicos, como por exemplo as rotinas utilizadas que evitam extensivos cálculos, na aplicação a este trabalho foi algo limitado do ponto de vista do número máximo de variáveis possível no programa desenvolvido no EES, pois além de não ser possível neste momento a inserção de mais nenhum parâmetro, teria sido bem mais interessante a resolução de todo o processo numa única folha de EES, e assim a elaboração de um diagrama final onde fossem apresentados todos os parâmetros intervenientes de maneira a que, com a mudança de um valor seria visível a sua influência em todo o processo e equipamentos.

Do ponto de vista termodinâmico foi também considerado que, quando foi referida a temperatura do grão, toda a carga de grãos foi considerada que estava à mesma temperatura, o que na realidade não acontece, pois este apresenta um gradiente de temperaturas do centro para a periferia.

Com base neste programa, num dia típico e em condições atmosféricas e condições de grão de referência, foi dimensionado o secador.

As dimensões utilizadas da câmara foram o resultado dos cálculos efectuados se bem que tivessem o suporte de valores disponíveis na literatura dos fabricantes deste tipo de equipamento

Avaliou-se também o desempenho do secador proposto para diversas condições operativas em que foi verificado o comportamento do equipamento com a mudança de alguns parâmetros essenciais do processo de secagem e assim entender a sua maior ou menor importância.

Foi finalmente realizada uma análise económica simplificada, considerando para o efeito o custo do equipamento e o custo do combustível, bem como uma previsão das vendas. Foi verificado no decorrer desta análise que o combustível mais vantajoso a nível económico é o das peletes, seguido do gás propano e da electricidade. Também se verificou que para cada um dos materiais em análise o Período de Recuperação do capital é inferior a um ano, partindo do pressuposto de que qualquer um dos equipamentos terá uma taxa de ocupação de 100%.

Relativamente aos custos de operação, o valor de 0,58 € por tonelada é um pouco inferior quando comparado com os cerca de 5 €/tonelada oferecidos por alguns comerciais, valor geral obtido através de pesquisa e para a redução da humidade do milho de 25 % para 15 % (com utilização de queimadores a gás propano), sendo que quanto mais húmidas as partículas forem recepcionadas, mais dispendioso o processo se torna. Este facto deve-se a neste estudo apenas ter sido contabilizado o consumo do combustível e da amortização, e não se contabilizou a energia eléctrica de accionamento do ventilador, nem de accionamento dos componentes eléctricos dos queimadores, seja a gás seja a peletes, o que na realidade não é verdade, pois existem mais componentes e certamente haverá margem de lucro para os comerciantes e proprietários de maneira a ser possível a sua subsistência, além de que não foi possível saber o valor exacto final do equipamento.

Proposta pra trabalhos futuros

Obter uma curva generalizada de secagem de grãos de milho para todos os processos e temperaturas de secagem existentes na literatura.

Estudo de outros possíveis processos na secagem de grãos, ou mesmo a utilização de dois processos em simultâneo.

Bibliografia

- Abbott, M. M. *et al*, 2011, *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*, Sixth Edition;
- Anabtawi, M. Z., 1998, *Minimum spouting velocity for binary mixture of particles in rectangular spouted beds*, The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 76, 132-136;
- Andrade, E., Couto, S., Queiroz, D., Peixoto, A., 2004, *Determinação de propriedades térmicas de grão de milho* - Ciências Agrotécnicas, Lavras, Vol. 28, Nº 3, 488-498;
- Ball B. C., O'Sullivan M. F., Hunter R., 1970, *Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage*, Journal of Soil Science, Volume 39, 327-339;
- César, D., 2002, *Secagem de grãos* - Revista SEED News, Março/Abril - Vol 6, Nº 2;
- César, P., Machado, P., Andrade, E., 2001, *Cinética de secagem e qualidade de grãos de milho pipoca*, Ciência e Agrotecnologia, Vol. 5, 134-142;
- Chang, C.S., 1988, *Measuring Density of Grain Kernels Using a Gas Pycnometer*, American Association of Cereal Chemists, Vol. 65;
- Chinnabun, K., Prachyawarakorn, S., Soponronnari, S., Wetchacama, S., 2004, *Methodology for enhancing drying rate and improving maize quality in a fluidized bed dryer* - Journal of Stored Products, Vol. 40, 379-393;
- Choi, M. e Meisen, A., 1992. *Hydrodynamics of shallow, conical spouted beds*, The Canadian Journal of Chem Eng., Vol. 70, 916-924;
- Conceição, F., 1997, *Recobrimento de Sementes de Soja com Fertilizantes em Leito de Jorro*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Química – UFU;
- Edwards, D.; Hamson, M., 1990, *Guide to Mathematical Modelling*, Boca Raton: CRC Press, 277;
- Eterno, R., 2006, *Modelação matemática*, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa – Departamento de Educação;
- Fane, G. e Mitchell, 1984, *A. Minimum Spouting Velocity of Scaled-Up Beds*, Can. J. Chem. Eng., Vol. 62, 437-439;

Geldart, D., 1973, *The Effect of Particle Size and Size Distribution on The Behavior of Gas-fluidized Beds* - Powder Technology, Vol. 26, 201-285;

Incropera, De Witt, Bergman, Lavine, 2002, *Fundamentals of heat and mass transfer*;

José, S., Pinho, E., Ramalho, M., Filho, J., 2005, *Características físicas do pericarpo de sementes de milho associadas com a tolerância à alta temperatura de secagem* - Revista Brasileira de Sementes, Vol. 27, Nº 1, 125-131;

Julião, J., 2008, *Dimensionamento de um secador de rolhas de leito em jorro para 5000 rolhas/hora* – Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, FEUP;

King, D. F. e Harrison, D., 1980, *The minimum spouting velocity of a spouted bed at elevated pressure*, Powder Technology, Vol. 26;

Laohavanich, J., Wongpichet, S., 2007, *Thin layer drying model for gas-fired infrared drying of paddy*, Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University;

Leite, J., 2005, *Simulação de secagem de milho utilizando o modelo matemático de Thompson*, Revista de Biologia e Ciências da Terra – Vol. 5 – Nº 2 - 2º Semestre;

Magalhães, A., 2004, *Caracterização de condições de secagem de rolhas de cortiça num leito em jorro* – Dissertação do Mestrado de Fundamentos e Aplicações da Mecânica dos Fluidos, FEUP;

Martins, B., 1990, *Determinação de curvas características da secagem de rolhas de cortiça*, Tese de Mestrado em Engenharia Térmica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;

Massarani, G., Charbel, T., Passos, L., 1999, *Analysis of effective solid stresses in a conical spouted bed*, Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 16, Nº4;

Mathur, K. e Epstein, N., 1974, *Spouted Beds*, Academic Press, Vancouver, Canada;

Miranda, P. et al, 2005, *O Clima de Portugal nos séculos XX e XXI*, 13-83; Projecto SIAM II, Gradiva, Lisboa

Mujumdar S., 2006, *Handbook of Industrial Drying, Third Edition*;

Nagahashi et al, 2006, *Spouting Enhancement by Addition of Small Quantities of Liquid to Gas-Spouted Beds*, The Canadian journal of Chemical Engineering –Vol. 84, 527-531;

Nitz. M. e Guardani R, 2008, *Revista Brasileira de Engenharia Química*, Vol.15, 281-294;

- Ogino *et al*, 1993. *Minimum rate of spouting and peak pressure-dop in a spouted bed*, Chem. Eng. of Japan Vol.33, 265-272,
- Oliveira, E., 2006, *Secagem de Spirulina Plantesis* – Fundação Universidade do Rio Grande do Sul;
- Osborne e Mendel, 1917, *The Relative Value of Certain Proteins and Protein Concentrates as Supplements to Corn Gluten*, Journal of Biological Chemistry, Vol. 29, 69;
- Pacheco C., 2001, *Curso de Especialização em Papel e Celulose*;
- Park K, Alonso L. F., Cornejo F. E., Fabbro I.M., 2007, *Seleção de Secadores*, Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Vol. 9, Nº2, Campina Grande;
- Park, K., António, G., Oliveira, R., 2006, *Seleção de Processos e Equipamentos de Secagem* – Palestra;
- Pinho, 2011, *Máquinas Térmicas* – Programa, Sebenta, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;
- Pinho, C. E., Guindeira M., 2005. *Dimensionamento de um secador rotativo* – Projecto de Instalações Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;
- Prado, M., 2004, *Secagem em leito fixo de sementes com mucilagem*, Tese de Doutoramento, São Paulo, Brasil;
- Rhodes, M., 2001, *Fluidization of Particles by Fluids, Educational Resources for Particle Technology*, Department of Chemical Engineering Monash University, Melbourne, Australia;
- Sandu, C., 1986, *Infrared radiative drying in food engineering: a process analysis*, Biotechnol, 09–19;
- Santini, E, Haselein, C., 2002, *Efeito da temperatura e velocidade do ar sobre a taxa de secagem da madeira de pinus elliottii engelm*, Ciência Florestal, Vol. 12, Santa Maria, Brasil;
- Santos, C., 2009, *Secagem de sementes de girassol via radiação de infravermelho e convecção forçada de ar aquecido* - Programa de pós-graduação em Engenharia de Processos, Universidade Tiradentes - UNIT;
- Silva, J., Corrêa, P., 2003, *Estrutura, composição e propriedades dos grãos*, Produtos Agroindustriais, Campina Grande, Vol. 5, 22-56;

Singh, V., Barreiro, L., McKinstry, J, Buriak, P., Eckhoff, R., 1997, *Effect of Kernel Size, Location, and Type of Damage on Popping Characteristics of Popcorn*, Agricultural Experiment Station, Volume 85;

Soares I. *et al*, 2008, *Decisões de Investimento – Análise Financeira de Projectos*, Edições Sílabo, Lisboa;

Sogi D.S., Gurpreet K. C., *Functional properties of rice bran protein concentrates*, Journal of Food Engineering, 592-597;

Sturumillo C. e Kudra T., 1986, *Drying: Principles, Applications And Design*, 224-227;

Uemaki, O., Yamada R., and Kugo M., 1983. *Particle segregation in a spouted bed of binary mixture*, Can. J. Chem. Eng. 61, 303-307.

Anexos

Anexo A – Folha exemplo do Excel

Dados das curvas de secagem														
	Temperatura ar [°C]	Velocidade ar [m/s]	Diâmetro eq. do grão [m]	Humidade relativa ar [%]	Tempo secagem [s]	Φ_{rad} [x1]	p ar [kg/m ³]	p milho [kg/m ³]	c milho [J/Kg.K]	v ar [m/s]	μ ar [Pa.s]	η_1	η_2	η_3
Journal of Stored Products PIN	70	1,397	0,004	9,7	60	29,87	1,029	1150	1691	1,397	0,0000205	0,0009	0,013385366	20955
	70	1,397	0,004	9,7	120	26,582	1,029	1150	1691	1,397	0,0000205	0,0009	0,006692683	41910
	70	1,397	0,004	9,7	190	24,224	1,029	1150	1691	1,397	0,0000205	0,0009	0,004226958	66358
	70	1,397	0,004	9,7	240	22,249	1,029	1150	1691	1,397	0,0000205	0,0009	0,003346341	83820
	70	1,397	0,004	9,7	300	19,617	1,029	1150	1691	1,397	0,0000205	0,0009	0,002677073	104775
	70	1,397	0,004	9,7	360	18,765	1,029	1150	1691	1,397	0,0000205	0,0009	0,002230894	125730
	70	1,397	0,004	9,7	420	18,203	1,029	1150	1691	1,397	0,0000205	0,0009	0,001912195	146685
	70	1,397	0,004	9,7	480	17,925	1,029	1150	1691	1,397	0,0000205	0,0009	0,001673171	167640
	70	1,397	0,004	9,7	540	17,647	1,029	1150	1691	1,397	0,0000205	0,0009	0,001487263	188595
	70	1,397	0,004	9,7	600	17,371	1,029	1150	1691	1,397	0,0000205	0,0009	0,001338537	209550
Journal of Stored Products LIGHT YELL	70	1,397	0,004	9,7	1200	16,279	1,029	1150	1691	1,397	0,0000205	0,0009	0,000669268	419100
	70	1,397	0,004	9,7	1500	16,279	1,029	1150	1691	1,397	0,0000205	0,0009	0,000535415	523875
	70	1,397	0,004	9,7	1800	16,279	1,029	1150	1691	1,397	0,0000205	0,0009	0,000446179	628650
	70	1,397	0,004	9,7	60	31,234	1,029	1266	1691	1,397	0,0000205	0,0008	0,013385366	20955
	70	1,397	0,004	9,7	120	28,535	1,029	1266	1691	1,397	0,0000205	0,0008	0,006692683	41910
	70	1,397	0,004	9,7	190	26,904	1,029	1266	1691	1,397	0,0000205	0,0008	0,004226958	66358
	70	1,397	0,004	9,7	240	24,688	1,029	1266	1691	1,397	0,0000205	0,0008	0,003346341	83820
	70	1,397	0,004	9,7	300	22,249	1,029	1266	1691	1,397	0,0000205	0,0008	0,002677073	104775
	70	1,397	0,004	9,7	360	21,212	1,029	1266	1691	1,397	0,0000205	0,0008	0,002230894	125730
	70	1,397	0,004	9,7	420	19,474	1,029	1266	1691	1,397	0,0000205	0,0008	0,001912195	146685
Journal of Stored Products LIGHT YELL	70	1,397	0,004	9,7	480	19,048	1,029	1266	1691	1,397	0,0000205	0,0008	0,001673171	167640
	70	1,397	0,004	9,7	540	18,765	1,029	1266	1691	1,397	0,0000205	0,0008	0,001487263	188595
	70	1,397	0,004	9,7	600	18,064	1,029	1266	1691	1,397	0,0000205	0,0008	0,001338537	209550
	70	1,397	0,004	9,7	1200	16,55	1,029	1266	1691	1,397	0,0000205	0,0008	0,000669268	419100
	70	1,397	0,004	9,7	1500	16,414	1,029	1266	1691	1,397	0,0000205	0,0008	0,000535415	523875
	70	1,397	0,004	9,7	1800	16,144	1,029	1266	1691	1,397	0,0000205	0,0008	0,000446179	628650
	70	1,397	0,004	9,7	60	31,062	1,029	1307	1691	1,397	0,0000205	0,0008	0,013385366	20955
	70	1,397	0,004	9,7	120	28,535	1,029	1307	1691	1,397	0,0000205	0,0008	0,006692683	41910
	70	1,397	0,004	9,7	190	26,904	1,029	1307	1691	1,397	0,0000205	0,0008	0,004226958	66358
	70	1,397	0,004	9,7	240	24,688	1,029	1307	1691	1,397	0,0000205	0,0008	0,003346341	83820

Figura 64: Exemplo da organização dos valores para a elaboração da curva de secagem

Anexo B – Valores finais fornecidos pelo EES

Search	Options	Calculate	Tables	Plots	Windows	Help	Examples							
$m_{mist,i}$ [kg/kg]	$h_{final,i}$ [kJ/kg]	$h_{s,i}$ [kJ/kg]	$\dot{Q}_{res,i}$ [kW]	$rh_{mist,i}$	T_i [°C]	$temp_i$ [s]	$T_{s,i}$ [°C]	$T_{mist,i}$ [°C]	$w_{mist,i}$	ws_i	X_i [-]			
68.82	72.84	73.98	23.62	13.76	29.93	5800	40.24	46.07	0.008677	0.01299	0			
68.79	72.81	73.91	23.59	13.74	29.95	5820	40.25	46.07	0.008665	0.01296	0			
68.77	72.78	73.85	23.55	13.72	29.98	5840	40.27	46.08	0.008654	0.01293	0			
68.74	72.75	73.79	23.52	13.69	30.01	5860	40.28	46.08	0.008642	0.0129	0			
68.72	72.72	73.73	23.48	13.67	30.04	5880	40.3	46.09	0.00863	0.01288	0			
68.7	72.69	73.67	23.45	13.65	30.07	5900	40.31	46.09	0.008619	0.01285	0			
68.67	72.66	73.61	23.41	13.63	30.1	5920	40.33	46.1	0.008607	0.01282	0			
68.65	72.63	73.55	23.37	13.6	30.13	5940	40.34	46.11	0.008596	0.01279	0			
68.63	72.6	73.5	23.34	13.58	30.16	5960	40.35	46.11	0.008585	0.01276	0			
68.6	72.57	73.44	23.3	13.56	30.19	5980	40.37	46.12	0.008574	0.01273	0			
68.58	72.54	73.38	23.27	13.54	30.21	6000	40.38	46.12	0.008562	0.01271	0			
68.56	72.52	73.33	23.23	13.52	30.24	6020	40.4	46.13	0.008551	0.01268	0			
68.54	72.49	73.27	23.2	13.5	30.27	6040	40.41	46.14	0.00854	0.01265	0			
68.51	72.46	73.21	23.16	13.48	30.3	6060	40.43	46.14	0.00853	0.01262	0			
68.49	72.43	73.16	23.13	13.46	30.33	6080	40.44	46.15	0.008519	0.0126	0			
68.47	72.4	73.1	23.09	13.44	30.36	6100	40.45	46.15	0.008508	0.01257	0			
68.45	72.38	73.05	23.06	13.42	30.39	6120	40.47	46.16	0.008497	0.01254	0			
68.43	72.35	73	23.02	13.39	30.41	6140	40.48	46.16	0.008487	0.01252	0			
68.4	72.32	72.94	22.99	13.37	30.44	6160	40.5	46.17	0.008476	0.01249	0			
68.38	72.3	72.89	22.95	13.35	30.47	6180	40.51	46.18	0.008465	0.01246	0			

Figura 65: Exemplo da organização dos valores no EES

Anexo C -Ventilador Centrífugo – VCE – AERO Mack

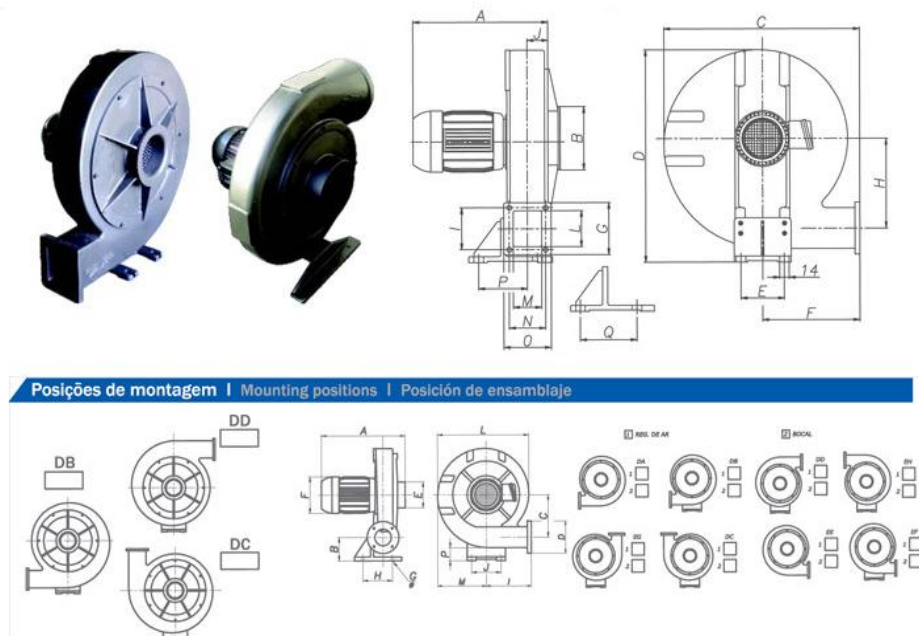


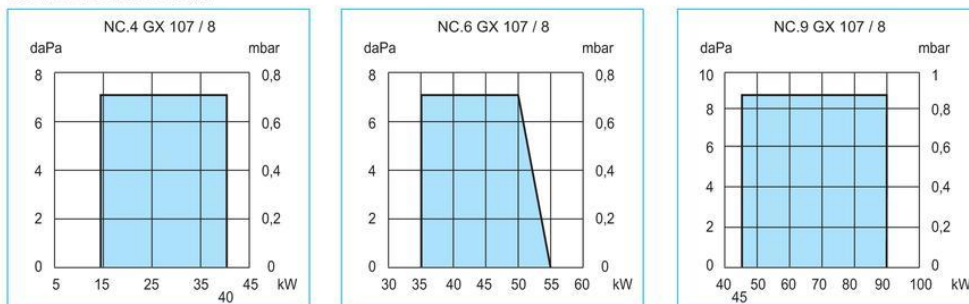
Figura 66: Exemplo construtivo do ventilador utilizado

TIPO	VAZÃO m ³ /min.	PRESSÃO m.m.c.a	POTÊNCIA cv	VOLTAGEM		NÍVEL RUÍDO	PESO kg
				trifásico	monofásico		
VSE-01	1,9	16	1/8	220/380	110/220		3
VSE-02	3,7	34	1/6	220/380	110/220		4
VSE-03	8,5	70	1/4	220/380	110/220		5
VSE-04	11,0	80	1/4	220/380	110/220		680
VSE-05	9,5 / 12,3	80 / 110	1/2	220/380	110/220		8
VSE-06	14,0	80	0,75	220/380	110/220		13
VSE-07/07E	16 / 28,0	90 / 140	1,00/1,5	220/380			14
VSE-08	32,0	130	1,50	220/380			19
VSE-09	38 / 45 / 50	142 / 150 / 200	2,00/3,00/4,00	220/380			25
VSE-10	70,0	190	5,00				43
VSE-30	75	46	2,00	220/380	440	F=66 / A=70	57

Figura 67: Dados técnicos dos ventiladores Siroco ELAM.

Anexo D- CUENOD Thermotechnique NC.6 GX

Performance charts.



Packing.

The burner and cover are delivered in a package that weighs approximately 12kg and contains:

- A bag of assembly accessories.
- Boiler plate,
- Documentation, including:
 - operating instructions,
 - electrical diagram,
 - certificate of guarantee,
 - sticker to be used for burners with upper casing where the temperature exceeds 10°C.
 - gas rack.

Flow / Output		CE 49 AS 2386				CE 49 BN 3690	
		NC.4 GX min max		NC.6 GX min max		NC.9 GX min max	
Burner	kW	14,5	40	40	55	45	90
Boiler *	kW	13,3	36,8	36,8	50,6	41,4	82,8
Nominal gas flow at 15°C and 1013 mbar							
- Natural gas group H	m ³ /h	1,53	4,23	4,23	5,82	4,76	9,52
	H _i = 9,45 kWh/m ³						
- Natural gas group L	m ³ /h	1,78	4,92	4,92	6,77	5,53	11,07
	H _i = 8,13 kWh/m ³						
- Propane	m ³ /h	0,59	1,64	1,64	2,25	1,84	3,68
Density kg/m ³ = 1,98	P _H = 24,44 kWh/m ³						

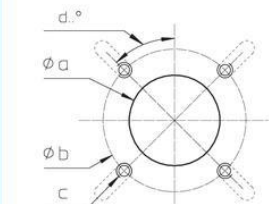
* E.g. with an efficiency of 92%.

Bulk and dimensions.

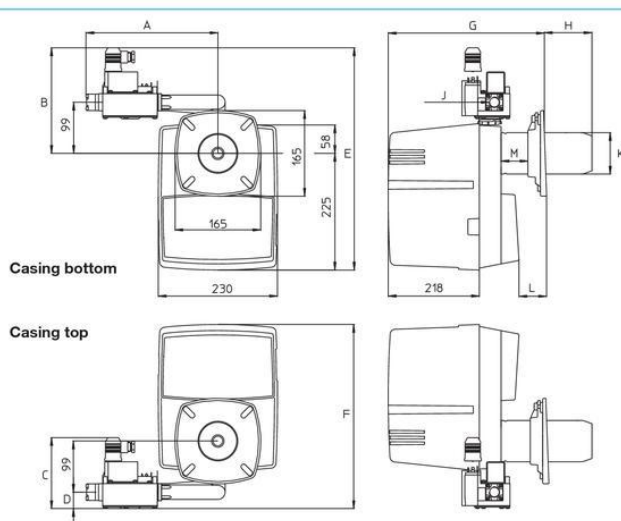
A minimum of 0.60m must be allowed on either side of the burner for maintenance purposes.

Ventilation in the boiler room.
1.2m³ of new air is required for every kWh produced by the burner.

Front panel boring.



	a (mm)	b (mm)	c	d
NC.4/6	85-104	150-170	M8	45°
NC.9	95-104	150-170	M8	45°



	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M
NC4/6 GX107/8 (CG10)	254	204	137	32	428	355	297 min 337 max	70 min 110 max	Rp1/2	Ø 80	21 min 61 max	48
NC9 GX107/8 (CG15)	266	240	179	38	465	404	300 min 355 max	70 min 138 max	Rp3/4	Ø 90	15 min 75 max	52

Figura 68: Aspectos técnicos e construtivos do queimador utilizado.

Anexo E – Simulações – Gás propano e Electricidade

Tabela XVII. Simulação do financiamento – Gás Propano.

Montante da Operação	41 231, 00€
Prazo	60 Meses
Entrada Inicial	0 €
Tipo de Taxa	Indexada
Indexante	Euribor a 12 Meses
Spread	5 %
TAN	6,71 %
TAEG	8,24 %
Primeiro Pagamento	
Primeira Prestação	933,99 €
Comissão de Estudo e Montagem	156,00 €
Comissão de Avaliação	520,00 €
Comissão de Contracto	82,00 €
Restantes Prestações	
Valor (médio)	814.02 €

Tabela XVIII. Simulação do financiamento - Electricidade

Montante da Operação	40 000, 00€
Prazo	60 Meses
Entrada Inicial	0 €
Tipo de Taxa	Indexada
Indexante	Euribor a 12 Meses
Spread	5 %
TAN	6,73 %
TAEG	8,20 %
Primeiro Pagamento	
Primeira Prestação	903,75 €
Comissão de Estudo e Montagem	156,00 €
Comissão de Avaliação	520,00 €
Comissão de Contracto	82,00 €
Restantes Prestações	
Valor (médio)	790,53 €

Anexo F – Rotinas EES