



Universidade do Porto

FEUP Faculdade de
Engenharia

Dimensionamento de um secador de rolhas de leito em jorro para 5000 rolhas/hora

Projecto realizado por:

Rui Joaquim Magalhães e Silva Julião

Projecto de fim de curso realizado sob a orientação de:

Professor Carlos Manuel Coutinho Tavares Pinho do Departamento de Engenharia
Mecânica e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

Este projecto consistiu no dimensionamento de um secador de rolhas de leito em jorro, com uma capacidade produtiva de 5000 rolhas por hora.

Partindo do conhecimento de resultados experimentais das características da secagem de rolhas de cortiça num leito em jorro à escala laboratorial, foi criado um modelo matemático para descrever os processos térmicos da secagem das rolhas de cortiça.

Numa fase final do projecto, e após definida uma configuração geométrica para o secador, foram testadas diversas condições de operação em função de alterações das condições ambiente. Definiu-se um parâmetro para avaliar o desempenho do secador para as diversas condições de operação, denominado de eficiência da secagem, e foram estimados os custos de operação associados à secagem de uma carga por dia ao longo de um ano.

Abstract

This project consisted in scaling a spouted bed cork stoppers drier with a production capacity for 5000 cork stoppers per hour.

The knowledge of experimental results, for the drying characteristics of cork stoppers in a laboratory scale spouted bed dryer, was the basis of the mathematical modelling of all thermal process that occurred in cork stoppers drying process.

In the final part of the project, after the definition of the geometrical dimensions of the dryer, its performance was evaluated under several operating regimes dependent upon ambient conditions. To evaluate the performance of the dryer under different working conditions a parameter was proposed, the drying efficiency. The operating costs for drying a batch each day for a year were calculated as well.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, pretendo agradecer ao Professor Carlos Pinho pela sua orientação, disponibilidade e assertividade na realização deste projecto. O seu contributo foi fundamental ao sucesso deste projecto.

Dedico este projecto a toda a minha família, em especial aos meus pais e também a todos os meus amigos.

Porém existe uma pessoa, que devo homenagear, agradecendo-lhe todo empenho e carinho que me dedica. Um obrigado muito especial para ti...Mana!

Índice

Nomenclatura	11
Enquadramento e Motivação	12
1.Introdução	13
2.Leito em Jorro	14
2.1 Introdução	14
2.2 A classificação de Geldart	15
2.3 Aerodinâmica de Leito em Jorro	16
2.4 Velocidade mínima de jorro	18
3.Secagem.....	19
3.1 Definição e características do fenómeno	19
3.2 Caracterização do tipo de humidade	20
3.2 Condições Externas.....	21
3.3 Mecanismos de transporte de humidade	21
3.4 Teor de humidade nos sólidos.....	21
3.5 Curvas de secagem	22
3.6 Variáveis adimensionais	23
4.O Modelo	25
4.1 Introdução	25
4.2 Dados experimentais	26
4.3 Modelação matemática.....	27
4.3.1Descrição	27
4.3.2 A Primeira Lei da Termodinâmica	27
4.3.3 Teor de humidade	28
4.3.4 Balanços Mássicos	30
4.3.5 Transferência de calor entre o ar de secagem e o leito de rolhas	31
4.3.6 Potência das resistências de aquecimento	32
4.3.7 Validação do Modelo.....	33
5.Dimensionamento do Secador	38
5.1 Introdução	38

5.2 Esquema do sistema de secagem.....	38
5.3 Dimensionamento do Reactor.....	39
5.3.1 Diâmetro da coluna.	39
5.4 Perdas térmicas	42
5.3.1 Determinação dos coeficientes de convecção:.....	42
5.5 Resultados da modelação matemática	44
5.6 Avaliação do desempenho do secador para diferentes condições operacionais	50
5.6.1 Condições exteriores	50
5.6.2 Percentagem de caudal de ar recirculado.....	50
5.6.3 Temperatura de secagem.....	50
5.6.4 Resultados	51
5.7 Eficiência da secagem.....	59
5.8 Custos de Operação.....	62
Conclusão.....	65
Bibliografia.....	67
Anexos	68
Anexo A – Folhas de equações no <i>EES</i>	68
Anexo B – Folha de resultados (<i>Arrays</i>) do <i>EES</i>	70
Anexo C – Gráficos do <i>EES</i> (exemplo).....	70

Índice de Figuras

Figura.2.1.1-Representação esquemática de um leito em jorro.....	14
Figura.2.3.1-Variação da queda de pressão com a velocidade do fluido num leito em jorro (Mathur e Epstein, 1974).....	16
Figura.2.3.2-Formação de um leito em jorro (Mathur e Epstein, 1974).....	17
Figura.3.2.1-Tipos de humidade existentes nos sólidos (Treybal, 1980).....	20
Figura.3.5.1-Curva típica da secagem (Molnár, 1995).	22
Figura.3.5.2-Cinética da secagem (Molnár, 1995).	22
Figura.4.1.1-Reactor do secador de rolhas laboratorial existente no INEGI.....	25
Figura.4.3.4.1-Esquema de convecção forçada em torno de um cilindro de comprimento finito.	32
Figura.5.2.1-Esquema do sistema de secagem.	38
Figura.5.4.1.1-Convecção forçada no interior de um cilindro com as dimensões do reactor.	43
Figura.5.4.1.2-Convecção natural em torno de um cilindro com as dimensões do reactor.	43

Índice de Tabelas

Tabela.4.2.1-Características das rolhas usadas na modelação.	26
Tabela.4.3.3.1-Condições de validação correlação (21) (Magalhães, 2004).....	30
Tabela.5.3.1.1-Parâmetros dimensionais do reactor considerando a totalidade da carga, 7500 rolhas, para diâmetros da coluna compreendidos entre os 0,4 m e 0,9 m.	40
Tabela.5.3.1.2-Parâmetros dimensionais do reactor considerando a metade da carga, 3750 rolhas, para diâmetros da coluna compreendidos entre os 0,4 m e 0,9 m.	41
Tabela.5.3.1.3-Parâmetros dimensionais do reactor considerando 7500 rolhas.	41
Tabela.5.5.1-Condições consideradas.	44
Tabela.5.5.2-Propriedades consideradas.	45
Tabela.5.6.4.1-Condições consideradas nas diversas situações.	51
Tabela.5.8.1-Potência média de aquecimento fornecida para temperaturas de secagem diferentes.....	62
Tabela.5.8.2-Custos de operação para temperaturas de secagem diferentes.	63
Tabela.5.8.3- Capacidade produtiva vs temperatura de secagem.....	64

Índice de Gráficos

Gráfico.4.3.3.1-Curvas características da secagem e respectivas curvas de tendência obtidas com a correlação (21).	29
Gráfico.4.3.7.1-Variação da temperatura das rolhas ao longo do tempo	34
Gráfico.4.3.7.2-Variação do teor de humidade (Xi) das rolhas ao longo do tempo	34
Gráfico.4.3.7.3-Evolução da temperatura do ar à saída do reactor.....	35
Gráfico.4.3.7.4-Evolução da humidade absoluta do ar à saída do reactor.....	35
Gráfico.4.3.7.5-Evolução do calor de evaporação comparativamente com a potência de aquecimento fornecida ao ar.	36
Gráfico.5.5.1-Evolução da temperatura das rolhas.....	45
Gráfico.5.5.2-Evolução da temperatura do ar à saída do reactor.....	46
Gráfico.5.5.3-Evolução do teor de humidade das rolhas.....	46
Gráfico.5.5.4-Evolução da humidade absoluta do ar à saída do reactor.....	47
Gráfico.5.5.5-Evolução da humidade absoluta da mistura de ar recirculado e ar novo.	47
Gráfico.5.5.6-Evolução da humidade relativa da mistura de ar recirculado e ar novo.	48
Gráfico.5.5.7-Evolução da temperatura da mistura de ar recirculado e ar novo.	48
Gráfico.5.5.8-Evolução da potência de fornecida à mistura de ar recirculado e ar novo.	49
Gráfico.5.6.4.1-Evolução da temperatura da mistura de ar recirculado com ar exterior função da percentagem de caudal reaproveitado.	52
Gráfico.5.6.4.2-Evolução da potência de aquecimento fornecida ao ar após mistura função da percentagem de ar recirculado.	53
Gráfico.5.6.4.3-Evolução da humidade absoluta à saída do reactor função da percentagem de ar recirculado.	53
Gráfico.5.6.4.4-Evolução da humidade relativa da mistura de ar recirculado com ar exterior função da percentagem de caudal recirculado.	54
Gráfico.5.6.4.5-Evolução da temperatura da mistura de ar recirculado com ar exterior função da percentagem de caudal reaproveitado em situação de Verão húmido.	55
Gráfico.5.6.4.6-Evolução da potência de aquecimento fornecida ao ar após mistura função da percentagem de ar recirculado em situação de Verão húmido.....	55
Gráfico.5.6.4.7-Evolução da humidade absoluta à saída do reactor função da percentagem de ar recirculado em situação de Verão húmido.....	56

Gráfico.5.6.4.8-Evolução da humidade relativa da mistura de ar recirculado com ar exterior função da percentagem de caudal recirculado.	56
Gráfico.5.6.4.9-Evolução do teor de humidade das rolhas função da temperatura de secagem.	57
Gráfico.5.6.4.10-Evolução da potência de aquecimento fornecida ao ar função da temperatura de secagem.	58
Gráfico.5.7.1-Evolução da eficiência de secagem ar função da temperatura de secagem considerando 20% de ar recirculado.	60
Gráfico.5.7.2-Evolução da eficiência de secagem ar função da temperatura de secagem considerando 50% de ar recirculado.	60
Gráfico.5.7.3-Evolução da eficiência de secagem ar função da temperatura de secagem considerando 70% de ar recirculado.	61
Gráfico.5.8.1-Evolução da potência de aquecimento do ar função da temperatura de secagem considerando 70% de ar recirculado.	62
Gráfico.5.8.2-Tempo necessário para que o teor de humidade das rolhas atinja os 9,5% função da temperatura.	63

Nomenclatura

Variável	Descrição	Unidades
A_r	Número de Arquimedes	-
D_b	Diâmetro da superfície do leito	m
D_c	Diâmetro da coluna	m
D_i	Diâmetro da entrada do jacto	m
d_p	Diâmetro da partícula	m
f	Taxa de evaporação normalizada	-
g	Aceleração da gravidade	ms^{-2}
H	Altura do leito	m
L	Altura da partícula	m
L_{crit}	Altura do leito para a qual são desprezáveis efeitos de parede	m
m_h	Massa do sólido húmido	kg
m_s	Massa do sólido seco	kg
m_t	Massa do sólido total	kg
N	Taxa de evaporação	kgs^{-1}
N_c	Taxa de evaporação crítica	kgs^{-1}
N_i	Taxa de evaporação	kgs^{-1}
Re_{ms}	Número de Reynolds	-
t	Tempo	s
T	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
T_e	Temperatura à entrada do reactor	$^{\circ}\text{C}$
T_s	Temperatura à saída do reactor	$^{\circ}\text{C}$
U	Velocidade superficial	ms^{-1}
U_{mf}	Velocidade mínima de fluidização	ms^{-1}
U_{ms}	Velocidade mínima de jorro	ms^{-1}
X	Teor de humidade	-
X_{bh}	Teor de humidade base na húmida	-
X_{bs}	Teor de humidade base na seca	-
X_{cr}	Teor de humidade crítico	-
X_e	Teor de humidade de equilíbrio	-
X_i	Teor de humidade de inicial	-
ρ_b	Massa específica da partícula	kgm^{-3}
ρ_f	Massa específica do fluido	kgm^{-3}
Φ	esfericidade	-

Enquadramento e Motivação

Actualmente o mercado das rolhas tem vindo a sofrer alterações profundas, e toda a dinâmica empresarial tem acompanhado necessariamente este processo. As rolhas sintéticas têm vindo a conquistar cada vez maiores quotas de mercado, porém a actual escalada do preço do petróleo e de seus derivados, poderá mais uma vez mais alterar esta tendência de mercado. Neste contexto as indústrias que utilizam nos seus produtos matérias-primas naturais, para além dos óbvios benefícios ambientais, poderão novamente reconquistar os mercados.

Para além dos factos acima descritos, que poderão servir como incentivo à indústria corticeira e todas as indústrias a esta associadas, Portugal, como país líder mundial deste segmento, deverá continuar a promover o crescimento do conhecimento nesta área, pois desde o século XVIII que somamos *know-how* nesta área e podemos afirmar que esta indústria faz parte do nosso código genético como nação.

1.Introdução

O ciclo de produção de rolhas na indústria corticeira inclui um processo de secagem das mesmas. Estes equipamentos são vulgarmente designadas por estufas, podem ser dos mais variados tipos e utilizam diversas fontes de energia, nomeadamente a energia solar, que apresenta os tempos de secagem mais longos, passando por salas de secagem aquecidas por queimadores a gás, estando as rolhas depositadas em sacos ou caixas de rede, até aos secadores mais complexos equipados com tapetes móveis, nos quais as rolhas transitam, obtendo-se desta forma tempos de secagem mais curtos independentemente das condições meteorológicas, embora à custa de um maior investimento tecnológico e por vezes energético.

O leito fluidizado constitui uma técnica adequada à secagem de pequenas cargas de diversos granulados (Geldart, 1986; Levenspiel, 1991; Yang, 2003). No caso das rolhas de cortiça, o leito em jorro surge como a técnica mais indicada à sua secagem, já que se tratam de partículas grosseiras que pertencem ao grupo D da classificação de Geldart (1973).

A fluidização constitui o processo pelo qual, partículas sólidas estacionárias adquirem um comportamento característico de um fluido, caracterizado pela suspensão das mesmas no seio do escoamento.

Certos materiais granulados devido às dimensões das suas partículas ou mesmo à sua elevada densidade são de fluidização difícil, aparecendo escoamentos preferenciais do fluido no seio do empilhamento de partículas sólidas. Trabalhos de investigação e desenvolvimento nestas condições de difícil fluidização levaram ao aparecimento do leito em jorro. O leito em jorro surge como um tipo não convencional de leito fluidizado, dedicado à aplicação em partículas de granulares e dimensões consideráveis. Este tipo de processo aparece nos mais variados segmentos industriais, tendo surgido no Canadá, em 1962 o primeiro secador de leito em jorro (Mathur e Epstein, 1974), o qual foi utilizado na secagem de ervilhas, lentilhas e linho.

O presente trabalho refere-se ao dimensionamento de um sistema de secagem de rolhas de leito em jorro com uma capacidade produtiva de 5000 rolhas/hora, sendo que os dados de secagem utilizados foram obtidos no trabalho *Caracterização de Condições de Secagem de Rolhas de Cortiça num Leito em Jorro* (Magalhães, 2004).

2.Leito em Jorro

2.1 Introdução

Na década de 50 surgem os primeiros desenvolvimentos dos leitos em jorro, nomeadamente na aplicação e desenvolvimento de uma técnica de secagem de trigo proposta por Mathur e Gishler. Contudo, a necessidade de minimização de consumos energéticos, duas décadas mais tarde, conduz a um sucessivo aumento da importância deste processo na aplicação a materiais granulares demasiado “grosseiros” para serem fluidizados.

No leito em jorro o tempo de residência das partículas no jorro é relativamente curto, sendo esta técnica indicada para materiais sensíveis ao calor, nomeadamente produtos alimentares e medicamentos.

A formação de um leito em jorro (Figura.2.1.1), tipicamente é conseguida pela introdução do gás de fluidização num orifício localizado no centro e base do leito, formando-se um jacto vertical que conduz a um mecanismo de movimentos cíclicos bem definidos, contrariamente ao fenómeno visível nos leitos fluidizados convencionais, nos quais as partículas apresentam um movimento aleatório (Mujumdar e Devahastin, 2003).

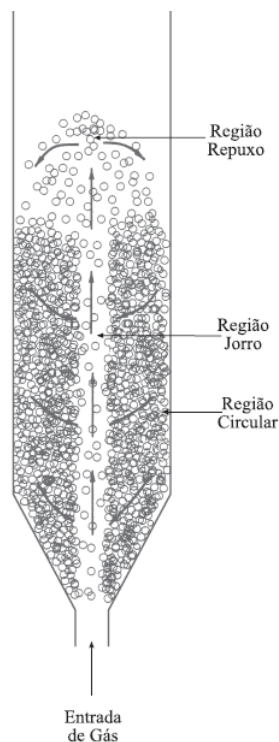


Figura.2.1.1-Representação esquemática de um leito em jorro.

O leito em jorro, é constituído tipicamente por uma coluna cilíndrica com uma base cónica que permite eliminar zonas de estagnação. A alimentação deste tipo de leitos pode ser contínua ou com cargas, verificando-se na análise da Figura.2.1.1 a existência de três zonas distintas e bem definidas:

- Região do Jorro: caracterizada pelo arrastamento das partículas até ao topo do leito;
- Região do Repuxo: ocorre o desenvolvimento de um repuxo, as partículas continuam em desaceleração até perderem totalmente a sua velocidade, caindo de seguida na região anelar;
- Região Circular: esta zona é caracterizada pelos movimentos cíclicos das partículas que se movem lentamente para cima e para baixo e do exterior para o interior, atingindo desta forma o jorro.

Para uma dada gama de velocidades do jacto a estabilidade do jorro depende de vários factores, tais como a dimensão do leito, as propriedades das partículas e configuração da coluna, delimitando estes factores, a par das propriedades do fluido, a velocidade mínima do jorro, bem como a altura máxima e queda de pressão máxima e de serviço do jorro (Mathur e Epstein, 1974; Passos et al., 1987).

Segundo Becker (1961) nem todos os leitos desenvolvem um regime de escoamento em jorro. Este autor definiu que para configurações cuja razão entre o diâmetro de entrada do jacto e da coluna que sejam superiores a 0,35, o regime, para vários materiais, passa de leito fixo directamente para leito fluidizado com o aumento da velocidade do gás.

2.2 A classificação de Geldart

Este autor (Geldart, 1973) classificou as partículas sólidas em quatro grupos, tendo em consideração o seu comportamento dinâmico num leito fluidizado por ar à temperatura ambiente e pressão atmosférica.

Verificou-se que as partículas pertencentes ao grupo D possuem características mais favoráveis a jorros estáveis, pesando embora o facto das partículas pertencentes ao grupo B poderem também ser utilizadas desde que em leitos rasos.

No seguimento destas conclusões, Baeyens e Geldart (1973) adoptaram um critério arbitrário, segundo o qual, se um leito de partículas com uma altura de 0.3 m entrar em jorro, então as partículas pertencem ao grupo D e desta forma definiram uma correlação empírica para distinguir sólidos do grupo B e grupo D.

$$(\rho_p - \rho_f)d_p^{1,24} > 0,23 \quad (1)$$

2.3 Aerodinâmica de Leito em Jorro

O mecanismo de transição de um leito fixo para um leito em jorro pode ser representado pela variação da queda de pressão em função do aumento de velocidade do fluido, Figura.2.3.1.

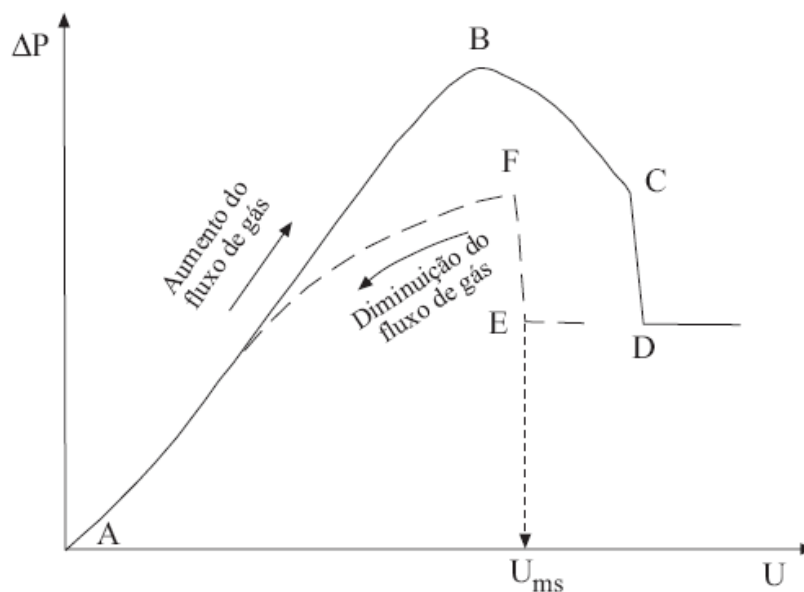


Figura.2.3.1-Variação da queda de pressão com a velocidade do fluido num leito em jorro (Mathur e Epstein, 1974).

Durante a subida gradual da velocidade, o fluido penetra no leito sem que ocorra uma perturbação das partículas, aumentando a queda de pressão segundo a linha AB. Inicia-se desta forma um jacto suficientemente forte para deslocar as partículas, formando uma pequena cavidade imediatamente acima da entrada. As partículas em volta desta cavidade são comprimidas contra as que estão na camada acima, formando um arco compacto que provoca uma grande resistência à passagem do fluido (Figura2.3.2.a). O sucessivo aumento de velocidade do fluido faz com que a cavidade formada se alongue originando um jorro interno (Figura.2.3.2.b) mantendo-se o arco compacto até a que a queda de pressão atinja o valor máximo, ponto B.

Aumentando a velocidade do fluido, para além do ponto B, a altura do jorro interno aumenta até tornar-se maior que a altura das partículas acima do jorro e a queda de pressão vai diminuindo ao longo da linha BC.

Quando o ponto C é atingido, ponto de jorro incipiente, um ligeiro aumento da velocidade do fluido faz com que o jorro interno atravessasse a superfície do leito, nesta fase ocorre a uma diminuição da concentração de partículas na região imediatamente acima do jorro interno e por consequência, ocorre também uma queda de pressão, atingindo-se desta forma o ponto D, ponto no qual ocorre a formação de um jorro estável (Figura.2.3.2.c). A partir deste ponto, o contínuo aumento da velocidade não produz alteração na queda de pressão.

Contudo a diminuição de velocidade, após a formação do jorro estável, conduz ao ponto E, que traduz a condição de velocidade mínima, a partir deste ponto, uma ligeira diminuição da velocidade do fluido induz, naturalmente, o colapso do jorro, ponto F. Seguindo-se uma progressiva diminuição do fluxo de fluido a queda de pressão segue a linha FA, salientando-se que nesta situação, a diminuição é mais reduzida, visto que a energia necessária à penetração do jacto nas partículas já não é necessária.

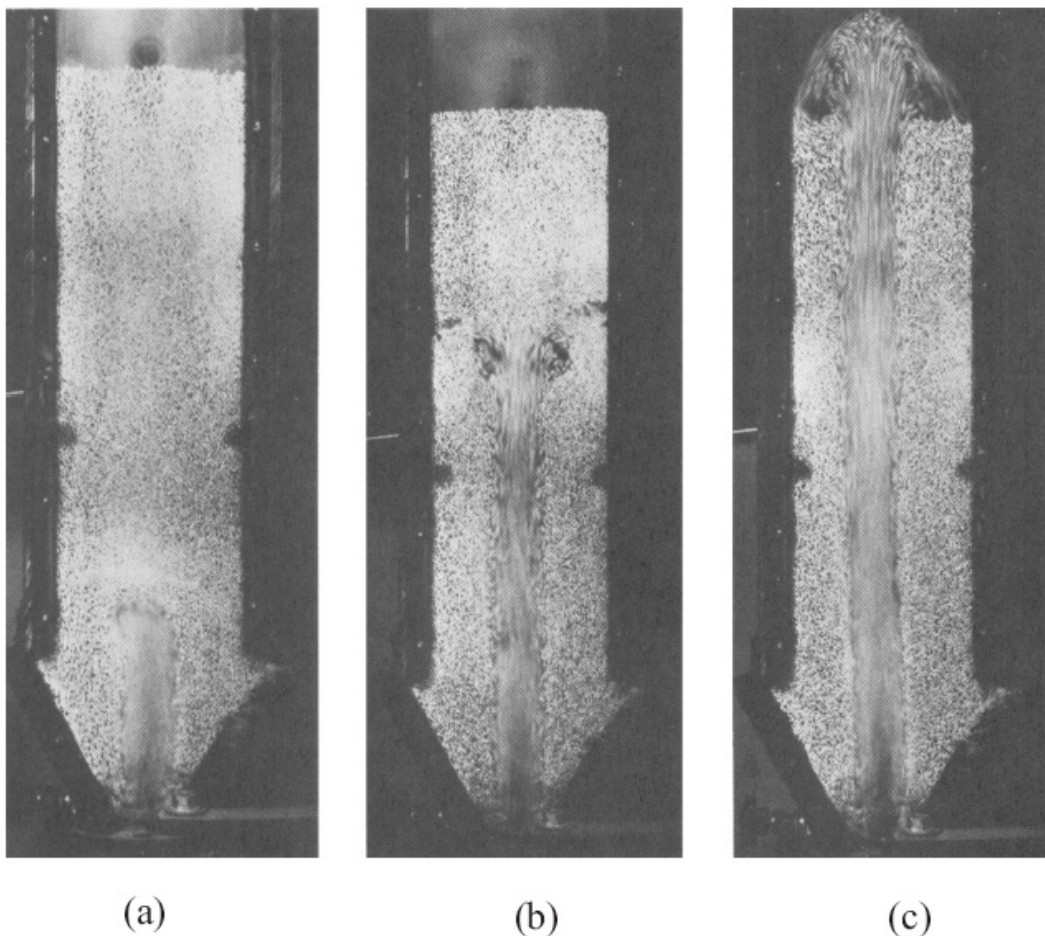


Figura.2.3.2-Formação de um leito em jorro (Mathur e Epstein, 1974).

2.4 Velocidade mínima de jorro

A velocidade mínima de jorro é a velocidade mínima para a qual o leito entra em jorro. Esta velocidade depende das propriedades do fluido e partículas, mas também da geometria do leito. A velocidade mínima de jorro para um dado material, aumenta com a diminuição do diâmetro da coluna e o aumento da altura do leito.

Uma aproximação muito simples para se chegar a uma equação adequada ao cálculo da velocidade mínima de jorro é a de se desenvolver uma correlação envolvendo parâmetros adimensionais que caracterizem as condições de operação do leito em jorro. Tal análise dimensional, considerando os parâmetros que caracterizam os leitos em jorro, nomeadamente, geometria do leito e partículas e propriedades do gás de fluidização permite obter uma relação do seguinte tipo (Mathur e Epstein, 1974; Markowski e Kaminski, 1983; Costa e Taranto, 2003):

$$\frac{U_{ms}d_p\rho_f}{\mu_f} = f \left[\left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right), \left(\frac{d_p}{D_c} \right), \left(\frac{D_i}{D_c} \right), \left(\frac{H}{D_c} \right), \left(\frac{gd_p^3\rho_f(\rho_p - \rho_f)}{\mu_f^2} \right) \right] \quad (2)$$

No presente trabalho, como os resultados experimentais utilizados são relativos a partículas do mesmo tipo de material, o grupo adimensional (ρ_p/ρ_f) não é importante.

Partindo do tratamento de resultados experimentais (Ana Magalhães, 2004), obtém-se:

$$Re_{ms} = 0.3436 \left(\frac{d_p}{D_c} \right)^{0.1006} \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{0.7873} \left(\frac{H}{D_c} \right)^{0.4812} Ar^{0.5554} \quad (3)$$

Sendo

$$Re_{ms} = \frac{U_{ms}d_p\rho_f}{\mu_f} \quad (4)$$

o número de Reynolds do leito nas condições mínimas do jorro enquanto que o número de Arquimedes é dado por:

$$Ar = \frac{gd_p^3\rho_f(\rho_p - \rho_f)}{\mu_f^2} \quad (5)$$

3. Secagem

3.1 Definição e características do fenómeno

A secagem de materiais sólidos é um processo bastante antigo e comum, podendo ser encontrado nas mais variadas actividades e indústrias, nomeadamente química, farmacêutica, papelreira, têxtil, etc. Dado o seu cariz, e elevada aplicação prática, tem sido alvo de grandes desenvolvimentos tecnológicos.

A secagem, matéria do âmbito da transferência de massa, consiste na remoção térmica de substâncias voláteis de materiais sólidos húmidos, ocorrendo dois tipos de fenómenos térmicos durante este processo, nomeadamente:

- Transferência da energia do meio envolvente para o material em causa, dando origem à evaporação na superfície húmida. Neste processo, a humidade removida à superfície das partículas, depende apenas das condições externas do meio envolvente, especificamente, a temperatura, velocidade e humidade do ar, área exposta de secagem e pressão.
- Migração interna da humidade até à superfície do material, seguindo o fenómeno descrito no ponto anterior. A natureza física do material condiciona este fenómeno, na medida em que, a transferência de calor e massa e respectiva migração da humidade a elas associada, são pontos indissociáveis da própria natureza física do material.

Estes dois processos definem toda a cinética da secagem, sendo que a sua simultaneidade e velocidade determinam obrigatoriamente a taxa de secagem.

A transferência de energia para os materiais húmidos, pode ser realizada através dos três fenómenos de transferência de calor, ou seja, por condução, convecção e radiação:

Condução

Este meio de transferência de calor é indicado para sólidos de espessuras reduzidas e elevados teores de humidade. O calor necessário à evaporação dos voláteis, é fornecido por superfícies quentes que se encontram em contacto com o sólido a secar. Apesar do baixo consumo energético este processo apresenta um controlo de temperatura difícil.

Convecção

É o meio de transferência de calor mais utilizada pela tecnologia industrial. Neste caso, o fluido, para além de fazer o transporte da humidade da evaporação, devido ao seu aquecimento, transferirá para o sólido húmido a energia necessária à própria

evaporação. Como grande vantagem, é de salientar o fácil controlo das condições externa de secagem, bem como o baixo risco de sobreaquecimento dos sólidos.

Radiação

A secagem por radiação pode utilizar várias fontes de radiação electromagnética, cujas gamas de comprimentos de onda podem estar compreendidas em todo o espectro solar e micro-ondas. Relativamente à radiação solar, esta penetra pouco nos sólidos e está também condicionada pelos comprimentos de onda em que os sólidos absorvem radiação. A radiação de infravermelhos é bastante usada na secagem de películas finas, porém os investimentos e os custos de operação são consideráveis, sendo uma tecnologia usada apenas quando há necessidade de corrigir perfis de humidade ou remover pequenas quantidades de água.

3.2 Caracterização do tipo de humidade

A humidade nos sólidos pode ser de três tipos, respectivamente, *humidade ligada ou higroscópica*, que pode ser definida como a humidade existente no interior dos sólidos que exerce uma pressão de vapor inferior à exercida por uma superfície plana de um líquido puro (pressão de saturação); *humidade não ligada ou não higroscópica*, é a humidade cuja pressão de vapor é idêntica à pressão de saturação; e por fim, *humidade livre* que se encontra contida num sólido cujo teor de humidade é superior ao de equilíbrio das condições externas (Martins, 1990; Mujumdar e Menon, 1994).

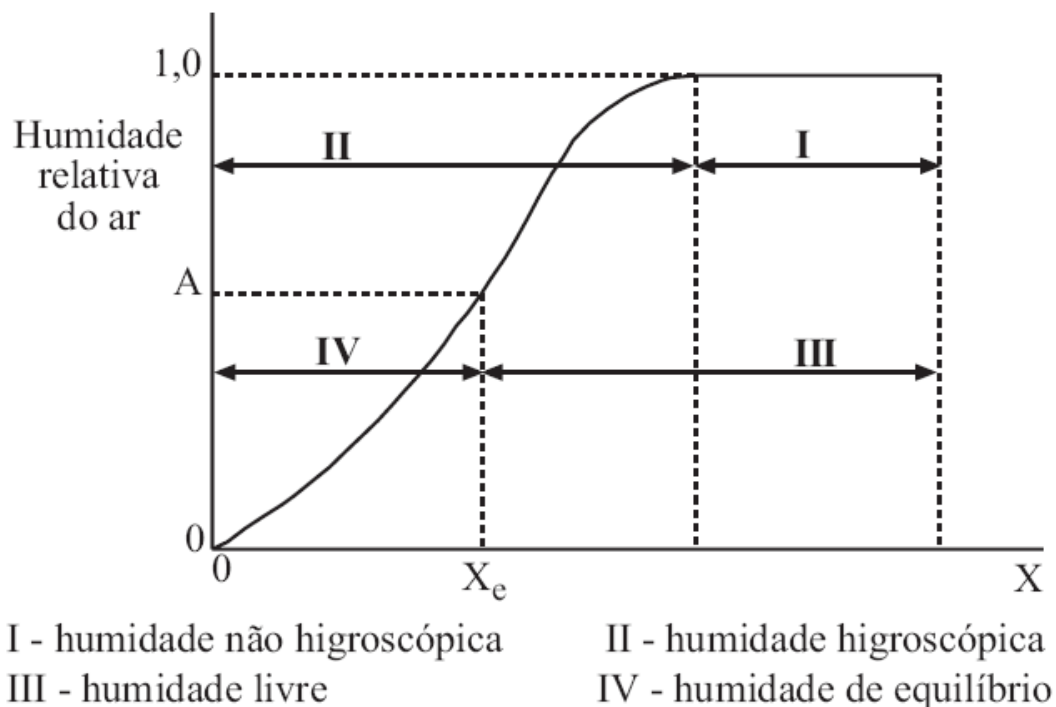


Figura.3.2.1-Tipos de humidade existentes nos sólidos (Treybal, 1980).

3.2 Condições Externas

As condições externas a ser levadas em consideração no dimensionamento de secador são a temperatura, humidade, velocidade do ar e geometria das rolhas. A definição destas variáveis e a sua respectiva simulação é fundamental à validação do próprio modelo definido.

3.3 Mecanismos de transporte de humidade

Existem vários mecanismos responsáveis pelo transporte da humidade, estes podem actuar quer individual, quer conjuntamente (Fortes e Okos, 1980; Magalhães, 2004):

- Difusão de líquido e/ou vapor;
- Movimento do líquido devido forças capilares;
- Difusão de Knusen;
- Evaporação-condensação;
- Fluxo de líquido ou vapor devido a gradientes de pressão elevados.

3.4 Teor de humidade nos sólidos

A secagem origina mudanças de volume nos sólidos, por esta razão a definição de teores de humidade em função de volume não é atractiva, como tal a sua definição deverá ser realizada em função de massas.

Este tipo de definição pode ser feito na base mássica húmida ou base mássica seca.

O teor de humidade na base mássica húmida (X_{bh}), define-se como o quociente entre a massa de humidade (m_h) e massa total (m_t)

$$X_{bh} = \frac{m_h}{m_t} = \frac{m_t - m_s}{m_t} \quad (6)$$

Onde m_s é a massa de sólido seco.

Relativamente ao teor de humidade na base mássica seca (X_{bs}), este define-se como o quociente entre a massa de humidade e a massa de sólido seco

$$X_{bs} = \frac{m_h}{m_s} = \frac{m_t - m_s}{m_s} \quad (7)$$

3.5 Curvas de secagem

Teor de Humidade vs Tempo de Secagem

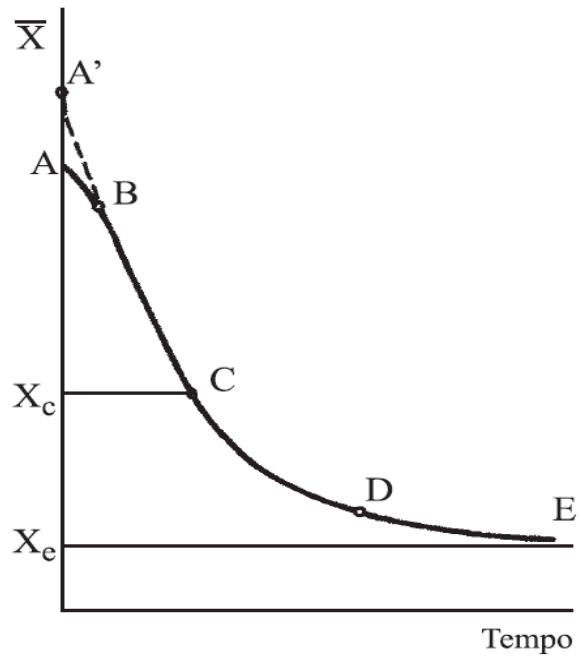


Figura.3.5.1-Curva típica da secagem (Molnár, 1995).

Taxa de Evaporação vs Teor de Humidade (cinética da secagem)

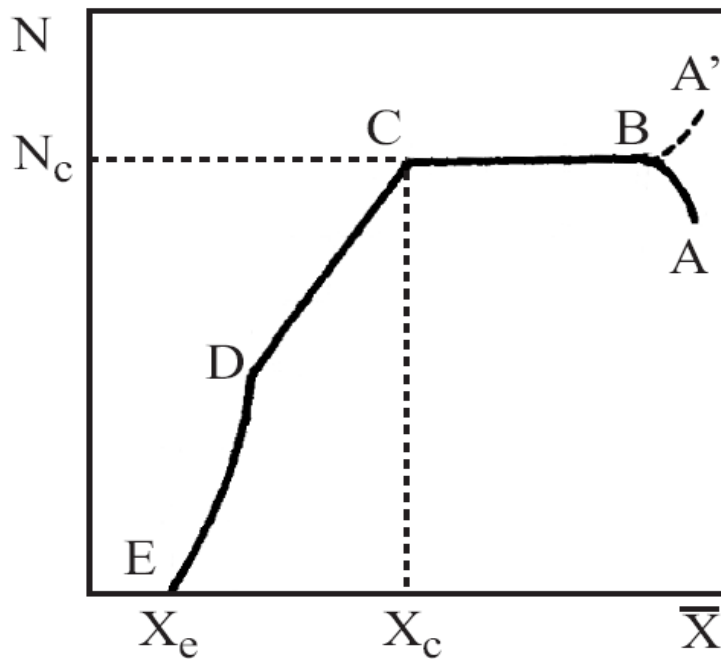


Figura.3.5.2-Cinética da secagem (Molnár, 1995).

A taxa de evaporação define-se como o simétrico da derivada do teor de humidade em ordem ao tempo:

$$N = -\frac{d\bar{X}}{dt} \quad (8)$$

A análise das curvas representadas nas Figuras.3.5.1 e Figuras.3.5.2 indicia a existência de quatro fases distintas que ocorrem aquando da secagem (Fortes e Okos, 1980; Santos, 1985; Martins, 1990; Mujumdar e Menon, 1995):

Período Inicial Transitório

Período de curta duração que corresponde à linha AB, durante esta fase a temperatura do sólido tende a ajustar-se até atingir o valor de equilíbrio.

Período de Taxa de Evaporação Constante

Na fase inicial da secagem, existência de um teor de humidade inicial elevado dá origem à formação de um filme líquido à superfície do sólido, ou seja, a difusão de líquido no interior do sólido é suficientemente rápida para que o filme líquido se mantenha à superfície. Este período controlado pelas condições externas corresponde à linha BC.

Primeiro Período de Taxa de Evaporação Decrescente

Neste período, a evaporação à superfície diminui na medida em que a humidade no interior do sólido também diminui, não havendo garantia de continuidade do filme líquido à superfície. O ponto para o qual se inicia este período designa-se por ponto crítico, sendo que o teor de humidade médio corresponde à humidade crítica. Este período encontra-se representado pela linha CD.

Segundo Período de Taxa de Evaporação Decrescente

Este período, linha DE, caracteriza-se pelo completo desaparecimento do filme líquido à superfície do sólido e ocorre um agravamento do gradiente de concentração entre o interior do sólido e a superfície do mesmo. A taxa de evaporação passa então a ser completamente governada pelos mecanismos internos de líquido, tendendo a taxa de evaporação para zero até o teor de humidade atingir o seu valor de equilíbrio.

3.6 Variáveis adimensionais

A existência de variáveis adimensionais é fundamental para a realização de um projecto deste tipo, visto que são indispensáveis a uma correcta manipulação dos dados e à criação do próprio modelo matemático, permitindo inclusive a extrapolação de situações não validadas do ponto de vista experimental, se bem que este procedimento seja bastante discutível. A determinação das curvas de secagem para dadas condições bem definidas apresentam-se semelhantes, e a sua posterior

normalização permite a obtenção de apenas uma curva característica de secagem para um dado material (Martins, 1990).

As variáveis normalizadas são a taxa de evaporação característica f e o teor de humidade característico:

Taxa de evaporação característica

$$f = \frac{N}{N_c} \quad (9)$$

No caso de ausência do período de taxa de evaporação constante, a taxa de evaporação característica é dada por:

$$f = \frac{N}{N_i} \quad (10)$$

Teor de humidade característico

$$\Phi = \frac{\bar{X} - X_e}{X_{cr} - X_e} \quad (11)$$

No caso de ausência do período de taxa de evaporação constante, o teor de humidade característico pode ser dado por:

$$\Phi = \frac{\bar{X} - X_e}{X_i - X_e} \quad (12)$$

Definindo-se os parâmetros anteriores como:

- N – Taxa de evaporação;
- N_c – Taxa de evaporação crítica;
- N_i – Taxa de evaporação inicial;
- X_e - Teor de humidade de equilíbrio;
- X_{cr} - Teor de humidade crítico;
- X_i - Teor de humidade inicial.

4.0 Modelo

4.1 Introdução

A modelação matemática dos processos termodinâmicos que ocorrem durante a secagem das rolhas é fundamental à execução deste projecto.

A modelação baseou-se em resultados experimentais (Magalhães, 2004) obtidos num leito à escala laboratorial existente no INEGI. São conhecidas as curvas de secagem ao longo do tempo, as condições mínimas de jorro e a evolução queda de pressão no leito.

A existência destes resultados é de importância vital em todo o modelo matemático desenvolvido pois, permite a sustentação do modelo, bem como o assegurar de uma passagem de escala laboratorial para uma escala industrial, durante o processo de dimensionamento do secador.



Figura.4.1.1-Reactor do secador de rolhas laboratorial existente no INEGI.

4.2 Dados experimentais

Na criação do modelo matemático, e apesar dos inúmeros tipos de rolhas disponíveis no mercado, com o intuito de uma melhor sustentação do processo de dimensionamento, considerou-se o mesmo tipo de rolhas utilizado na determinação das curvas de secagem das rolhas.

A cortiça apesar de difícil classificação, dada a sua estrutura celular complexa é classificada como um material poroso higroscópico-capilar (Martins, 1990).

As características das rolhas utilizadas na criação da modelação, encontram-se evidenciadas na tabela seguinte:

Dimensões (L x D) (mm x mm)	D_{eq} (mm)	ϕ	d_p (mm)	ρ_p (kg/m ³)
29 x 21	26,8	0,866	23,2	164,8

Tabela.4.2.1-Características das rolhas usadas na modelação.

A classificação de Geldart

Naturalmente que as dimensões das partículas são um factor de extrema importância, este facto já focado no ponto 2.2 do presente trabalho, foi verificado neste ponto. Esta verificação teve por base o critério arbitrário definido por Baeyens e Geldart (1973), o qual que a diferenciação entre partículas do grupo D e B é dada por:

$$(\rho_p - \rho_f)d_p^{1,24} > 0.23 \quad (13)$$

então, aplicando a expressão às partículas em causa tem-se:

$$(164,8 - 1.204)(26,8 \times 10^{-3})^{1,24} = 1,839 \quad (14)$$

Pode constatar-se então, que as rolhas pertencem ao grupo D, pois o resultado é superior ao limite estabelecido pela expressão, tendo sido considerado como condições de pressão e temperatura ambiente, respectivamente 1 atm e 20°C. Efectuando os mesmos cálculos para as temperaturas de secagem de 60°C e 70°C, respectivamente, obtêm-se os seguintes valores:

$$(164,8 - 1,056)(26,8 \times 10^{-3})^{1,24} = 1,8409 \quad (T_{secagem} = 60^\circ C) \quad (15)$$

$$(164,8 - 1,056)(26,8 \times 10^{-3})^{1,24} = 1,8413 \quad (T_{secagem} = 70^\circ C) \quad (16)$$

4.3 Modelação matemática

4.3.1 Descrição

A abordagem do problema iniciou-se com a observação e análise de resultados experimentais existentes (Magalhães, 2004). Seguidamente os processos termodinâmicos foram descritos e, por fim, com o modelo matemático criado, procurou-se validá-lo, isto é, confirmar se os resultados obtidos se encontram de acordo a bibliografia.

O *software* utilizado na modelação matemática foi o *Engineering Equation Solver (EES)*. Esta escolha prende-se com a sua facilidade de utilização, versatilidade no tratamento de problemas térmicos e por fim, devido a possuir um ambiente de trabalho muito amigável.

4.3.2 A Primeira Lei da Termodinâmica

A modelação matemática, relativamente aos fenómenos térmicos envolvidos, naturalmente baseou-se na Primeira Lei da Termodinâmica aplicada a escoamentos em regime uniforme:

$${}_tQ_{t'} - {}_tW_{t'} = m(t')u(t') - m(t)u(t) + \sum_{sai} \left(h_j + \frac{1}{2}c_j^2 + gz_j \right) \dot{m}_j - \sum_{entra} \left(h_j + \frac{1}{2}c_j^2 + gz_j \right) \dot{m}_j \quad (17)$$

Onde:

- $m(t)$ - Massa contida no volume de controlo no instante de tempo t ;
- $u(t)$ - Energia interna específica referente ao volume de controlo no instante de tempo t ;
- $m(t')$ - Massa contida no volume de controlo no instante de tempo t' ;
- $u(t')$ - Energia interna específica referente ao volume de controlo no instante de tempo t' ;
- \dot{m}_j - Caudal que entra ou sai do volume de controlo;
- h_j - Entalpia específica do fluido em cada secção de entrada ou saída do volume de controlo;
- c_j - Velocidade média do fluido em cada secção de entrada ou saída do volume de controlo;
- z_j - Cota de cada secção de entrada ou saída do volume de controlo.

No desenvolvimento que se segue as quantidades referentes à rolha (cortiça) seca e à água, vêm separadas. O mesmo acontece com os caudais de ar seco e os correspondentes caudais de vapor de água. Deste modo os balanços mássicos aparecem de uma forma mais clara como se constatará no desenvolvimento seguinte.

No processo em causa não há trabalho envolvido logo da análise do leito em jorro entre os instantes t e $t' = t + \Delta t$ tem-se:

$$Q_{perdas} = m_{rs}(t')u_{rs}(t') + m_{rw}(t')u_{rw}(t') - [m_{rs}(t)u_{rs}(t)] + m_{rw}(t)u_{rw}(t) \\ + \dot{m}_{as}\Delta t[c_{pa}T_s + \omega_s(t')(c_{pv}T_s(t') + h_{vl}) - \dot{m}_{as}\Delta t[c_{pa}T_e \\ + \omega_e(c_{pv}T_e + h_{vl})]$$

Ainda numa outra forma,

$$Q_{perdas} = m_{rs}c_r(T_r(t') - T_r(t)) + m_{rs}c_{wl}(X(t')T_r(t') - X(t)T_r(t)) \\ + \dot{m}_{as}\Delta t[c_{pa}T_s(t') + \omega_s(t')(c_{pv}T_s(t') + h_{vl}) - \dot{m}_{as}\Delta t[c_{pa}T_e \\ + \omega_e(c_{pv}T_e + h_{vl})] \quad (19)$$

E sabendo que $t' = t + \Delta t$

Admitindo numa primeira aproximação que o leito é adiabático, logo o $Q_{perdas}=0$, sendo que os parâmetros conhecidos são:

- m_{rs} - Massa da rolha seca;
- m_{rw} - Massa de água nas rolhas;
- \dot{m}_{as} - Caudal mássico de ar seco que entra no reactor;
- T_e - Temperatura do ar de entrada no reactor;
- T_r - Temperatura das rolhas;
- T_s - Temperatura do ar à saída do reactor;
- ω_e - Humidade absoluta do ar de entrada no reactor;
- ω_s - Humidade absoluta do ar à saída do reactor;
- c_r - Calor específico da cortiça;
- c_{wl} - Calor específico da água líquida a pressão constante;
- c_{pv} - Calor específico do vapor de água a pressão constante;
- c_{pa} - Calor específico do ar a pressão constante;
- $X(t')$ - Teor de humidade;
- Δt - Passo temporal;
- N - Número de iterações.

Todo o desenvolvimento se baseia na constância da massa de rolhas secas e do caudal mássico de ar seco. Deste modo o teor em humidade das rolhas vem sempre definido na base seca.

4.3.3 Teor de humidade

De forma a conhecer o valor de teor de humidade característica em cada instante de tempo, condição fundamental para toda a modelação matemática, considerou-se a informação existente na bibliografia (Magalhães, 2004).

A partir dos resultados experimentais da variação do teor de humidade característico obtidos por Magalhães (2004) obteve-se o valor do teor de humidade nas rolhas a cada instante.

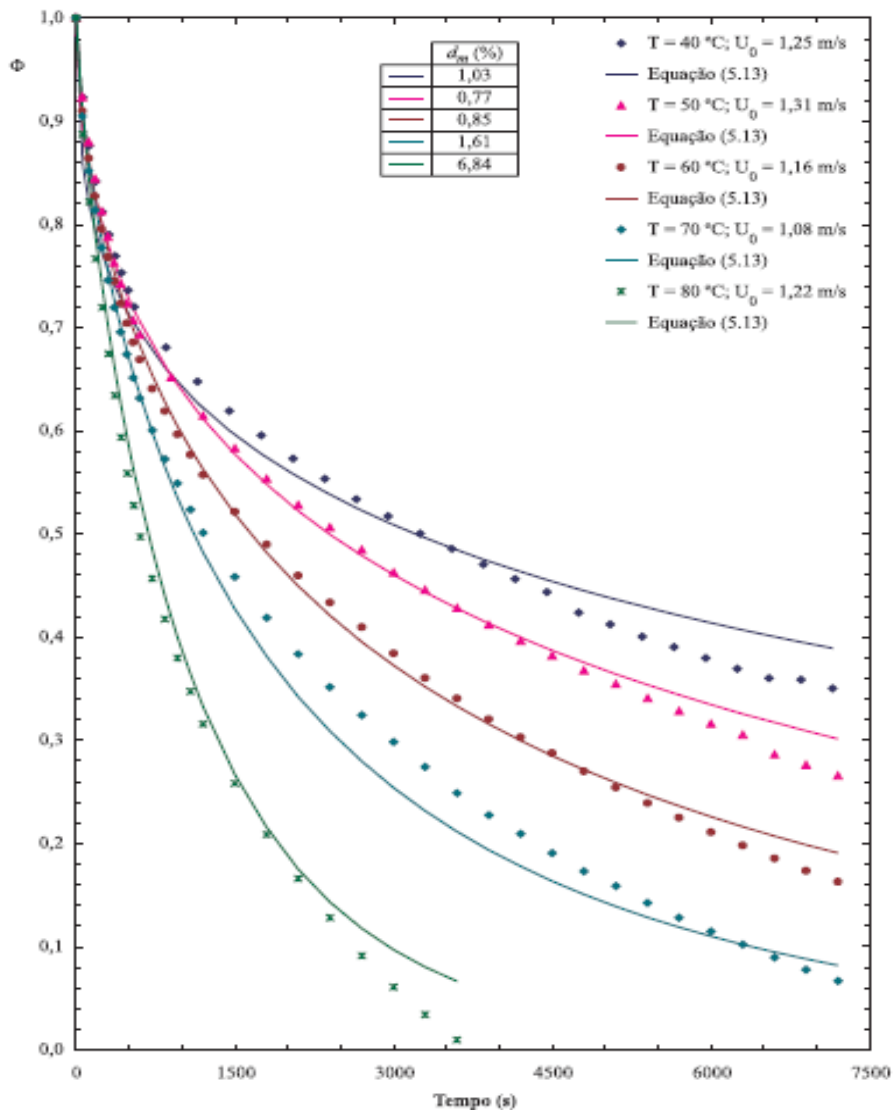


Gráfico.4.3.3.1-Curvas características da secagem e respectivas curvas de tendência obtidas com a correlação (21).

A observação das curvas de características permite identificar uma tendência exponencial, como tal Magalhães (2004), procurou identificar um modelo ajustável aos resultados. Vários autores (Martins, 1990; Nadeau e Puiggali, 1995; Ertekin e Yaldiz, 2003) admitem a possibilidade de aplicação de modelo simples dado pela expressão seguinte:

$$\Phi = \exp(-kt^n) \quad (20)$$

em que $k = f(T, U)$ e $n = g(T, U)$.

A correlação obtida por Magalhães (2004) para o valor de teor de humidade característica é da pala expressão seguinte:

$$\Phi_p = \exp[-6284T^{-3,27}U^{-0,78}t^{(0,0063T^{1,1}U^{0,25})}] \quad (21)$$

Por fim, deverá ter-se em consideração que as condições de validade da expressão (21) são as seguintes:

	Φ_p (-)	T (°C)	RH (%)	U_0 (m/s)
Mínimo	0,0033	40	3,8	1,08
Máximo	1,00	80	22,4	1,78

Tabela.4.3.3.1-Condições de validação correlação (21) (Magalhães, 2004).

Igualando a expressão anterior a:

$$\Phi = \frac{\bar{X} - X_e}{X_i - X_e} \quad (22)$$

obtém-se o valor de teor de humidade para cada instante. Foi considerada a expressão (12) e não a expressão (11) pois na secagem de rolhas de cortiça não existe período de taxa de evaporação constante.

4.3.4 Balanços Mássicos

Estabelecendo os balanços mássicos existentes no processo torna-se possível relacionar as expressões e desta forma igualar o número de incógnitas ao número de equações. Considerando a análise do leito em jorro entre os instantes t e $t' = t + \Delta t$ tem-se:

$$m_{rw}(t') - m_{rw}(t) = \dot{m}_a \Delta t \omega_e - \dot{m}_a \Delta t \omega_e(t') \quad (23)$$

Sabendo que:

$$m_{rw}(t') = m_{rs} X(t') \quad (24)$$

$$m_{rw}(t) = m_{rs} X(t)$$

Logo simplificando obtém-se:

$$\frac{X(t') - X(t)}{\Delta t} = \frac{\dot{m}_a (\omega_e - \omega_e(t'))}{m_{rs}} \quad (26)$$

Foi considerada também a reciclagem do ar de secagem proveniente do reactor, sendo essa relação estabelecida pela seguinte expressão:

$$\dot{m}_a \omega_{mistura} = (1 - \beta) \dot{m}_a \omega_e + \beta \dot{m}_a \omega_e(t') \quad (27)$$

Onde:

- β – Traduz a percentagem de ar recirculado.

4.3.5 Transferência de calor entre o ar de secagem e o leito de rolhas

Por fim, é necessário estabelecer o balanço energético associado à transferência de calor entre o ar de secagem e o leito de rolhas.

$$\begin{aligned} & (\text{energia inicial da corrente gasosa}) - (\text{energia final da corrente gasosa}) \\ & = (\text{energia térmica transmitido ar para leito de rolhas}) \end{aligned}$$

Considerando que o leito se encontra a uma temperatura uniforme tem-se:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{as} \Delta t [C_{pa} T_s(t') + \omega_s(t') (C_{pv} T_s(t') + h_{vl})] - \dot{m}_{as} \Delta t [C_{pa} T_e + \omega_e (C_{pv} T_e + h_{vl})] \\ = h \left(\frac{T_e + T_s(t')}{2} - T(t) \right) A_t \quad (28) \end{aligned}$$

Onde:

- h - Coeficiente de transferência de calor do ar para as rolhas determinada a partir de uma equação do tipo $Nu = f(Re, Pr)$;
- A_t – Área de transferência de calor, ou seja, superfície total das rolhas.

O cálculo do coeficiente de transferência de calor do ar para as rolhas foi também determinado com o auxílio do *EES*. Para tal foi utilizada uma das suas subrotinas dedicadas a problemas de transferência de calor.

Escolheu-se como aproximação do fenómeno uma situação de escoamento de ar forçado em torno de um cilindro com as dimensões de uma rolha.

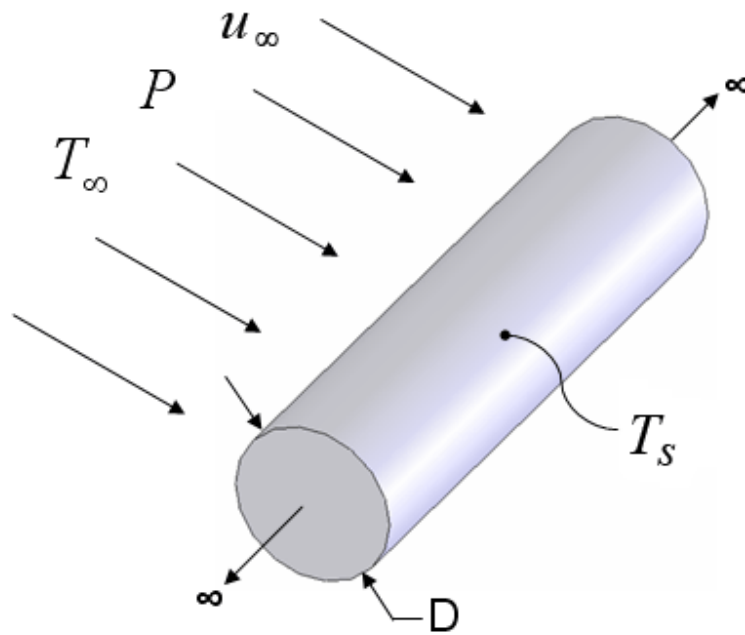


Figura.4.3.4.1-Esquema de convecção forçada em torno de um cilindro de comprimento finito.

Os dados de entrada desta subrotina são:

- T_{∞} - Temperatura do fluido (ar);
- T_s - Temperatura média da superfície da rolha ao longo do processo (considerou-se que a rolha estava toda à mesma temperatura);
- P - Pressão do fluido;
- D - Diâmetro da rolha;
- L - Comprimento da rolha.

4.3.6 Potência das resistências de aquecimento

Para elevar a temperatura do ar exterior até a temperatura pretendida para a secagem é necessário fornecer calor ao mesmo. Como tal, o modelo matemático deverá também, determinar a potência de aquecimento a fornecer ao ar em cada instante, de acordo a temperatura resultante da mistura de ar recirculado com o ar exterior, e será a partir desta potência que serão dimensionadas as resistências de aquecimento, considerando que o efeito de Joule nas resistências eléctricas tem um rendimento de 100%.

Sabendo que o aquecimento é 100% sensível, a potência de aquecimento é dada pela expressão:

$$\dot{Q}_{resistências}(t') = \dot{m}_{as}(h_e(t') - h_{mistura}(t')) \quad (29)$$

Sendo que $h_{mistura}$ se obtém considerando uma mistura adiabática de caudais:

$$\dot{m}_{as}h_{mistura} = (1 - \beta)\dot{m}_{as}h_{ext} + \beta\dot{m}_{as}h_{ar\ saída} \quad (30)$$

A h_e é uma propriedade do ar obtida a partir do conhecimento de T_e e sabendo que para um aquecimento 100% sensível, a humidade absoluta não varia, logo:

$$\omega_{mistura} = \omega_e \quad (31)$$

4.3.7 Validação do Modelo

Após a formulação matemática, é necessário proceder-se a validação do modelo. Nesta fase procurou-se traçar as curvas relativas às variáveis existentes, bem como perceber se os resultados produzidos pelo modelo vão de encontro à realidade, isto é, se os resultados se encontram de acordo com resultados experimentais de Magalhães (2004), bem como com o conhecimento teórico-prático existente sobre a secagem de rolhas.

Condições gerais consideradas

Relativamente à validação do modelo, impõe-se antes de mais uma enumeração das condições gerais consideradas na resolução do problema, nomeadamente:

- Temperatura do jacto de 70°C;
- Secagem de 250 rolhas;
- Processo adiabático;
- Ar exterior a 20°C, 40% humidade relativa, ou seja uma humidade absoluta de 0,0058 kg/kg_{ar seco};
- Razão entre o diâmetro de entrada do ar no reactor diâmetro da coluna igual a 0,2;
- Passo temporal de cálculo das variáveis em cada instante Δt igual a 20 segundos e N=300.

Apesar de na criação do modelo ter sido considerada a recirculação de ar, na validação do modelo considerou-se que não existia recirculação, pois os dados experimentais (Magalhães, 2004) foram obtidos sem recirculação de ar de saída do reactor.

Temperatura das rolhas

No Gráfico.4.3.7.1 é possível observar a forma como a temperatura das rolhas varia ao longo do tempo.

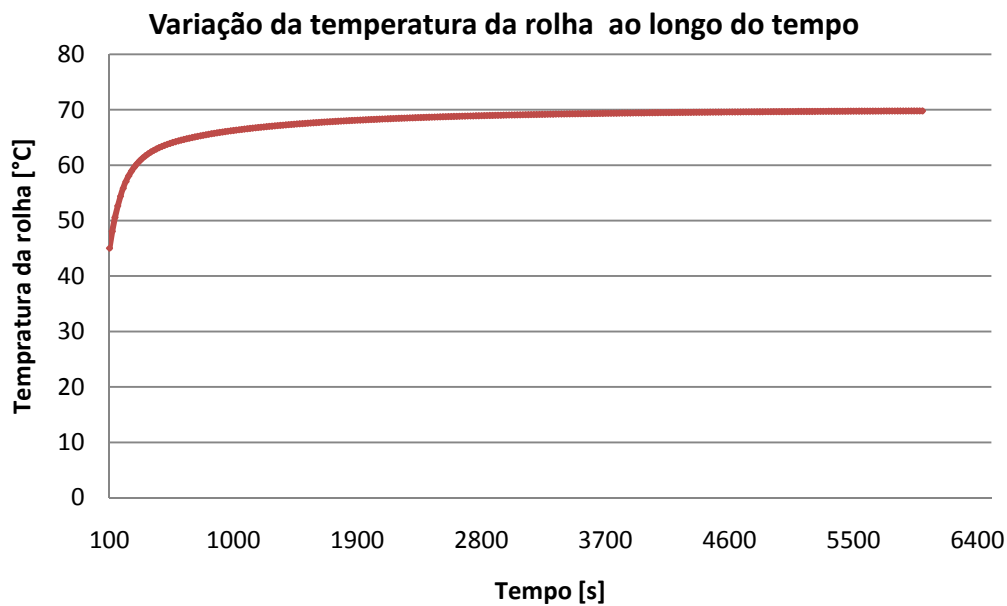


Gráfico.4.3.7.1-Variação da temperatura das rolhas ao longo do tempo

Teor de Humidade - Xi

No Gráfico.4.3.7.2 demonstra a variação do teor de humidade das rolhas ao longo do tempo, tendo-se obtido os respectivos valores de teor de humidade relativa com o recurso à expressão (21).

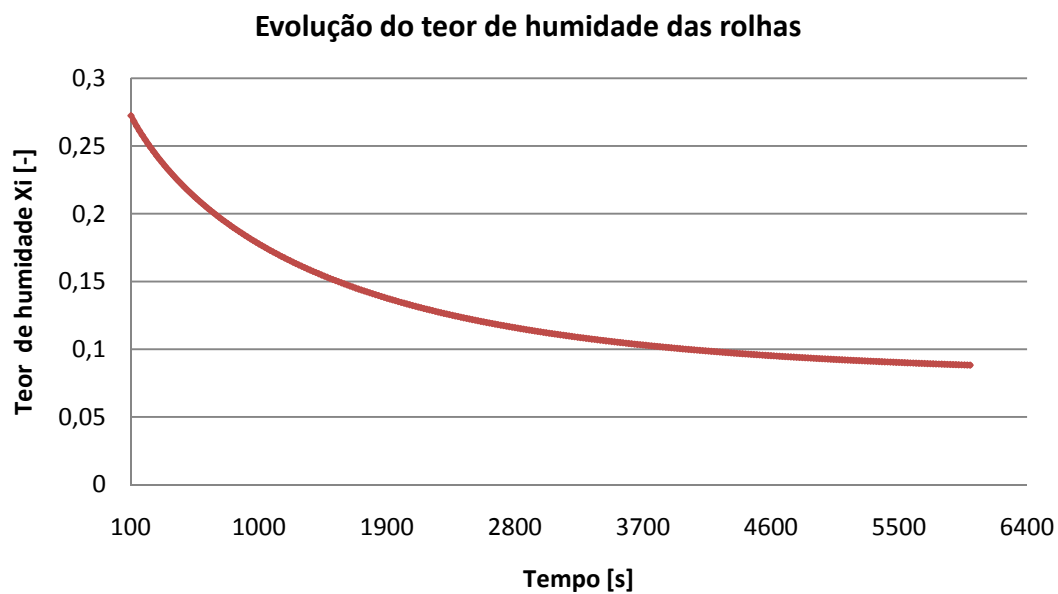


Gráfico.4.3.7.2-Variação do teor de humidade (Xi) das rolhas ao longo do tempo

Temperatura do ar à saída do reactor

O Gráfico.4.3.7.3 traduz a evolução da temperatura do ar de saída do reactor ao longo do tempo.

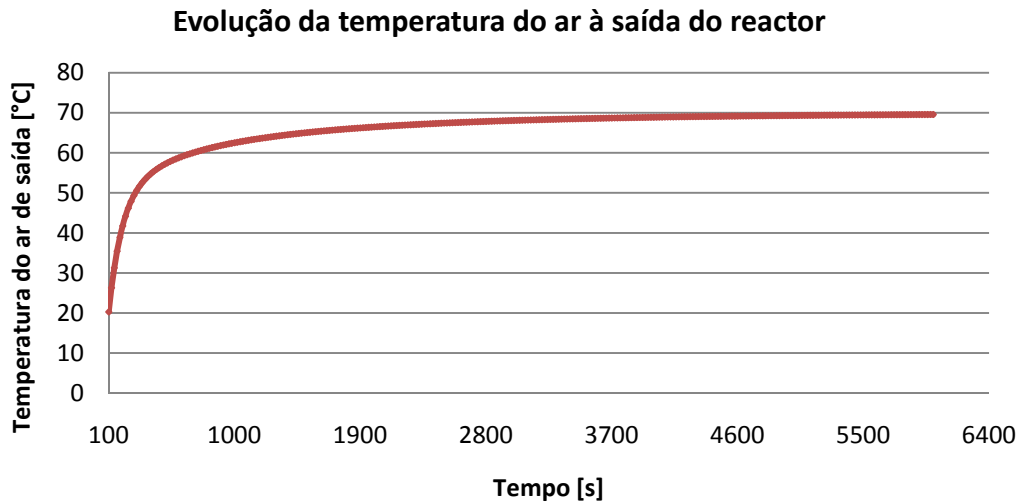


Gráfico.4.3.7.3-Evolução da temperatura do ar à saída do reactor.

Humidade absoluta do ar

Relativamente à humidade absoluta do ar à saída do reactor, procurou-se traçar a sua evolução. Como se verifica a humidade absoluta à saída do reactor tende assintoticamente para o valor correspondente à humidade absoluta ambiente.

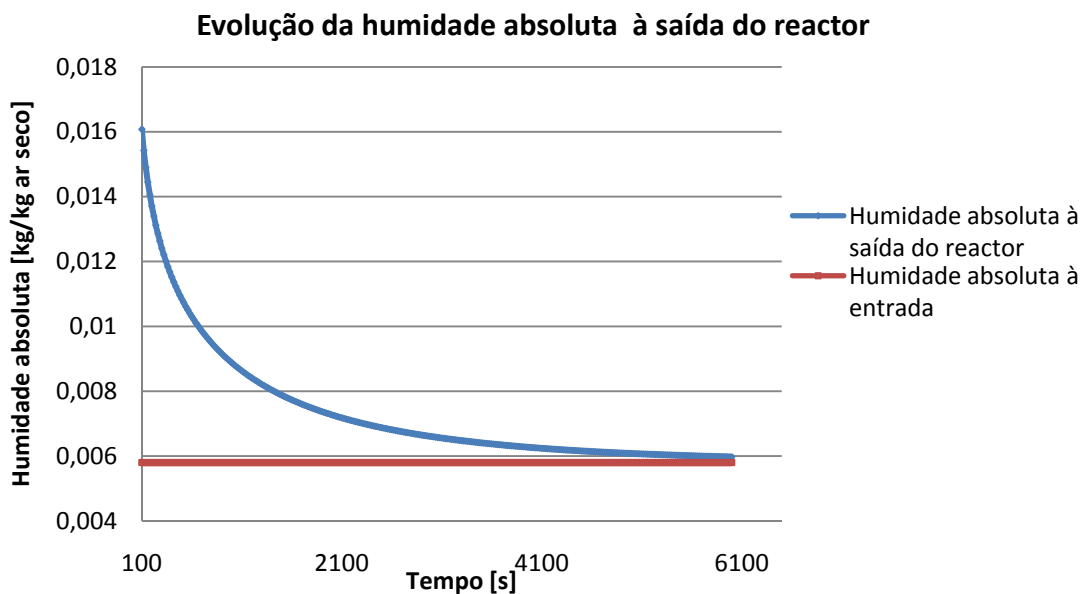


Gráfico.4.3.7.4-Evolução da humidade absoluta do ar à saída do reactor.

Potência de aquecimento

Para elevar a temperatura do ar dos 20°C ambiente para os 70°C necessários à secagem das rolhas é necessário fornecer-lhe calor. Tendo em atenção este facto, torna-se útil que o modelo determine também o calor fornecido em cada instante de tempo nesta situação de ausência de recirculação do ar de secagem. Porém neste caso, como não há recuperação do ar à saída do reactor e admitindo que as condições do ar exterior se mantêm constantes, a potência de aquecimento é constante. O Gráfico.4.3.7.5 traduz a evolução do calor de evaporação da água das rolhas comparativamente com a potência térmica fornecida ao ar (0,21 kW), de modo a obter-se uma temperatura de secagem de 70°C. Verifica-se com o decorrer do tempo, que há uma redução progressiva do calor de evaporação da água em termos comparativos com a potência fornecida. Esta situação deve-se ao facto de que com a evolução temporal a quantidade de água a remover das rolhas seja cada vez menor, justificando por isso a incorporação de recuperação do ar de saída do reactor num sistema com estas características.

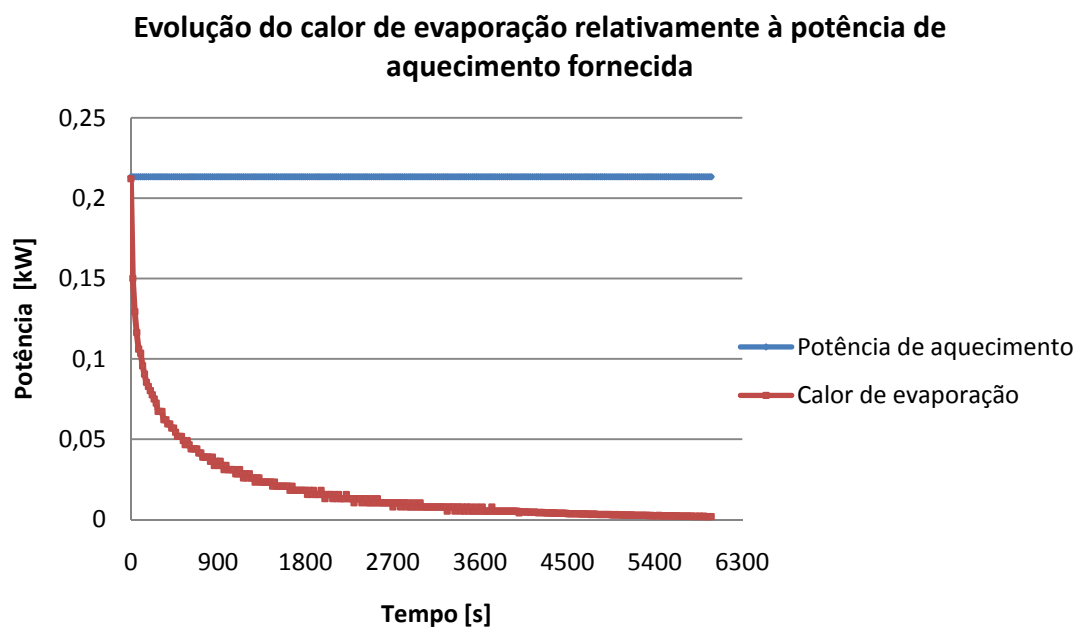


Gráfico.4.3.7.5-Evolução do calor de evaporação comparativamente com a potência de aquecimento fornecida ao ar.

Comentário geral

De uma forma geral verifica-se que os resultados obtidos na modelação matemática estão de acordo com o esperado.

Porém, nos gráficos traçados, optou-se apenas por considerar os valores a partir dos cem segundos devido a existir uma certa inconsistência dos resultados no período inicial do cálculo, resultante da própria aproximação da correlação (21) aos resultados experimentais, visível no Gráfico.4.3.3.1. Esta inconsistência poderá também ser explicada pela ausência de ponderação algumas dimensões reais. Isto é, no caso real o ar é aspirado por um ventilador, percorre a tubagem e é posteriormente aquecido de modo a atingir os 70°C necessários à secagem. Decorre daí um determinado período de tempo, que no caso do modelo matemático não é contabilizado. Existe por isso uma constante de tempo não considerada no modelo matemático. Contudo após esta incoerência inicial dos resultados, o modelo estabiliza e, efectivamente, converge para os resultados inicialmente esperados.

5. Dimensionamento do Secador

5.1 Introdução

Após o desenvolvimento do modelo matemático que descreve os fenómenos termodinâmicos da secagem de rolhas, bem como a sua validação baseada nos resultados laboratoriais (Magalhães, 2004), segue-se a passagem da aproximação inicial à escala laboratorial para o dimensionamento propriamente dito do secador de leito em jorro com uma capacidade produtiva de 5000 rolhas/hora.

5.2 Esquema do sistema de secagem

Neste ponto pretende-se demonstrar o esquema do sistema de secagem, bem como o seu princípio de funcionamento. O esquema que a seguir se apresenta, é apenas conceptual, contudo permite uma melhor compreensão da solução encontrada.

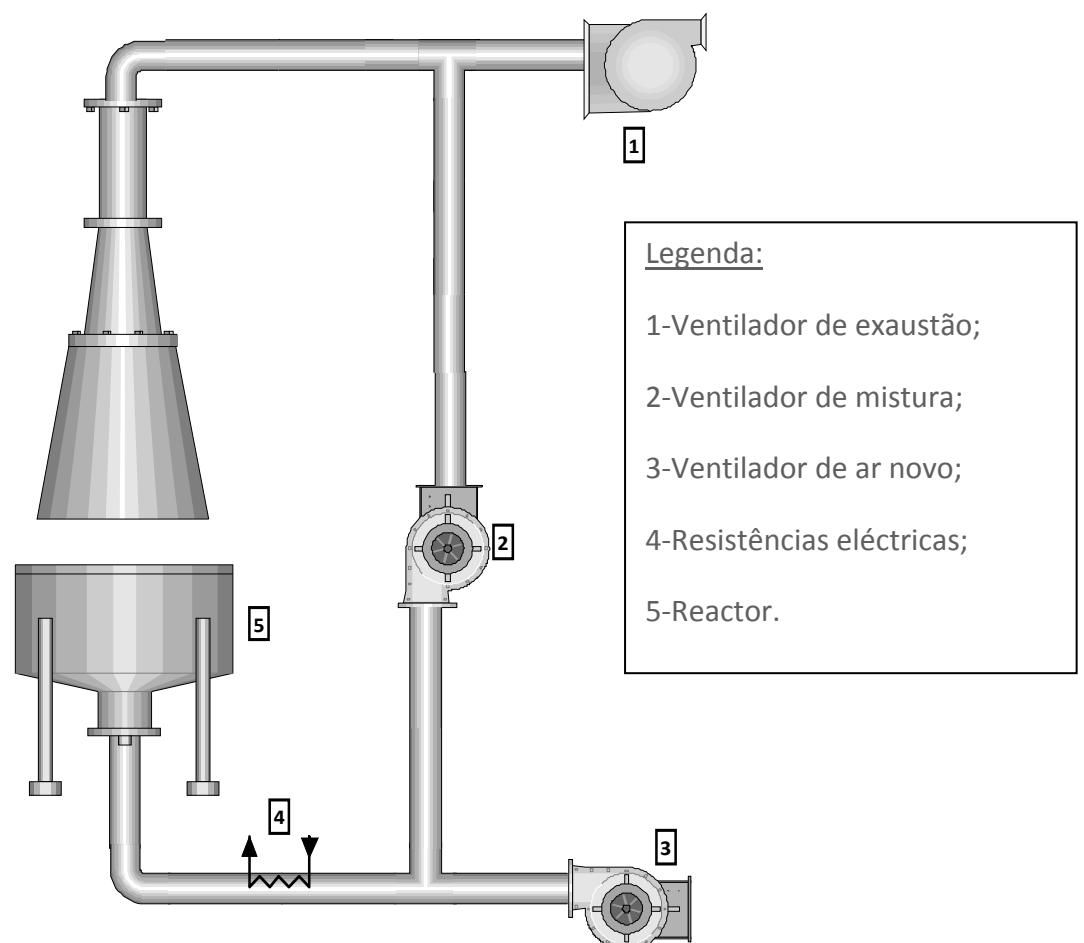


Figura.5.2.1-Esquema do sistema de secagem.

A existência do ventilador de exaustão poderá ser discutível, pois uma alteração do posicionamento da saída de ar para o exterior ou a colocação de válvulas de borboleta

de modo a provocar uma divisão do caudal de extracção, poderá ser suficiente para garantir as percentagens de caudal recirculado e de caudal expelido para o exterior.

5.3 Dimensionamento do Reactor

A determinação das dimensões geométricas do reactor é um processo iterativo, condicionado por diversos parâmetros, nomeadamente a razão entre o diâmetro de entrada do jacto e o diâmetro da coluna, a altura crítica do leito e caudal de ar do jacto.

Da observação do Gráfico.4.3.3.1 e do Gráfico.4.3.5.2 resulta a constatação de que o teor de humidade das rolhas apenas se situa dentro dos limites pretendidos, nomeadamente entre os 10% a 4% ao fim de 5400 s, ou seja, o ciclo de secagem das rolhas é aproximadamente uma hora e meia, concluindo-se desta forma que a carga a introduzir no reactor, de modo a obter-se uma capacidade produtiva de 5000 rolhas/hora será de 7500 rolhas. O dimensionamento do secador deverá contemplar necessariamente este facto.

5.3.1 Diâmetro da coluna.

Para a definição do diâmetro da coluna recorreu-se também ao *software EES* no qual, e a partir da formulação matemática a seguir exposta, foi criada uma tabela paramétrica que permite a obtenção de vários parâmetros, nomeadamente a altura crítica do leito, altura do leito e diâmetro do jacto, definindo-se apenas os limites dimensionais do diâmetro da coluna.

O efeito de parede é um dos principais fenómenos que influencia as perdas de carga em escoamentos através de empilhamentos de partículas. Este efeito é característico de leitos rasos (Moreira, 1998) e pode ser decomposto em duas componentes, o efeito de parede lateral e efeito de profundidade.

Zou e You (1996) desenvolveram uma expressão para a determinação da altura do leito a partir da qual se pode desprezar o efeito de profundidade,

$$\frac{L_{crit}}{D_c} = 90,29 \left(\frac{d_p}{D_c} \right)^{1,41} \quad (32)$$

Logo, considerando a expressão anterior e sabendo que:

$$V_{rolha} = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) L \quad (33)$$

e

$$V_{total} = 0,5(N \times V_{rolha}) \quad (34)$$

Onde:

- V_{rolha} - Volume de uma rolha;
- V_{total} - Volume total da carga;
- N - Número de rolhas;
- 0,5- Porosidade do leito;
- D_{jacto} - Diâmetro de entrada do jacto.

pode obter-se as dimensões do reactor através de

$$V_{total} = \left(\frac{\pi D_{coluna}^2}{4} \right) H_{leito} \quad (35)$$

e,

$$\frac{D_{jacto}}{D_{coluna}} = 0,24 \quad (36)$$

Consideraram-se duas configurações diferentes para o reactor. Na primeira, as dimensões foram determinadas considerando-se que o reactor teria que suportar 7500 rolhas, na segunda colocou-se a hipótese de dividir a carga em duas partes, o que obrigaria a existência, não de um, mas de dois reactores.

Configuração 1

L_{crit}	H_{leito}	D_{coluna}	D_{jacto}
0,5664	1,199	0,4	0,096
0,5397	0,9473	0,45	0,108
0,5169	0,7673	0,5	0,12
0,4971	0,6342	0,55	0,132
0,4797	0,5329	0,6	0,144
0,4642	0,454	0,65	0,156
0,4503	0,3915	0,7	0,168
0,4377	0,341	0,75	0,18
0,4263	0,2997	0,8	0,192
0,4158	0,2655	0,85	0,204
0,4062	0,2368	0,9	0,216

Tabela.5.3.1.1-Parâmetros dimensionais do reactor considerando a totalidade da carga, 7500 rolhas, para diâmetros da coluna compreendidos entre os 0,4 m e 0,9 m.

Configuração 2

L_{crit}	H_{leito}	D_{coluna}	D_{jacto}
0,5664	0,5995	0,4	0,096
0,5397	0,4737	0,45	0,108
0,5169	0,3837	0,5	0,12
0,4971	0,3171	0,55	0,132
0,4797	0,2664	0,6	0,144
0,4642	0,227	0,65	0,156
0,4503	0,1958	0,7	0,168
0,4377	0,1705	0,75	0,18
0,4263	0,1499	0,8	0,192
0,4158	0,1328	0,85	0,204
0,4062	0,1184	0,9	0,216

Tabela.5.3.1.2-Parâmetros dimensionais do reactor considerando a metade da carga, 3750 rolhas, para diâmetros da coluna compreendidos entre os 0,4 m e 0,9 m.

Perante um problema de dimensionamento, existem sempre limitações e concessões a fazer, sendo que a solução encontrada será uma solução de compromisso entre os objectivos a atingir e as restrições existentes.

Se por um lado a divisão da carga, do ponto de vista produtivo, poderia ser interessante, pois o funcionamento do secador seria mais facilmente ajustado às necessidades produtivas, por outro lado conduziria certamente, a um custo, quer de investimento, quer de exploração maior, resultando num investimento global superior e um período de amortização superior.

Como tal, optou-se pela não divisão da carga, tendo-se escolhido como dimensões do reactor, as evidenciadas pela tabela seguinte e que se realçaram na Tabela.5.3.1.1.

L_{crit}	H_{leito}	D_{coluna}	D_{jacto}	$H_{reactor}$
0,4642	0,454	0,65	0,156	0,6

Tabela.5.3.1.3-Parâmetros dimensionais do reactor considerando 7500 rolhas.

5.4 Perdas térmicas

Na modelação matemática, inicialmente considerou-se o processo adiabático, contudo o modelo deverá aproximar-se o máximo possível da realidade que pretende descrever, e como tal deverá considerar-se a existência dessas eventuais perdas no reactor.

No cálculo da potência de perdas considerou-se que o do reactor possui uma parede composta por chapa de aço, isolamento e chapa de alumínio.

Nestas condições a potência de perdas é dada pela seguinte expressão:

$$\dot{Q}_{perdas} = \frac{(T_{média\ do\ ar} - T_{ext})}{\frac{1}{\alpha_{int}\pi D_{coluna}L_{reactor}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{coluna}}{r_{aço}}\right)}{2\pi L_{reactor}\lambda_{aço}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{aço}}{r_{isolamento}}\right)}{2\pi L_{reactor}\lambda_{isolamento}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{isolamento}}{r_{alumínio}}\right)}{2\pi L_{reactor}\lambda_{alumínio}} + \frac{1}{\alpha_{ext}\pi D_{alumínio}L_{reactor}}} \quad (37)$$

Onde:

- $T_{média\ do\ ar}$ - Temperatura média do ar de secagem ao longo do processo;
- T_{ext} - Temperatura ambiente exterior;
- α_{int} - Coeficiente de convecção do ar no interior do reactor;
- α_{ext} - Coeficiente de convecção do ar no exterior (ar calmo);
- $\lambda_{aço}$ - Condutibilidade térmica do aço;
- $\lambda_{isolamento}$ - Condutibilidade térmica da lã mineral;
- $\lambda_{alumínio}$ - Condutibilidade térmica do alumínio;
- $L_{reactor}$ - Altura do reactor;
- r_{coluna} - Raio interno do reactor;
- $r_{aço}$ - Raio externo da chapa de aço;
- $r_{isolamento}$ - Raio externo do isolamento;
- $r_{alumínio}$ - Raio externo da chapa de alumínio;

5.3.1 Determinação dos coeficientes de convecção:

A determinação dos coeficientes de convecção α_{int} e α_{ext} seguiu os pressupostos indicados nas páginas seguintes:

Coeficiente de convecção α_{int}

Foi utilizada uma subrotina do *software EES* dedicada a problemas de transferência de calor, sendo que no caso concreto, foi considerado o escoamento forçado de ar através de um cilindro de dimensões iguais às do reactor.

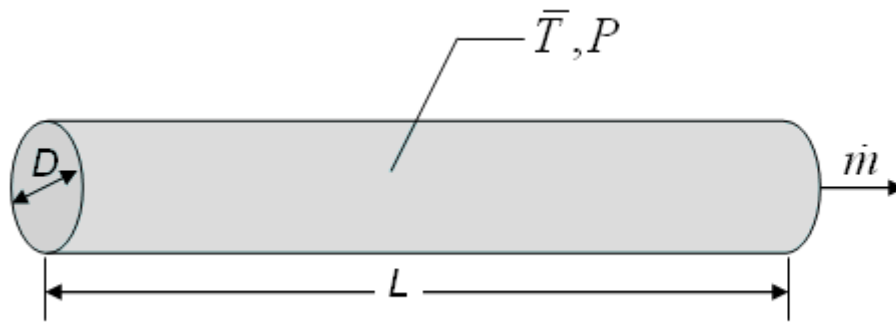


Figura.5.4.1.1-Convecção forçada no interior de um cilindro com as dimensões do reator.

Os dados de entrada desta subrotina são:

- $T_{médida\ do\ ar}$ - Temperatura média do ar ao longo do processo;
- P - Pressão do fluido;
- $D_{reactor}$ - Diâmetro interno do reator;
- $L_{reactor}$ - Altura do reator;
- \dot{m}_{as} - Caudal mássico de ar seco que entra no reator;
- Rel_{rough} - Rugosidade relativa da superfície interna do reator (0,05).

Coeficiente de convecção α_{ext}

Uma vez mais, as subrotinas internas do *software EES* evidenciaram grande utilidade. A subrotina utilizada na determinação do coeficiente de convecção exterior assenta no pressuposto de se estar perante um fenómeno de convecção natural em torno de um cilindro com as dimensões do reator.

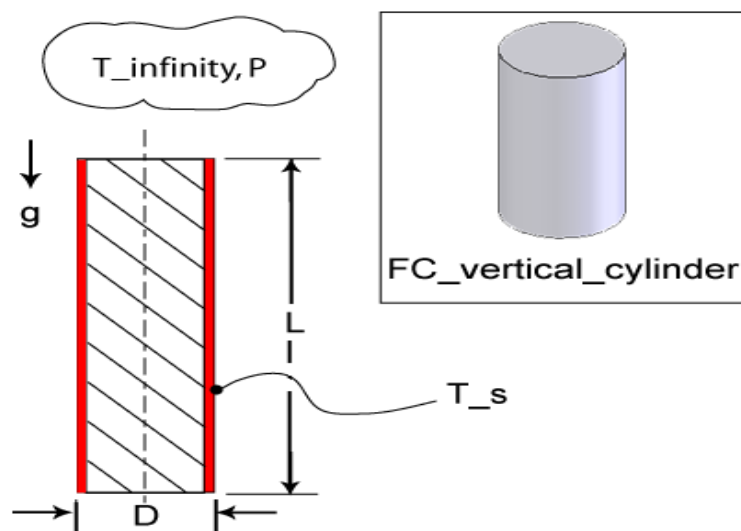


Figura.5.4.1.2-Convecção natural em torno de um cilindro com as dimensões do reator.

Os dados de entrada desta subrotina são:

- T_{parede} - Temperatura da superfície;
- T_{ext} - Temperatura ambiente exterior;
- P_{amb} - Pressão ambiente;
- $D_{alumínio}$ - Diâmetro externo da chapa de alumínio;
- $L_{reactor}$ - Altura do reactor;

A temperatura da superfície exterior do reactor foi determinada através da expressão (36) igualando a mesma à expressão seguinte, pois a potência térmica é a mesma:

$$\dot{Q}_{perdas} = \frac{(T_{parede} - T_{ext})}{\frac{1}{\alpha_{ext}\pi D_{alumínio} L_{reactor}}} \quad (38)$$

5.5 Resultados da modelação matemática

De seguida expõem-se os resultados dos vários parâmetros determinados pela modelação matemática.

Na obtenção destes resultados foram consideradas as seguintes condições iniciais e constantes:

Condições iniciais:

Designação	Valor	Unidades
T_{ext}	20	°C
ω_{ext}	0,0058	kg/kg ar seco
Φ_{ext}	0,40	-
T_e	70	°C
Coef. Recirculação (β)	0,5	-
Δt	20	s
N	300	-
ω_s para $t_i=0$	ω_{ext}	kg/kg ar seco
T_{rolha} para $t_i=0$	20	°C
$\omega_{mistura}$ para $t_i=0$	0	kg/kg ar seco
U	1,78	m/s
X_i para $t_i=0$	30	%
X_e	8	%
Nº rolhas	7500	-

Tabela.5.5.1-Condições consideradas.

Propriedades

Designação	Valor	Unidades
C_{pa}	1,005	kJ/kgK
C_r	1,884	kJ/kgK
C_{wl}	4,1868	kJ/kgK
T_e	70	°C
$k_{\text{aço inoxidável}}$	15,69	W/mK
$K_{\text{lã mineral}}$	0,038	W/mK
$k_{\text{alumínio}}$	236,9	W/mK
P	101	kPa

Tabela.5.5.2-Propriedades consideradas.

Temperatura da rolha

O Gráfico.5.5.1 evidencia a evolução da temperatura das rolhas com o decorrer do tempo, esta temperatura evolui assintoticamente, tendendo para a temperatura do ar de secagem, nomeadamente 70°C.

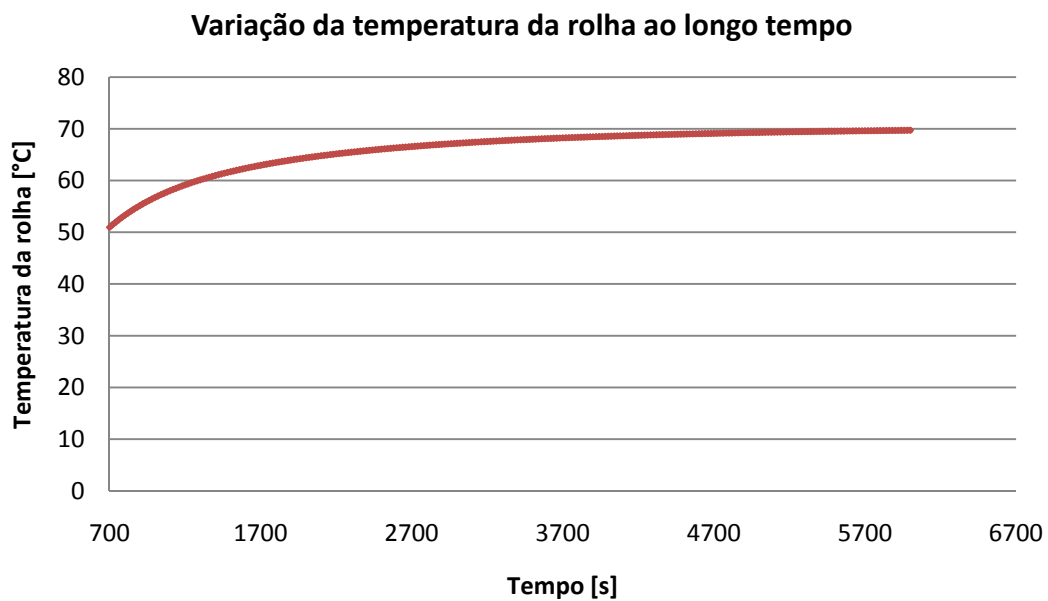


Gráfico.5.5.1-Evolução da temperatura das rolhas.

Temperatura do ar à saída do reactor

Como seria à partida expectável, à medida que as rolhas ficam secas, a temperatura do ar à saída do reactor aumenta.

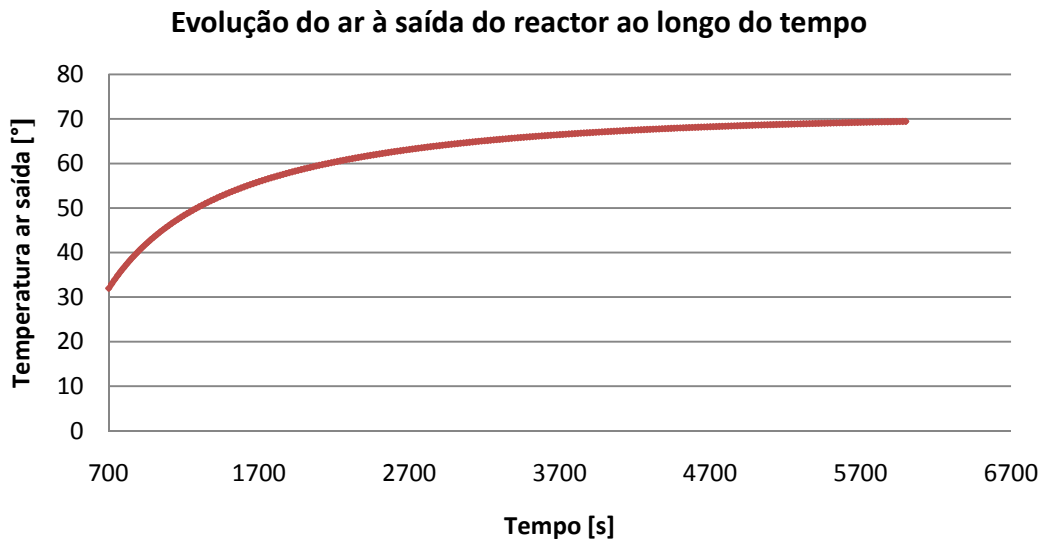


Gráfico.5.5.2-Evolução da temperatura do ar à saída do reactor.

Teor de Humidade das rolhas

O Gráfico.5.5.3 traduz a evolução do teor de humidade das rolhas ao longo do tempo, de acordo com a expressão (21) utilizada na modelação matemática.

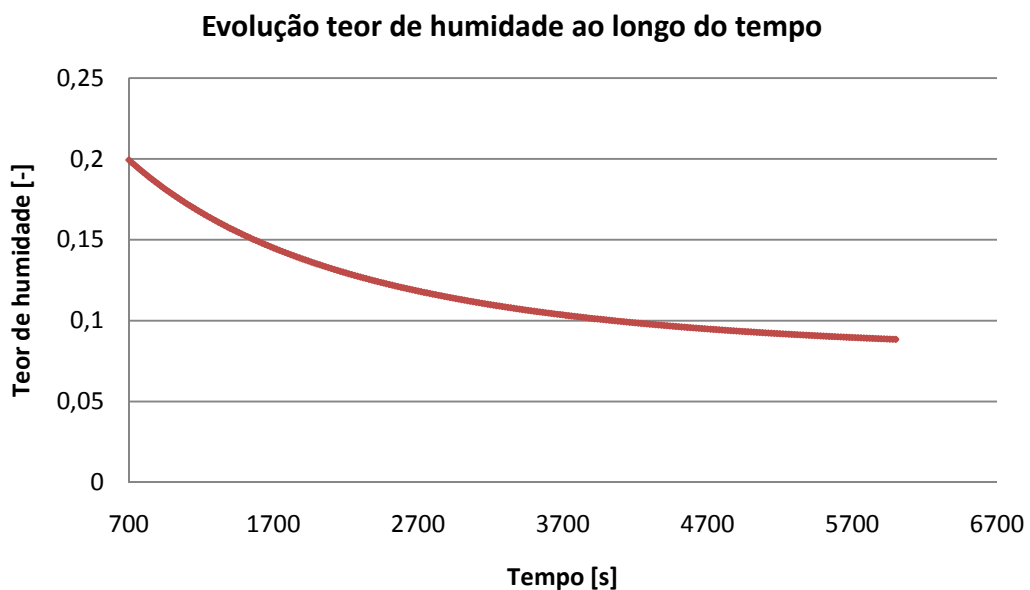


Gráfico.5.5.3-Evolução do teor de humidade das rolhas.

Humidade absoluta à saída do reactor

A humidade absoluta do ar à saída do reactor diminui com o tempo, pois à medida que as rolhas vão secando, a quantidade de água que passa das mesmas para o ar secagem diminui.

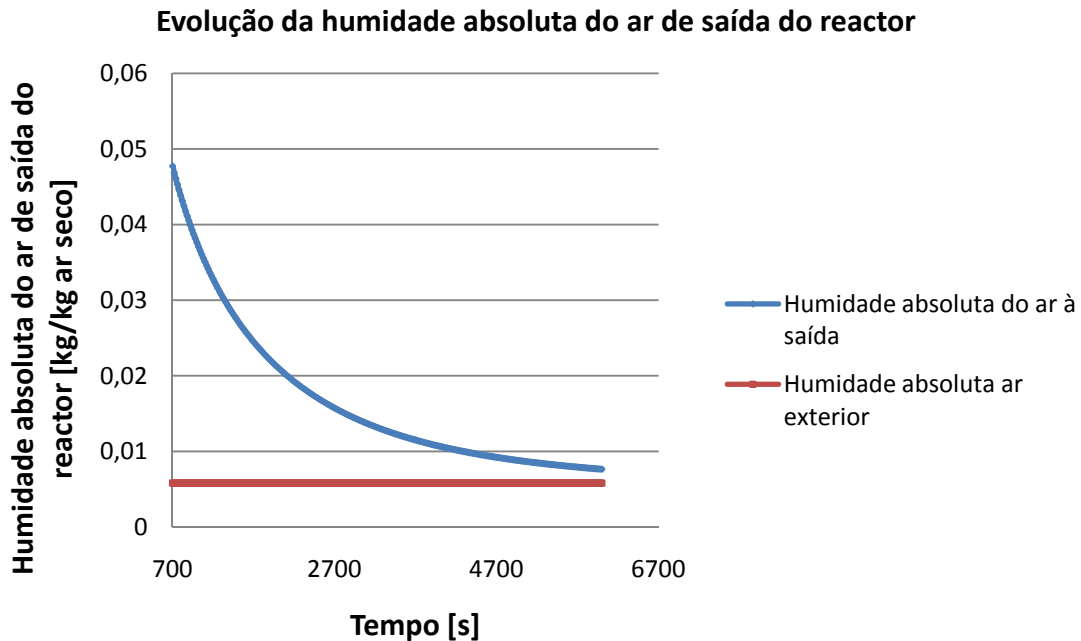


Gráfico.5.5.4-Evolução da humidade absoluta do ar à saída do reactor.

Humidade absoluta da mistura de ar recirculado com o ar exterior

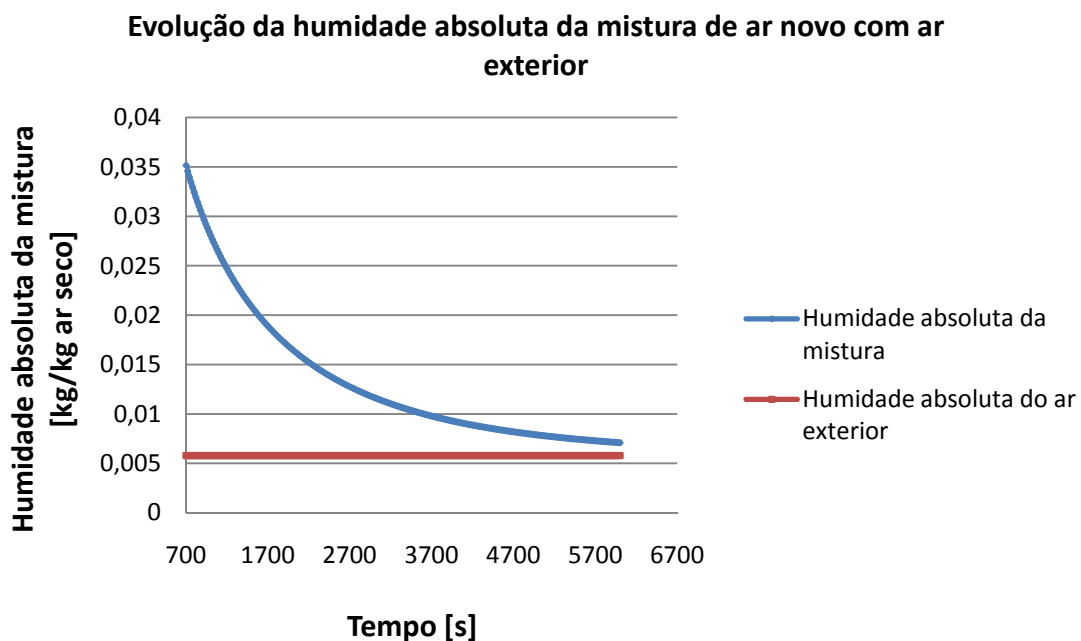


Gráfico.5.5.5-Evolução da humidade absoluta da mistura de ar recirculado e ar novo.

Humidade relativa da mistura de ar recirculado e ar exterior

Devido à elevada percentagem de ar recirculado a humidade relativa tende para os 10%.

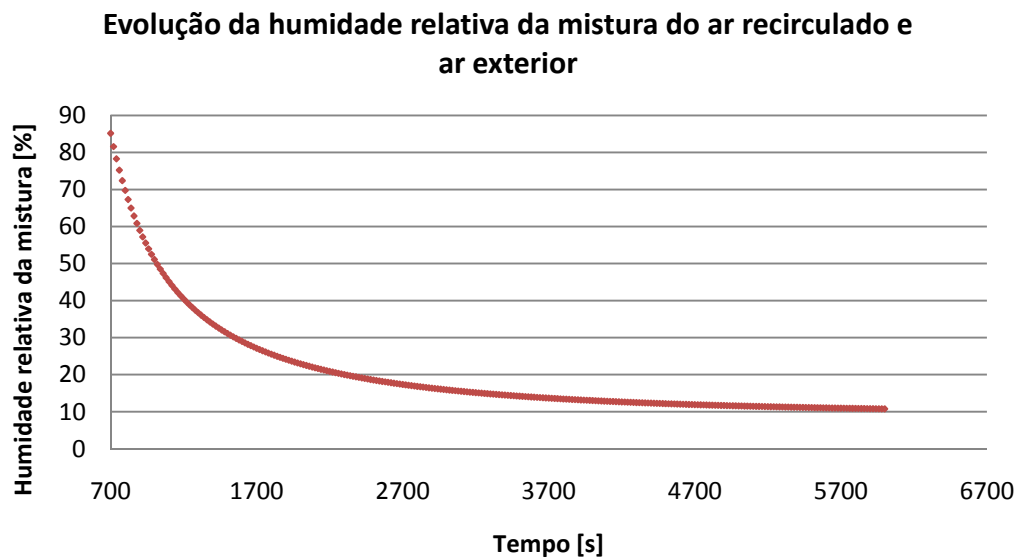


Gráfico.5.5.6-Evolução da humidade relativa da mistura de ar recirculado e ar novo.

Temperatura da mistura de ar novo e ar recirculado

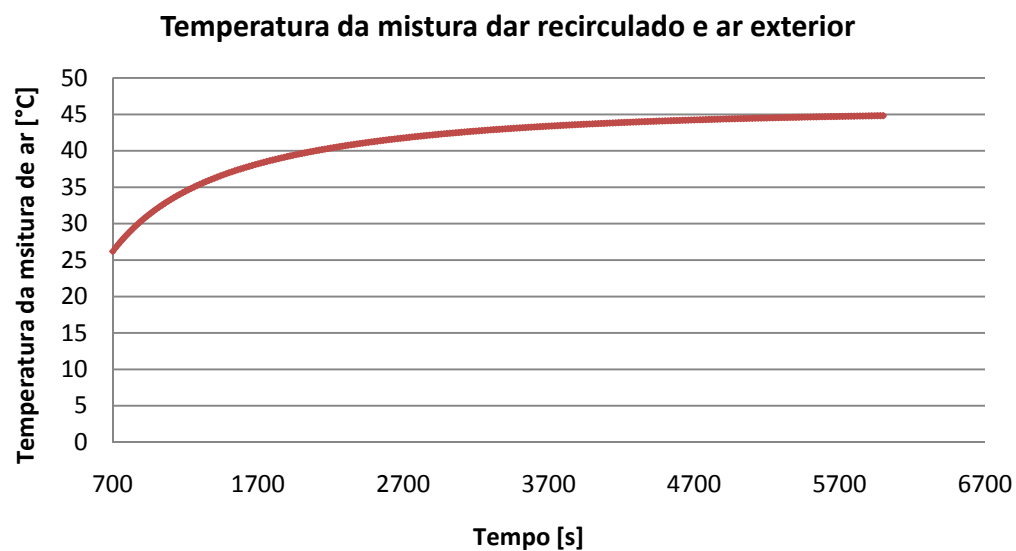


Gráfico.5.5.7-Evolução da temperatura da mistura de ar recirculado e ar novo.

Potência de aquecimento da resistência eléctrica

A potência de aquecimento diminui com o tempo conforme o Gráfico.5.5.8 evidencia.

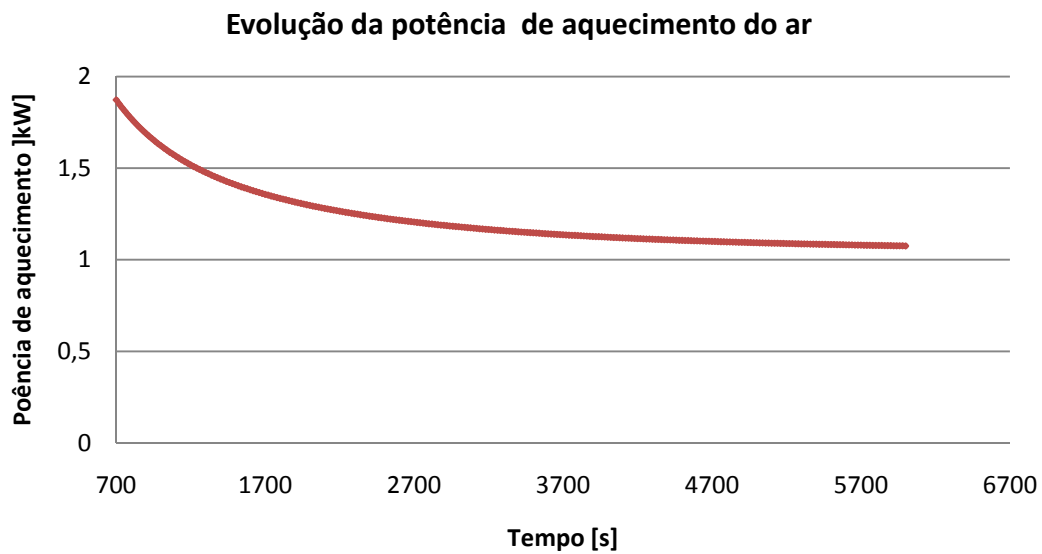


Gráfico.5.5.8-Evolução da potência de fornecida à mistura de ar recirculado e ar novo.

Comentário Geral

As curvas propostas demonstram o desempenho do secador para as condições base do projecto. Nas páginas seguintes pode observar-se o comportamento do secador em função de variações das condições base do projecto.

5.6 Avaliação do desempenho do secador para diferentes condições operacionais

5.6.1 Condições exteriores

Os sistemas que utilizam o ar ambiente como ferramenta para atingir um determinado objectivo são optimizados e projectados tendo em atenção as condições exteriores, nomeadamente de temperatura e humidade relativa do ar ambiente. Naturalmente que, por exemplo, as condições em que se encontram o ar ambiente no Inverno, são totalmente diferentes de uma situação de Verão. Como tal é importante a previsão do desempenho do secador para condições de ar ambiente diferentes das inicialmente propostas, de forma a estabelecer os limites de utilização.

Seguidamente, apresentam-se os resultados da previsão para diversas condições de operação.

5.6.2 Percentagem de caudal de ar recirculado

A percentagem de ar recirculado é um parâmetro de grande importância, pois quanto maior for o aproveitamento do ar de saída do reactor, menor será a potência de aquecimento fornecida ao ar resultante da mistura de caudal recirculado e ar novo. Portanto serão testadas quais as limitações de aproveitamento do ar de saída do reactor.

5.6.3 Temperatura de secagem

O variável mais importante na secagem de rolhas em leito em jorro é a temperatura da secagem. A exploração desta variável permite o estabelecimento do binómio *temperatura de secagem/capacidade produtiva*.

Um outro aspecto prático importante tem que ver com a necessidade de não se usarem temperaturas de secagem demasiado elevadas (a boa prática recomenda não se ultrapassar os 70°C) de forma a não se danificar irremediavelmente a cortiça. No entanto, esta questão vai colidir com o interesse prático em se encurtar o mais possível o tempo de secagem. A avaliação do desempenho do secador para diversas condições de operação é por isso relevante para se tomarem decisões operacionais.

5.6.4 Resultados

De seguida apresenta-se uma tabela com as hipóteses consideradas para cada uma das situações consideradas:

Condição operacional	Designação	Valor	Unidades
1	T_e	70	°C
	Φ_{ext}	0,80	-
	T_{ext}	8	°C
	% Ar recirculado	20	-
	T_e	70	°C
	Φ_{ext}	0,80	-
	T_{ext}	8	°C
	% Ar recirculado	50	-
	T_e	70	°C
	Φ_{ext}	0,80	-
	T_{ext}	8	°C
	% Ar recirculado	70	-
2	T_e	70	°C
	Φ_{ext}	0,75	-
	T_{ext}	27	°C
	% Ar recirculado	65	-
	T_e	70	°C
	Φ_{ext}	0,75	-
	T_{ext}	27	°C
	% Ar recirculado	70	-
	T_e	70	°C
	Φ_{ext}	0,75	-
	T_{ext}	27	°C
	% Ar recirculado	75	-
3	T_e	65	°C
	Φ_{ext}	0,4	-
	T_{ext}	20	°C
	% Ar recirculado	70	-
	T_e	68	°C
	Φ_{ext}	0,4	-
	T_{ext}	20	°C
	% Ar recirculado	70	-
	T_e	70	°C
	Φ_{ext}	0,4	-
	T_{ext}	20	°C
	% Ar recirculado	70	-

Tabela.5.6.4.1-Condições consideradas nas diversas situações.

Condição operacional 1

A primeira extrapolação efectuada tem como objectivo verificar a influência das condições exteriores (**humidade relativa de 80% e temperatura exterior de 8°C**) e perceber a influência da percentagem da caudal recirculado nas diversas variáveis a determinar.

Temperatura da mistura de ar recirculado e ar às condições ambiente

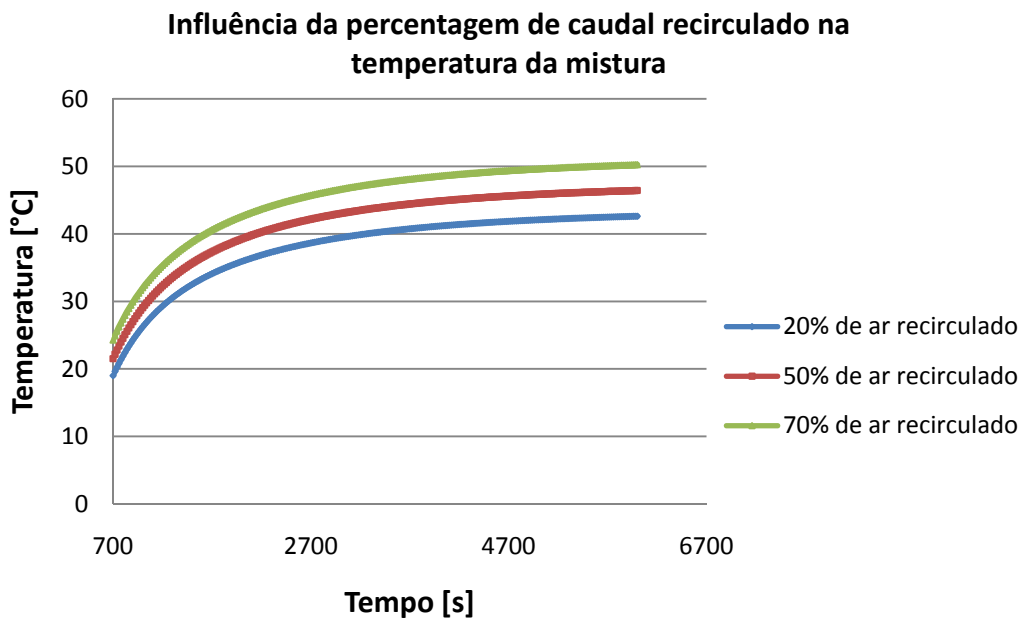


Gráfico.5.6.4.1-Evolução da temperatura da mistura de ar recirculado com ar exterior função da percentagem de caudal reaproveitado.

Como seria expectável, a temperatura da mistura de ar recirculado com ar exterior é tanto maior quanto maior for a percentagem de caudal recirculado.

Potência de aquecimento fornecida

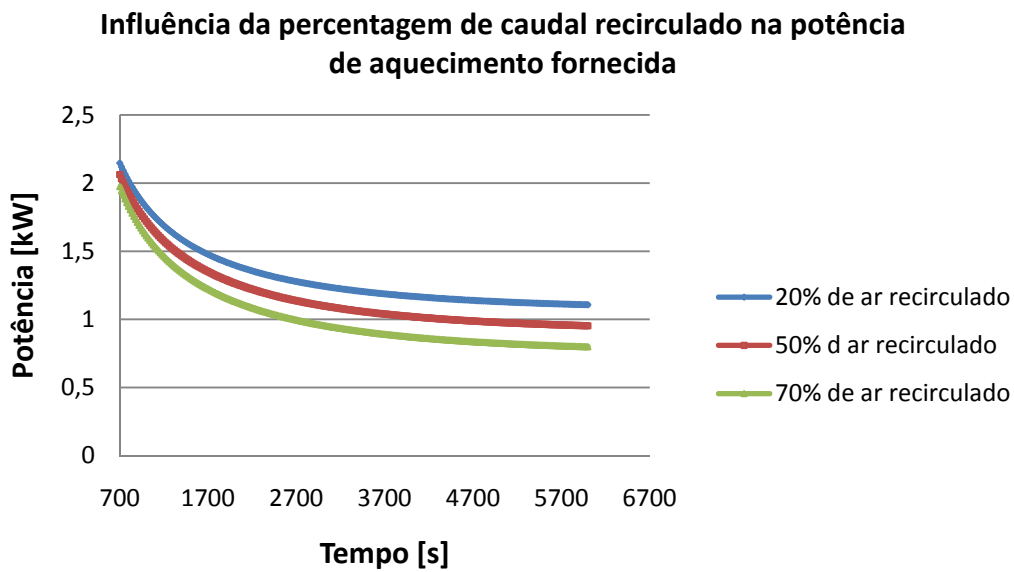


Gráfico.5.6.4.2-Evolução da potência de aquecimento fornecida ao ar após mistura função da percentagem de ar recirculado.

A potência de aquecimento fornecida ao ar após mistura, diminui com o aumento da percentagem de recuperação de ar, pois uma maior recuperação de ar promove um aumento da temperatura da mistura (ver Gráfico.5.5.4.1).

Humidade absoluta do ar à saída do reactor

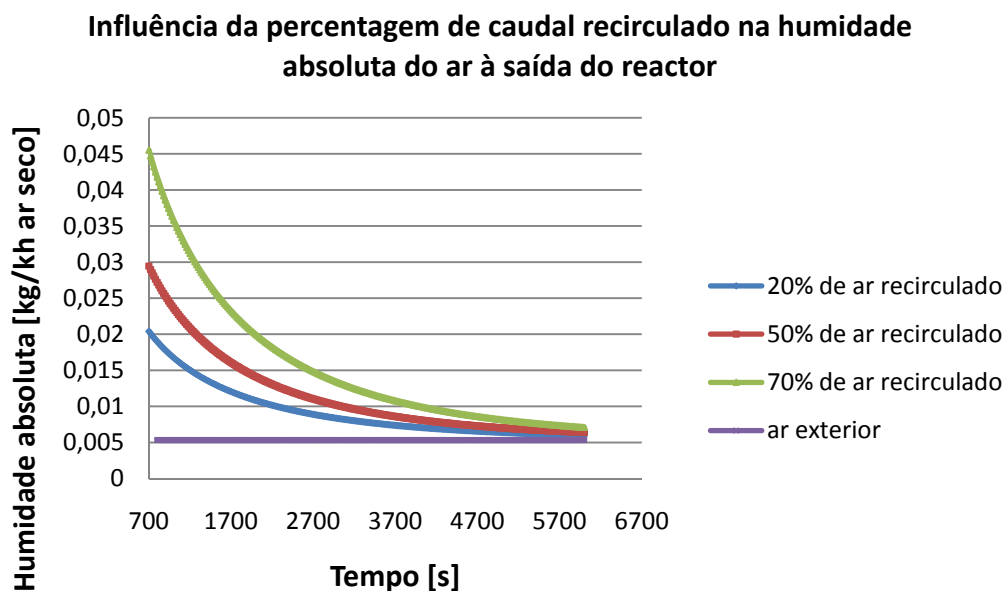


Gráfico.5.6.4.3-Evolução da humidade absoluta à saída do reactor função da percentagem de ar recirculado.

Humidade relativa da mistura de ar recirculado e ar às condições ambiente

Evolução da humidade relativa da mistura de ar recirculado e ar às condições exteriores

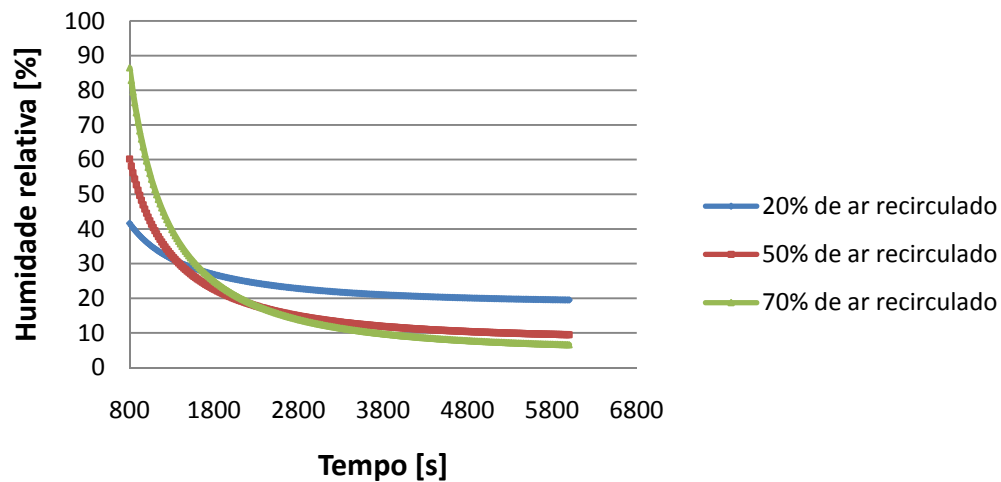


Gráfico.5.6.4.4-Evolução da humidade relativa da mistura de ar recirculado com ar exterior função da percentagem de caudal recirculado.

Dado que para estas condições a humidade relativa do ar exterior é bastante alta uma diminuição da percentagem de caudal de ar recirculado promove um aumento da humidade relativa do ar quando ocorre a mistura do ar exterior com o ar recirculado sendo por isso que a curva correspondente aos 20% de caudal recirculado intersecta as restantes, visto que a mistura fica a uma temperatura muito baixa.

Condição Operacional 2

A segunda extrapolação efectuada tem como objectivo verificar a influência das condições exteriores para uma situação de Verão muito húmido (**humidade relativa de 75% e temperatura exterior de 27°C**) e perceber a influência da percentagem da caudal recirculado nas diversas variáveis a determinar.

Temperatura da mistura de ar recirculado e ar às condições ambiente

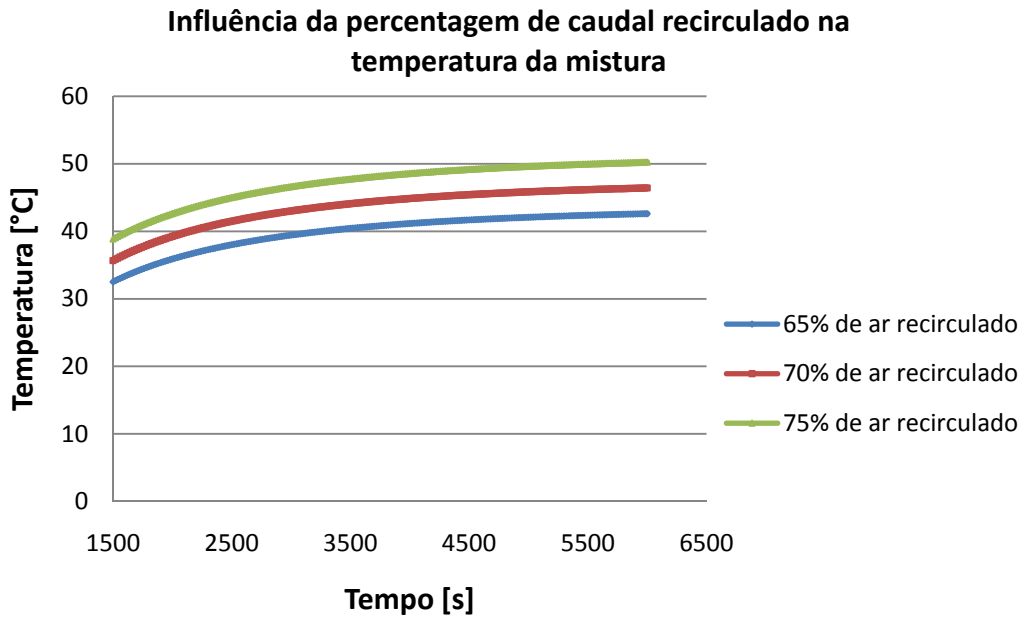


Gráfico.5.6.4.5-Evolução da temperatura da mistura de ar recirculado com ar exterior função da percentagem de caudal reaproveitado em situação de Verão húmido.

Potência de aquecimento fornecida

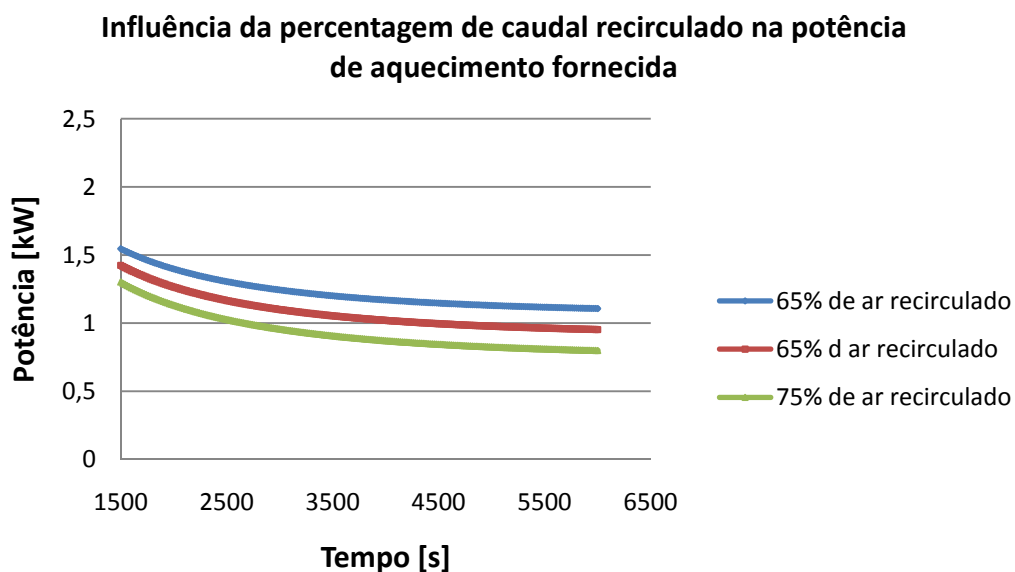


Gráfico.5.6.4.6-Evolução da potência de aquecimento fornecida ao ar após mistura função da percentagem de ar recirculado em situação de Verão húmido.

Dada a elevada temperatura ambiente, naturalmente que a potência de aquecimento fornecida estabiliza a valores mais baixos do que no caso de uma situação de Inverno (ver Gráfico.5.5.4.2)

Humidade absoluta do ar à saída do reactor

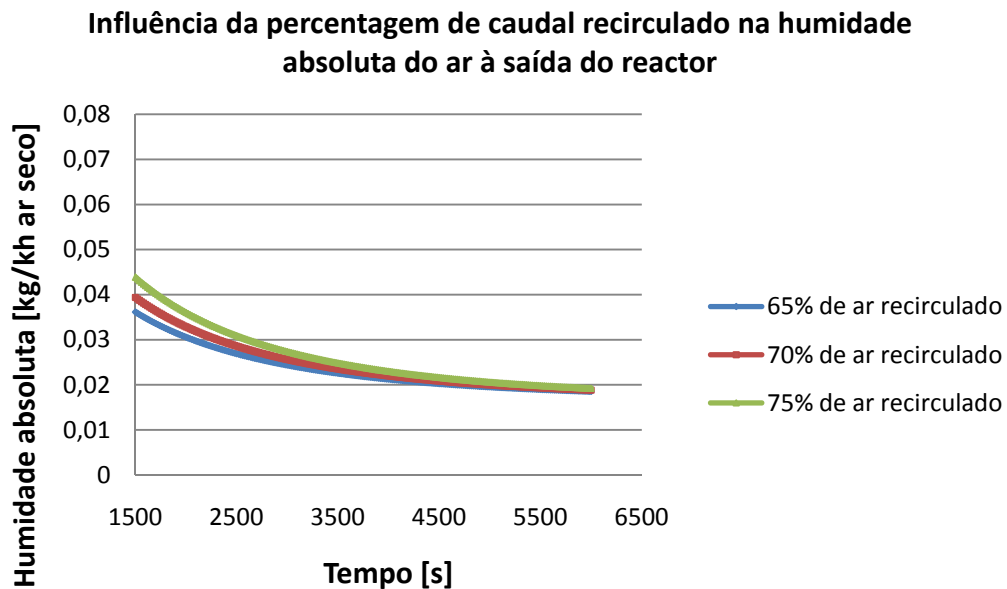


Gráfico.5.6.4.7-Evolução da humidade absoluta à saída do reactor função da percentagem de ar recirculado em situação de Verão húmido.

Humidade relativa a mistura de ar recirculado e ar às condições ambiente

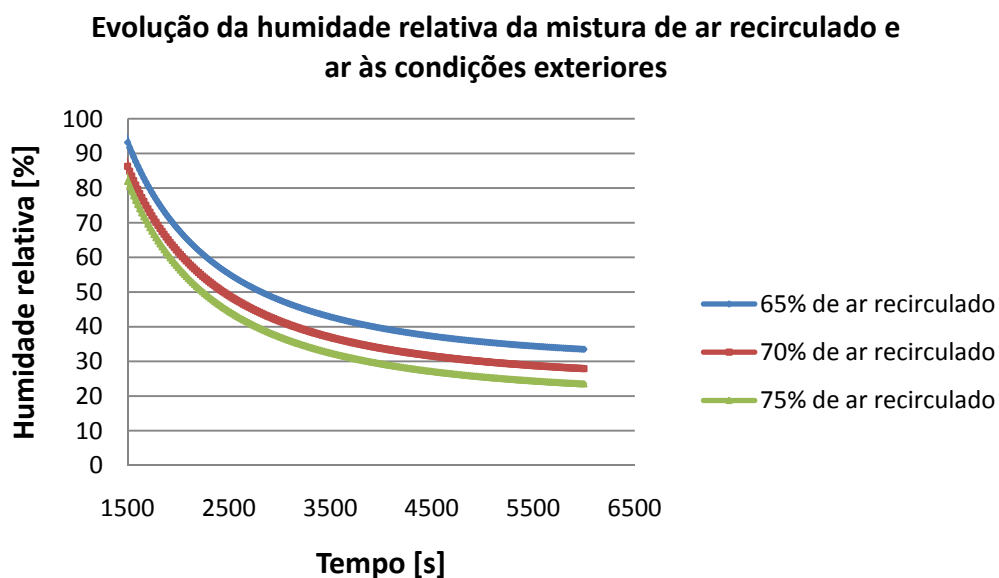


Gráfico.5.6.4.8-Evolução da humidade relativa da mistura de ar recirculado com ar exterior função da percentagem de caudal recirculado.

Comentário Geral

Efectivamente, nestas condições o modelo matemático é menos estável, sendo que a convergência de resultados apenas se inicia por volta dos 1400 segundos de simulação numérica.

Para estas condições de operação deverão ser utilizadas percentagens de recirculação não deverão ser inferiores a 65%, sob pena de ocorrerem condensações.

Apesar das limitações do modelo, visíveis nestas condições de operação estes resultados indicam claramente que, em termos construtivos, as resistências de aquecimento deverão ser posicionadas no mesmo local em que é feita mistura do ar recirculado com o ar às condições exteriores para desta forma prevenir eventuais formações de condensados.

Condição de operacional 3

Pretende-se neste caso compreender a influência da temperatura de secagem na variação do teor de humidade relativa ao longo do tempo.

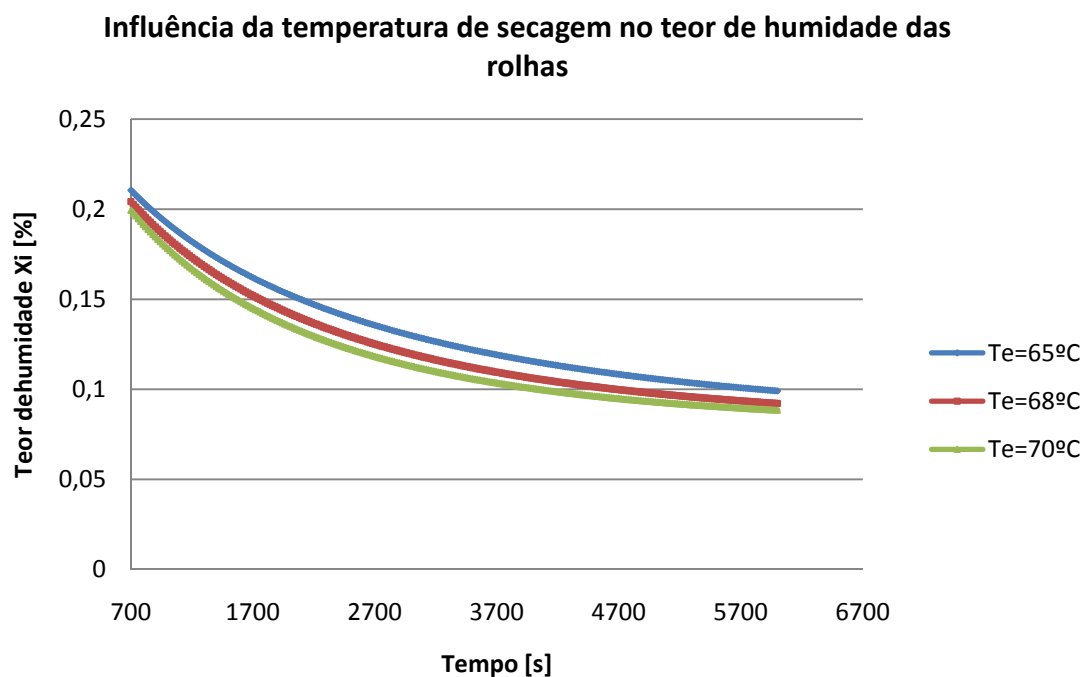


Gráfico.5.6.4.9-Evolução do teor de humidade das rolhas função da temperatura de secagem.

Constata-se que o aumento da temperatura de secagem promove uma maior taxa de evaporação, reduzindo-se desta forma o tempo do ciclo de secagem aumentando desta forma a produtividade, contudo sabe-se que o ciclo de secagem das rolhas que conduz a melhores resultados práticos, do ponto de vista dos fabricantes, é de sensivelmente um a hora e meia e deverá utilizar temperaturas tão baixas quanto

possível. A utilização de uma temperatura da ordem dos 70°C efectivamente conduz a uma situação em que a capacidade produtiva é a esperada, porém esta temperatura não deve ser ultrapassada pois ocorre um fenómeno indesejável vulgarmente designado por “ressuar” das rolhas, isto é após algum tempo depois do ciclo de secagem aparecem à superfície das rolhas algumas gotas de água, verificando-se também uma perda de elasticidade das rolhas. Constatou-se também que a utilização de uma temperatura de secagem de 65°C não é suficiente para a produtividade desejada de 5000 rolhas/hora e apesar do modelo ter sido testado para uma temperatura de secagem de 73°C mantendo a coerência dos resultados, acima desta temperatura os resultados perdem validade, tendo-se optado somente por considerar resultados válidos até aos 70°C. Conclui-se desta forma que a temperatura de secagem deverá situar-se nos 70°C.

A questão do “ressuar” das rolhas tem que ver com o facto de que a temperaturas demasiado elevadas a secagem ser incompleta e ficar um núcleo húmido no interior das rolhas. Os observadores do processo de secagem constataram que as rolhas estão superficialmente secas e numa primeira análise dão-se por satisfeitos. Contudo, como a taxa de transferência de massa de água é inferior à taxa de aquecimento das rolhas (transferência de calor para o interior das rolhas) ao fim de algum tempo aparece água à superfície das mesmas. Por outras palavras, para as dimensões das rolhas há sempre um limite de tempo que é controlado pela transferência da água para fora das rolhas e que se situa entre 1h a 1h:30min.

Potência de aquecimento fornecida

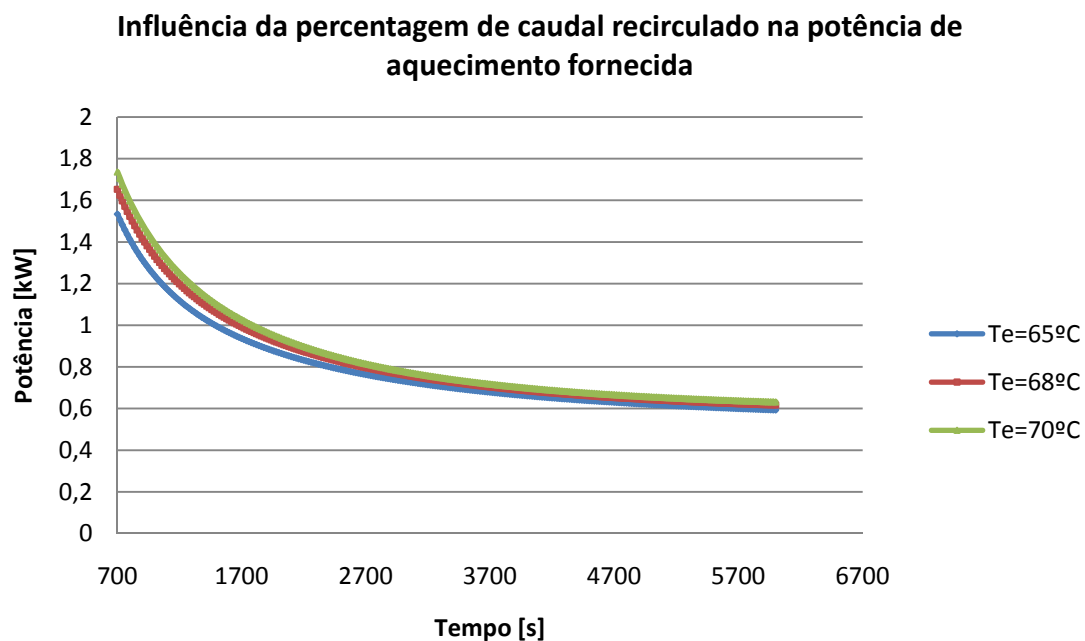


Gráfico.5.6.4.10-Evolução da potência de aquecimento fornecida ao ar função da temperatura de secagem.

A potência de aquecimento requerida necessariamente é maior para uma temperatura de secagem maior. Para além de temperaturas excessivamente altas não serem benéficas à secagem deste material, como já referido anteriormente existem limites físicos à taxa de transferência de massa, representam também um maior consumo energético

5.7 Eficiência da secagem

Procurou-se estabelecer um parâmetro que avalie a eficiência do processo de secagem. Definiu-se como *eficiência de secagem* a razão entre a energia dispendida na evaporação da água contida nas rolhas e energia de aquecimento fornecida.

$$\epsilon_{secagem} = \frac{Q_{evaporação}}{Q_{fornecido}} \quad (38)$$

Sendo

$$Q_{evaporação} = M_{água\ evaporada} h_{vl} \quad (39)$$

Onde:

- $\epsilon_{secagem}$ - Eficiência da secagem;
- $Q_{evaporação}$ - Energia fornecida para a evaporação;
- $Q_{fornecido}$ - Energia de aquecimento fornecida, determinada a partir das potências fornecidas;
- $M_{água\ evaporada}$ - Massa total de água retirada das rolhas.

De seguida apresentam-se os resultados para a *eficiência de secagem*, para várias temperaturas de secagem e percentagens de ar recirculado, tendo-se procurado obter uma equação de segundo grau do tipo $\epsilon_{secagem} = f(T_e)$ que traduza a eficiência do secador, sendo que as equações propostas têm apenas como objectivo o de servir de apoio a decisões de operação e planeamento de produção.

No primeira abordagem, considerou-se que uma percentagem de recirculação de ar de 20%.

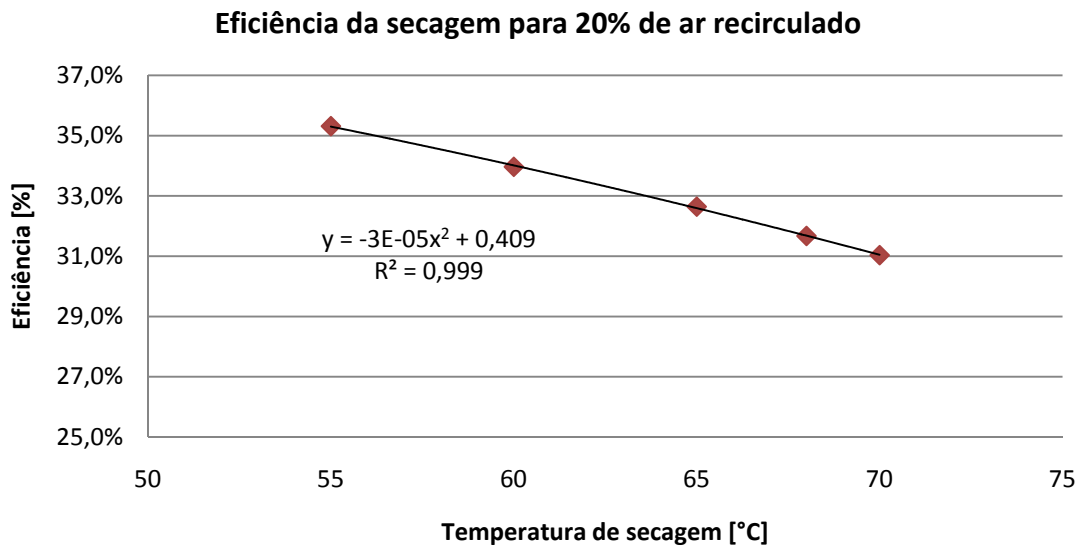


Gráfico.5.7.1-Evolução da eficiência de secagem ar função da temperatura de secagem considerando 20% de ar recirculado.

Na situação seguinte, obteve-se a curva de eficiência da secagem para um caso de 50% de ar recirculado.

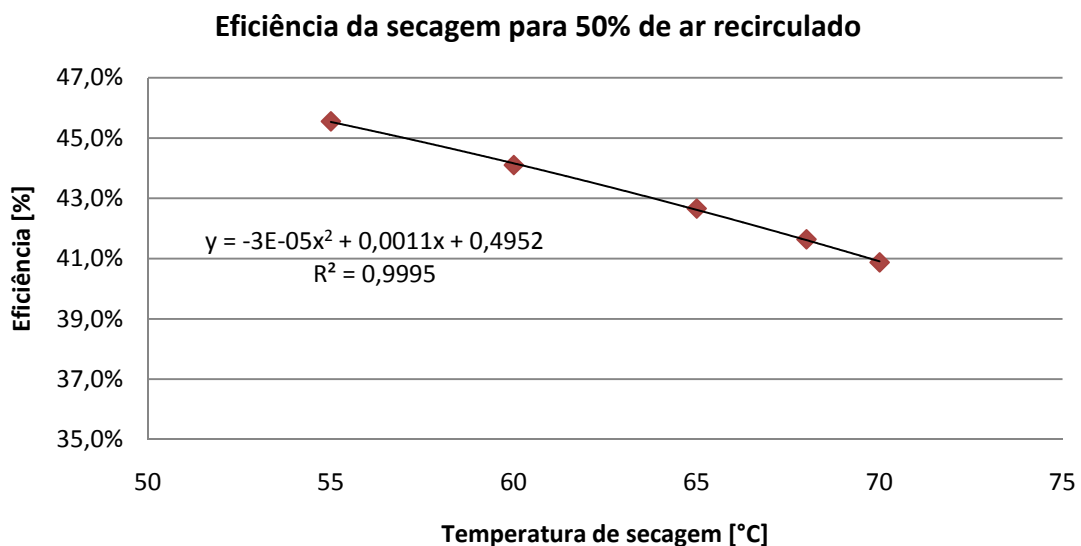


Gráfico.5.7.2-Evolução da eficiência de secagem ar função da temperatura de secagem considerando 50% de ar recirculado.

Por fim, obtive também a curva de eficiência da secagem para uma percentagem de ar recirculado de 70%.

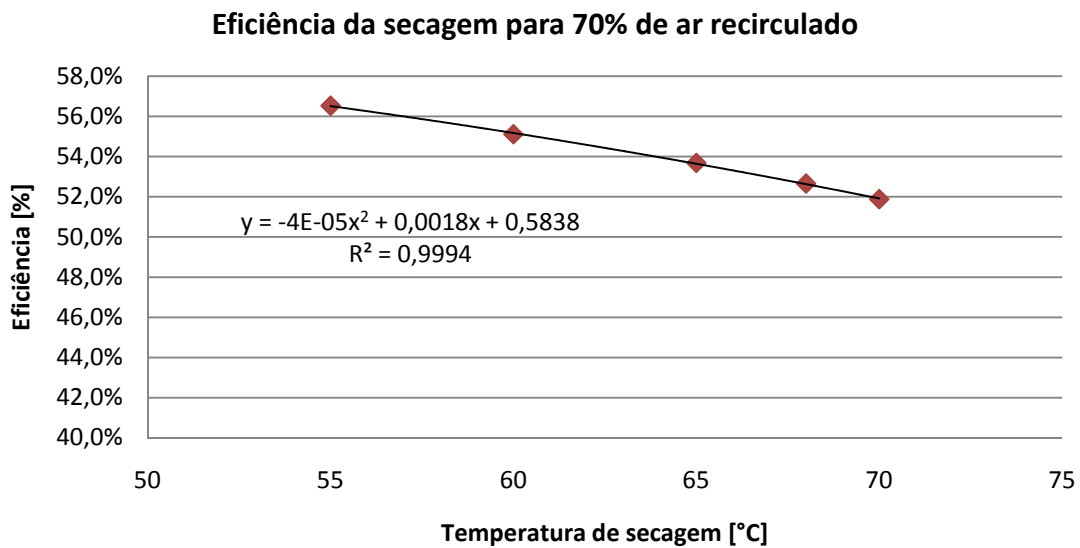


Gráfico.5.7.3-Evolução da eficiência de secagem ar função da temperatura de secagem considerando 70% de ar recirculado.

Comentário geral

Como seria espectável a eficiência da secagem baixa com o aumento das temperaturas do ar de secagem, bem como com a diminuição da percentagem de ar recirculado.

5.8 Custos de Operação

Neste ponto do projecto procurou-se avaliar possíveis custos de operação do secador de forma a estabelecer uma ordem de grandeza dos mesmos e o seu reflexo termos de capacidade produtiva.

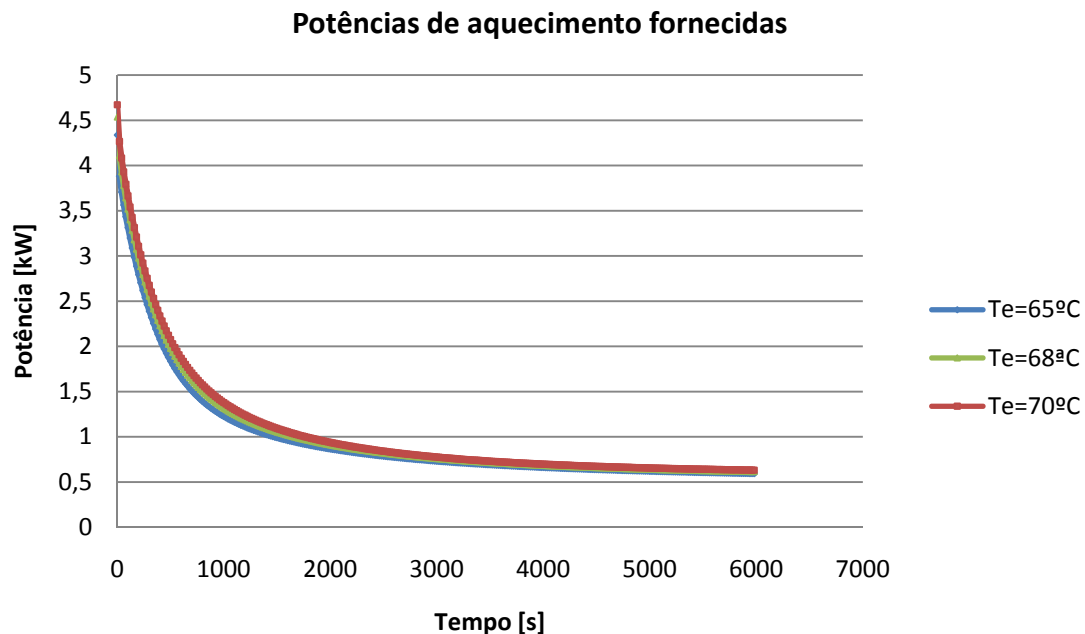


Gráfico.5.8.1-Evolução da potência de aquecimento do ar função da temperatura de secagem considerando 70% de ar recirculado.

Nos custos que a seguir se expõem, apenas são contabilizados os custos associados ao aquecimento do ar até à temperatura de insuflação desejada.

Admitindo que o aquecimento é realizado por resistências eléctricas, com rendimento 100%, não sendo contabilizados quaisquer outros custos associados a outros equipamentos que poderão existir no sistema de secagem.

T_e [°C]	Potência média de aquecimento [kW]
65	0,98
68	1,03
70	1,06

Tabela.5.8.1-Potência média de aquecimento fornecida para temperaturas de secagem diferentes.

O Gráfico.5.8.2 evidencia que para uma temperatura de secagem superior o tempo de necessário até que o valor do teor de humidade das rolhas seja de 9,5% é inferior. A equação representada no mesmo pretende apenas servir de apoio a decisões de cariz produtivo.

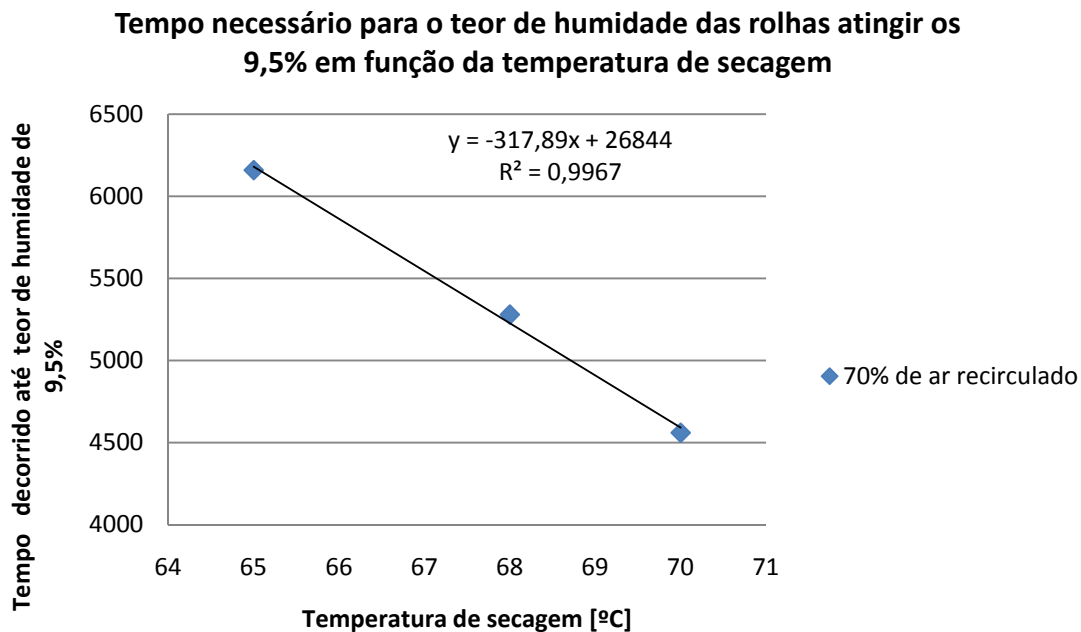


Gráfico.5.8.2-Tempo necessário para que o teor de humidade das rolhas atinja os 9,5% função da temperatura.

T_e [°C]	Instante em que se atinge 9,5% de teor de humidade [s]	Energia [kJ]	Energia [kWh]	Dias/Semana	Semana/Ano	Tarifa [euro/kWh]	Custo [euros/Ano]
65	>6000	5807,46	1,61	5	48	0,08	31,00
68	5280	5676,63	1,58				30,30
70	4560	5394,82	1,50				28,80

Tabela.5.8.2-Custos de operação para temperaturas de secagem diferentes.

Os valores de energia fornecida considerados para a secagem de uma carga por dia, foram determinados até ao instante em que os valores de teor de humidade se encontram nos 9,5%, porém será de expectável que o aumento de capacidade produtiva observado seja inferior, pois na prática não se pretendem valores de teor de

humidade muito próximos dos 10%. Relativamente ao tarifário energético, considerou-se que o sistema de secagem estaria instalado numa unidade fabril cuja energia eléctrica é recebida em média tensão. Tipicamente este tipo de unidades fabris apresenta um custo médio do kWh de oito cêntimos.

Apesar de a partida uma temperatura de secagem superior poder indiciar um custo de operação superior, na realidade passa-se o contrário nos casos considerados. Este facto pode ser explicado pelo tempo de fornecimento de potência, ou seja, uma temperatura de secagem superior, conduz uma taxa de secagem superior (Gráfico.4.3.3.1), logo o tempo de secagem por sua vez diminui. Analisando o Tabela.5.8.1 verifica-se que a potência média de aquecimento do ar de secagem, para as temperaturas consideradas são próximas, aumentando porém, com a temperatura de secagem. Contudo devido à diminuição do tempo de fornecimento (entenda-se, instante em que o teor de humidade é de 9,5%), este efeito é compensado, traduzindo-se numa menor energia fornecida e por consequência uma diminuição dos custos de operação.

A Tabela.5.8.3 evidencia a capacidade produtiva esperada do secador. Porém, deverá ter-se em conta, que os valores apresentados estão majorados, pois foram determinados para o instante em que o teor de humidade nas rolhas é de 9,5%, isto é, os valores de teor de humidade estão ainda muito próximos dos 10%.

T_e [°C]	Tempo de secagem de uma "Batelada"	Capacidade produtiva real [rolha/hora]	Percentagem da capacidade produtiva esperada (7500 rolha/hora)
65	≈ 1h:40min	≈ 4500	-10%
68	≈ 1h:25min	≈ 5110	+2%
70	≈ 1h:15min	≈ 5900	+18%

Tabela.5.8.3- Capacidade produtiva vs temperatura de secagem.

A partir da análise da tabela.5.8.1 e tabela.5.8.2 poderão estabelecer-se análises do custo/benefício, sempre importantes, para uma gestão da produção eficiente.

Conclusão

Relativamente às condições de operação limites propostas, nomeadamente na situação de Inverno ($T_{ext} = 8^{\circ}\text{C}$, $\Phi_{ext} = 80\%$) verificou-se que o secador tem capacidade de operar nestas condições pois o ar de secagem a estas condições sofre um aquecimento considerável e sendo este aquecimento cem por cento sensível, em termos psicrométricos, traduz-se numa evolução a humidade absoluta constante resultando num abaixamento do valor de humidade relativa do ar à entrada do reactor a humidade, e apesar da recirculação, o ar de secagem apresenta condições para remover água das rolhas. Contudo, na situação de Verão húmido ($T_{ext} = 27^{\circ}\text{C}$, $\Phi_{ext} = 75\%$) os resultados poderão ser mais contestáveis, visto que, apenas foram dados como válidos os resultados obtidos numa gama de caudal de ar recirculado bastante mais apertada (65% a 75%).

As dimensões do reactor escolhidas, nomeadamente diâmetro do jacto de 156mm, diâmetro do reactor 650mm e altura do reactor de 600mm foram escolhidas de modo a otimizar a carga e minorar o efeito de eventuais efeitos de parede que possam ocorrer, devido à altura leito, em termos relativos, ser superior comparativamente à altura do leito dos dados experimentais. Sugerem-se como condições de operação uma temperatura de secagem do ar 70°C e 70% de recirculação de ar. As rolhas não deverão ser secadas acima desta temperatura, sob pena de perderem elasticidade e “ressecarem”, originando uma perda de qualidade deste produto, e eventualmente a não conformidade de uma carga inteira.

O estabelecimento do parâmetro *eficiência de secagem* permite a avaliar qual fracção de energia efectivamente utilizada na remoção de humidade das rolhas. Conclui-se que a eficiência da secagem aumenta com a percentagem de ar recirculado, porém diminui com o aumento da temperatura do ar de secagem, permitindo uma eficiência de secagem de aproximadamente 53% para uma temperatura de secagem de 70°C e uma percentagem de ar recirculado de 70% (condições de trabalho sugeridas).

Em termos de custos de operação e para as situações testadas, verifica-se ser vantajoso operar a uma temperatura de secagem de 70°C , com uma percentagem de ar recirculado de 70%, representando uma mais-valia, em termos económicos, em termos de produtividade e por fim, qualidade.

Objectivamente, a grande limitação do modelo é a escolha da correlação (21) como método de determinação do teor de humidade das rolhas em cada instante, porém um dos objectivos do trabalho era também a sua utilização no dimensionamento do secador.

Um projecto com estas características, especificidades e realizado num período de tempo limitado, naturalmente que apresenta um grau de dificuldade considerável e apesar de todo o trabalho desenvolvido, o sentimento de que fica sempre algo por explorar é uma realidade. Porém os objectivos deste projecto foram alçados. Foram simuladas diversas condições de operação, optimizadas as dimensões do reactor, foi também sugerido o esquema de todo o sistema de secagem e estimados parte dos custos de operação associados ao sistema, tendo sempre em atenção que um projecto com este cariz, obriga a uma perspectiva transversal e integrada dos processos e fenómenos envolvidos.

Como trabalhos futuros, sugere-se a construção de um secador de rolhas com as características acima descritas com o objectivo de posteriores estudos de aprofundamento das características da secagem das rolhas de cortiça, devendo ser consideradas também as condições operacionais propostas neste trabalho considerando-se nestas condições a recirculação de ar proveniente do reactor.

Durante a elaboração deste projecto, foi notória a falta de bibliografia relativa às condições de transferência de calor no interior de leitos em jorro, por este facto sugere-se o estudo destes fenómenos, procurando identificar coeficientes de convecção no interior de um leito em jorro.

Bibliografia

Keey, R.B., 1978, *Introduction to Industrial Drying Operations*, Pergamon Press

Keey, R.B., 1980, *Theoretical foundations of drying technology*, in *Advances in Drying*, Mujumdar ed., Vol1, Hemisphere Publishing Corporation, Washington

Levenspiel, O. and Kunni, P., 1991, *Fluidization Engineering*, Butterworth-Heinemann, 2nd Edition, Boston

Magalhães, A.G., 2004, *Caracterização de Condições de Secagem de Rolhas de Cortiça num Leito em Jorro*, Tese de Mestrado, FEUP, Porto

Martins, L.A.S.B., 1990, *Determinação de curvas características da secagem de rolhas de cortiça*, Tese de Mestrado, FEUP, Porto

Martins, L.A.S.B., Pinho, C.M.C.T and Santos, A.M.S, 1994, *Characteristic Drying-curves of corks in a slim fixed bed*, III Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste, Belém-PA, Brasil

Anexos

Anexo A – Folhas de equações no EES

```

EES Academic Commercial: D:\Documents and Settings\Proprietário\Os meus documentos\Feup\Projecto Fim de Curso\EES\final\Extrapolações\leito_jorro_final_perdas
File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples
#####dados#####
c_r=1,884
c_wl=4,1868
delta_t=20
T_e=70
w_e=0,0058
cp_v=1,884
h_vl=2501
U=1,78
X_i=0,3
X_e=0,08
cp_ar=1,005

D_i=0,156
D_i^2=r_i
seccao=pi*r_i^2
caudal=U*seccao "caudal volumico"
r_ext=0,4
T_ext=20

v_ext=Volume(AirH2O;T=T_1;r=r_ext;P=P_1)
T_1=T_ext "temperatura"

P_1=101 "pressao"
m_dot_ar=caudal/V_ext

##### CARGA #####

carga=7500
D=0,021
L=0,029
volume_rolha/0,5=(pi*D^2)/4*L
ro_rolha=1648
massa_rolha=carga*volume_rolha*ro_rolha
m_rs=massa_rolha
A_p=(pi*D^2)^2/4+pi*D*L
A_t=A_p*carga

```

```

EES Academic Commercial: D:\Documents and Settings\Proprietário\Os meus documentos\Feup\Projecto Fim de Curso\EES\final\Extrapolações\leito_jorro_final_perdas
File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples
A_t=A_p*carga

#####Conveccao#####

Fluid$='air_ha'
T_inf=T_e
T_s=(T[50]-T[300])/2
P=100
u_inf=U

Call External_Flow_Cylinder(Fluid$;T_int;T_s;P;u_inf;D : F_d;L; h; C_d; Nusselt; Re)
h_p=h

L_conveccao=0,8 "este comprimento do reactor para a conveccao no interior do cilindro"
T_med=(T_s[50]+T_s[300])/2

call PipeFlow('airH2O'; T_med; P; m_dot_ar; D_reactor; L_conveccao; 0,05 : h_T; h_H; DELTAP; Nusselt_T; f; Re; Nusselt3) "conveccao forçada dentro de um cilindro"

P_perdas=(T_parede-T_ext)/(1/(h_ext*D_reactor_4*pi*L_reactor))

Call FC_vertical_cylinder(Fluid$; T_parede; T_ext; P; L_reactor; D_reactor_4 : h_ext; Nusselt2; Ra)

#####Dimensoes e isolamento#####
L_reactor=0,6
D_reactor=0,65
r_1=D_reactor/2
D_reactor_2=D_reactor+0,01
r_2=D_reactor_2/2
D_reactor_3=D_reactor_2+0,04
r_3=D_reactor_3/2
D_reactor_4=D_reactor_3+0,01
r_4=D_reactor_4/2

```

```

EES Academic Commercial: D:\Documents and Settings\Proprietário\Os meus documentos\Feup\Projecto Fim de Curso\EES\final\Extrapolações\leito_jorro_final_perdas
File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples
#####condutibilidades termicas#####
T_prop=(T_med+T_ext)/2      " so serve que retirar as condutibilidades térmicas dos materiais"
k_aco=k_(Stainless_AISI302;50)
k_isolamento=k_(Glass fiber duct liner;50)
k_alu=k_(Aluminum;50)

##### EQUAÇÕES #####
N=300
temp[0]=0

T[0]=20
X[0]=X_i
ws[0]=w_e

P_perdas=(T_med-T_ext)/((1/(h*D_reactor*pi*L_reactor))+(ln(r_2/r_1)/(2*pi*L_reactor*K_aco))+(ln(r_3/r_2)/(2*pi*L_reactor*K_isolamento))+(ln(r_4/r_3)/(2*pi*L_reactor*K_alu))+(1/(h_ext*D_reactor_4*pi*L_reactor_4)))

Q_perdas=P_perdas*0.001*delta_t
Ts[0]=60
wmist[0]=0
cof_recuperaçao=0.7

duplicate i=1,N

temp[i]=temp[i-1]+delta_t

X[i]=X_e+(X_i-X_e)*exp(-6284*(T_e^(-3.27))^U^(-0.78)*temp[i]^(0.0063*(T_e^1.1))^U^0.25))

ws[i]=wmist[i]-(m_rs/m_dot_ar)*X[i]-X[i-1]/delta_t

Q_perdas=m_rs*c_r*(T[i]-T[i-1])+m_rs*c_w*(X[i]*T[i]-X[i-1]*T[i-1])+m_dot_ar*delta_t*(cp_ar*(Ts[i]-T_e)+cp_v*(ws[i]*T[i]-wmist[i]*T_e)+h_vl*(ws[i]-wmist[i]))

m_dot_ar*delta_t*(cp_ar*T_e+wmist[i]*(cp_v*T_e+h_vl))-m_dot_ar*delta_t*(cp_ar*Ts[i]+ws[i]*(cp_v*Ts[i]+h_vl))=h_p*(T_e+Ts[i])/2-T[i])*A_t

#####recuperaçao de ar#####
m_dot_ar*wmist[i]=(1-cof_recuperaçao)*m_dot_ar*w_e+m_dot_ar*ws[i]*cof_recuperaçao

h_s[i]=Enthalpy(AirH2O;T=Ts[i];w=ws[i];P=101)
h_final[i]=Enthalpy(AirH2O;T=T_e;w=wmist[i];P=101)

m_dot_ar*hmist[i]=(1-cof_recuperaçao)*m_dot_ar*35+m_dot_ar*h_s[i]*cof_recuperaçao

T_mist[i]=Temperature(AirH2O;h=hmist[i];w=wmist[i];P=101)
rh_mist[i]=RelHum(AirH2O;h=hmist[i];w=wmist[i];P=101)*100

Q_dot_res[i]=m_dot_ar*(h_final[i]-hmist[i])

end

```

Anexo B – Folha de resultados (Arrays) do EES

Sort	T_i	temp _i	$T_{s,i}$	ws_i	X_i	wmist _i	$h_{g,i}$	hmist _i	$h_{fina,i}$	\dot{Q}_{resi}	$m_{mist,i}$	$T_{mist,i}$
[119]	65,79	2380	61,58	0,01784	0,1251	0,01423	108,7	86,56	107,9	0,864	18,9	49,34
[120]	65,85	2400	61,7	0,01769	0,1246	0,01412	108,4	86,38	107,6	0,8605	18,7	49,42
[121]	65,91	2420	61,81	0,01755	0,1242	0,01402	108,1	86,2	107,4	0,8571	18,49	49,5
[122]	65,96	2440	61,92	0,01741	0,1237	0,01392	107,9	86,02	107,1	0,8538	18,3	49,58
[123]	66,02	2460	62,03	0,01727	0,1233	0,01383	107,6	85,84	106,9	0,8504	18,1	49,65
[124]	66,07	2480	62,14	0,01713	0,1228	0,01373	107,4	85,67	106,6	0,8472	17,91	49,73
[125]	66,13	2500	62,25	0,01699	0,1224	0,01364	107,1	85,5	106,4	0,844	17,73	49,8
[126]	66,18	2520	62,35	0,01686	0,122	0,01354	106,9	85,33	106,1	0,8408	17,54	49,87
[127]	66,23	2540	62,46	0,01673	0,1215	0,01345	106,7	85,16	105,9	0,8377	17,37	49,94
[128]	66,28	2560	62,56	0,0166	0,1211	0,01336	106,4	85	105,6	0,8347	17,19	50,01
[129]	66,33	2580	62,66	0,01647	0,1207	0,01327	106,2	84,84	105,4	0,8317	17,02	50,08
[130]	66,38	2600	62,76	0,01634	0,1203	0,01318	106	84,68	105,2	0,8287	16,85	50,15
[131]	66,43	2620	62,86	0,01622	0,1199	0,01309	105,7	84,52	104,9	0,8258	16,69	50,22
[132]	66,48	2640	62,95	0,0161	0,1195	0,01301	105,5	84,37	104,7	0,8229	16,53	50,28
[133]	66,53	2660	63,05	0,01597	0,1191	0,01292	105,3	84,21	104,5	0,8201	16,37	50,35
[134]	66,57	2680	63,14	0,01586	0,1187	0,01284	105,1	84,06	104,3	0,8173	16,21	50,41
[135]	66,62	2700	63,23	0,01574	0,1183	0,01276	104,9	83,91	104	0,8146	16,06	50,47
[136]	66,66	2720	63,32	0,01562	0,1179	0,01268	104,7	83,77	103,8	0,8119	15,91	50,54
[137]	66,71	2740	63,41	0,01551	0,1175	0,0126	104,5	83,62	103,6	0,8092	15,77	50,6
[138]	66,75	2760	63,5	0,0154	0,1172	0,01252	104,3	83,48	103,4	0,8066	15,62	50,66
[139]	66,8	2780	63,59	0,01528	0,1168	0,01244	104,1	83,34	103,2	0,804	15,48	50,72
[140]	66,84	2800	63,67	0,01518	0,1164	0,01236	103,9	83,2	103	0,8015	15,35	50,77
[141]	66,88	2820	63,76	0,01507	0,1161	0,01229	103,7	83,06	102,8	0,799	15,21	50,83
[142]	66,92	2840	63,84	0,01496	0,1157	0,01221	103,5	82,93	102,6	0,7965	15,08	50,89
[143]	66,96	2860	63,92	0,01486	0,1154	0,01214	103,3	82,8	102,4	0,7941	14,95	50,94
[144]	67	2880	64	0,01475	0,115	0,01207	103,1	82,66	102,2	0,7917	14,82	51

Anexo C – Gráficos do EES (exemplo)

