

19.10.1976
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS E AGRICOLA da UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE CAMPINAS. Tese para obtenção do Título de MESTRADO.
Junho de 1976.

EFEITOS TERMICOS DA SECAGEM
EM SPRAY

Rodolfo Guillermo Künzig

Engenheiro Químico

ORIENTADOR

Dr. Chin Shu Chen

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

Com muito carinho à

Minha esposa Susy

e filhas Erica e Inés

AGRADECIMENTOS

Ao orientador e amigo, Professor Doutor Chin Shu Chen, pelos ensinamentos e apoio durante o desenvolvimento da tese.

Aos professores Doutor Henry Schwartzberg e Doutor Gonzalo Roa pelas valiosas sugestões e a colaboração prestada.

À Direção da Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, pelas facilidades oferecidas durante o Curso e execução deste trabalho.

À Organização dos Estados Americanos e à Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Misiones, pelo apoio econômico.

A meu amigo Antônio R. da Silva Costa, pela colaboração.

À minha esposa, aos professores, aos colegas e a todas as pessoas que colaboraram direta ou indiretamente.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE QUADROS	I
ÍNDICE DE FIGURAS	II
RESUMO	III
SUMMARY	IV
NOMENCLATURA	V
INTRODUÇÃO	01
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	03
1. Secagem em spray	03
1.1 Secagem de gotas contendo sólidos dissolvidos	03
1.2 Secagem de gotas contendo sólidos insolúveis	04
1.3 Mecanismos da secagem	04
1.3.1 Transferência de calor e massa	04
1.3.2 Transferência de quantidade de movimento	05
1.4 Simulação de secadores spray	06
2. Tratamento térmico	07
2.1 Cinética das reações	07
2.2 Relação de Z com a energia de ativação	09
2.3 Resistência dos microorganismos ao calor seco	10
2.4 Destruição de microorganismos durante a secagem spray	11
OBJETIVOS	14
ANÁLISES DO SISTEMA E SIMULAÇÃO	15
1. Simulação do secador spray	17
1.1 Programa Principal	17
1.2 Subrotinas	19
1.2.1 Subrotina PRO	19

	Página
1.2.2 Subrotina VELO	21
1.2.3 Subrotina SE	22
1.2.4 Subrotina BAL	24
2. Tratamento térmico	25
2.1 Subrotina TP	25
2.2 Subrotina SD	25
3. Computação	26
RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
1. Perfis de temperatura	27
2. Perfis de umidade	28
3. Tratamento térmico durante a secagem	28
3.1 Efeito da distribuição de tamanhos das partículas	28
3.2 Efeito do tamanho das partículas	29
3.3 Efeito do teor de sólidos da alimentação	30
3.4 Efeito da temperatura	30
4. Sobrevivência de Salmonella durante a secagem em spray	31
4.1 Limite de confiança dos valores de D	32
CONCLUSÕES	53
SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	54
REFERÊNCIAS	55
APÊNDICE	60

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro		Página
01	Constantes da equação $Nu'_{0.5h} = 2 - K (Re)^x (Pr \text{ o } Sc)^y$	05
02	Valores da energia de ativação a 212 °F	09
03	Resistência de Salmonella ao calor seco	10
04	Influência da umidade na resistência térmica	11
05	Distribuição porcentual das partículas	29
06	Efeito da distribuição de tamanhos das partículas	33
07	Efeito do tamanho das partículas	35
08	Efeito do conteúdo de sólidos	37
09	Efeito do conteúdo de sólidos	39
10	Efeito da temperatura	41
11	Comparação de valores experimentais e calculados	42
12	Variação de D_{212} com Z	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
01	Secador Spray	15
02	Modelo Matemático do secador spray	16
03	Diagrama de fluxo do programa principal	20
04	Balances de massa e energia	24
05	Temperatura do ar e das partículas em função do tempo. Ar entrando a 560 °F	45
06	Temperatura do ar e das partículas em função do tempo. Ar entrando a 330 °F	46
07	Umidade do ar e das partículas em função do tempo.	47
08	Umidade do ar e das partículas em função do tempo.	48
09	Diagrama D vs. Z para Salmonella Typhimurium	49
10	Diagrama D vs. Z para Salmonella Kentucky	50
11	Diagrama D vs. Z para Salmonella Thompson	51
12	Diagrama D vs. Z para Salmonella Tennessee	52

RESUMO

Neste estudo o método de análise de sistemas foi aplicado na análise dos efeitos térmicos durante a secagem em spray. O modelo matemático foi programado em Fortran IV e executado no sistema de computação PDP 10.

Assumindo cinética de reação de primeira ordem e diversas energias de ativação, estudou-se o efeito da distribuição de tamanhos das partículas, do tamanho das gotas, do teor de sólidos da alimentação do secador e a influência das temperaturas.

Os resultados indicam a importância do tamanho das partículas e da energia de ativação da reação no tratamento térmico. A presença de partículas pequenas, ao aumentar a velocidade de secagem, diminui o tratamento térmico.

Simulando condições de secagem com dados publicados na literatura, obteve-se valores de D_{212} entre 0,009 e 0,018 minutos a $Z = 200$ para Salmonella Typhimurium, Thompson e Kentucky.

Conclui-se que o tratamento térmico durante a secagem em spray pode ser dividido em duas partes: durante a secagem e durante o transporte até a saída do secador, sendo em cada uma, indicada a influência qualitativa das variáveis.

SUMMARY

In this study the method of system analysis was applied to analyze the thermal effects during the process of spray drying. The model was programmed in Fortran IV and was executed on system PDP 10 Computer.

By assuming the first order reaction and different activation energies, the effects of particle size distribution, particle size, solid content of feed and influence of temperatures were studied.

The results indicated the important effects of particle size and the activation energy of reaction on thermal treatments. The presence of small particles by increasing drying velocity was found to decrease thermal effects.

Simulation of drying conditions similar to that of reported in the literature, values of D_{212} between 0,009 and 0,018 minutes at $Z = 200$ °F, were obtained for Salmonella Typhimurium, Thompson and Kentucky.

It concluded that thermal effects during spray drying may be divided in two parts: one during drying itself and the other during transport to the outlet of the drier. The application of the model was able to evaluate the qualitative effects of various variables on the thermal processes.

NOMENCLATURA

Al	Distância vertical decorrida, pés
AT	Temperatura do ar, °F
B	Constante
C	Concentração
C _D	Fator de Fricção
Cp	Calor específico do sólido, 0,36 BTU/lb °F
Cpa	Calor específico do ar, BTU/lb °F
D	Tempo para destruir 90 % da concentração inicial a uma certa temperatura, minutos
DD	Diâmetro do secador, pés
Dp	Diâmetro das partículas, pés
E	Constante
AE	Energia de ativação, cal/mol
ERH	Umidade relativa de equilíbrio
EI	Entalpia da alimentação, BTU
EO	Entalpia do produto, BTU
EV	Água evaporada no intervalo de tempo, lb
EVAP	Água evaporada no intervalo de tempo por um tamanho de partícula, lb
F	Vazão da alimentação do secador, lb/hr
Fs	Conteúdo de sólidos da alimentação, lb sólido seco/hr
Fp	Equivalência em minutos a 212 °F do calor aplicado, min
g	Aceleração da gravidade
G	Vazão do ar, lb/hr
h	Coeficiente pelicular de transferência de calor, BTU/pé ² .seg.°F
H	Entalpia do ar, BTU/lb ar seco
k	Condutividade térmica do ar, BTU/pé.seg.°F

K	Constante
ky	Coeficiente de transferência de massa, lb água/lb água.pé ² .s
N	Número de partículas
p'	Pressão de vapor da água, atm.
POR	Porção agem de partículas
Qa	Calor de aquecimento da partícula, BTU
Qe	Calor que entra, BTU
Qs	Calor que sai, BTU
Ra	Distância radial decorrida, pés
t	Tempo, seg
T	Temperatura, °F
T'	Temperatura, °R
TS	Temperatura da partícula, °F
U	Velocidade da partícula, pés/seg
Uh	Velocidade horizontal da partícula, pés/seg
Uv	Velocidade vertical da partícula, pés/seg
Ve	Volume específico, pés ³ /lb
Vt	Velocidade terminal da partícula, pés/seg
VV	Velocidade do ar dentro do secador, pés/seg
WS	Peso de sólido, lb/seg
WW	Peso de água, lb/seg
x	Umidade do produto, lb água/lb totais
X	Umidade do produto, lb água/lb sólido seco
y	Constante
Y	Umidade absoluta do ar, lb água/lb ar seco
YS	Umidade na superfície da partícula, lb água/lb ar seco
Z	Graus Farenheit necessários para que a curva de destruição térmica atravessasse um ciclo logaritmico, °F
ZZ	Variável auxiliar

Δ	Gradiente
ρ	Densidade do ar, lb/pé ³
ρ_s	Densidade do sólido, lb/pé ³
μ	Viscosidade do ar, lb/pé.seg
μ	Microns
λ	Calor latente de vaporização da água, BTU/lb
π	3,1416
D	Difusividade, pé/seg

Números adimensionais

Nu	Número de Nusselt, $h.D_p/k$
Pr	Número de Prandtl, $C_{pa}.\mu/k$
Re	Número de Reynolds da partícula, $D_p.U.\rho_s/\mu$
Sc	Número de Schmidt, $\mu/\rho D$
Sh	Número de Sherwood, $k_y.D_p.V_e/D$

Subscriptos

1	Inicial
2	Final

INTRODUÇÃO

A secagem tem sido e seguramente continuará sendo uma das principais formas de conservar alimentos. Entre os equipamentos utilizados o secador spray ocupa um lugar muito importante, sendo que atualmente alguns produtos alimentícios são quase que exclusivamente secados neste tipo de equipamento, tal o caso do leite, ovo, café e alguns outros. Também nas indústrias químicas e bioquímicas encontram-se muitas aplicações.

A secagem em spray consiste em extrair umidade de um fluido ou pasta finamente pulverizados pondo-os em contato com ar quente. Devido ao pequeno tamanho das partículas desenvolve-se uma relação área/volume muito elevada, o que permite atingir altos fluxos de calor e de massa, reduzindo conseqüentemente, os tempos de secagem. Isto é especialmente importante em produtos sensíveis a altas temperaturas, como o caso de alguns gêneros biológicos.

A secagem em spray é um processo complexo que se processa com a transferência simultânea e interatuante de quantidade de movimento, calor e massa. A velocidade de secagem de uma partícula é função de muitas variáveis, entre elas: velocidade, diâmetro, umidade de equilíbrio, temperatura e umidade do ar.

Foi comprovado teórica e experimentalmente que as partículas pequenas secam mais rapidamente que as grandes, tendo portanto teor de umidade e temperaturas diferentes a cada instante e originando um produto heterogêneo. Estas diferentes combinações de tempo-temperatura afetam os microorganismos presentes no material a secar, bem como a qualidade do produto obtido, especialmente aqueles termosensíveis como leite, ovos, enzimas e antibióticos.

Os estudos feitos e os dados existentes são ainda escassos, não permitindo uma estimação dos efeitos e a importância de variáveis fundamentais como: diâmetro e distribuição de partículas, teor de sólidos, temperatura de entrada e saída do ar, sensibilidade da reação com a temperatura.

A simulação de um modelo matemático no computador é o método mais adequado para estudar problemas dessa complexidade devido a quantidade de variáveis e suas interrelações, já que permitirá analisar cada uma separadamente e prever as condições do produto a ser obtido.

O conhecimento desses fatos permitirá uma melhor operação dos secadores em funcionamento, e, orientará no projeto e construção de equipamentos mais adequados.

O presente trabalho teve como objetivo aplicar métodos de análises de sistemas na avaliação do tratamento térmico durante a secagem em spray. O modelo matemático foi verificado com dados experimentais publicados, referentes a secagem de leite em spray e aplicado na avaliação da letalidade de Salmonella.

*

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A formulação de um modelo matemático requer o conhecimento dos fenômenos envolvidos e das relações matemáticas que os governam. O presente trabalho pode ser dividido em duas partes:

1. Secagem em spray
2. Tratamento térmico

1. Secagem em spray

Produzida a subdivisão da alimentação do secador, (Processo chamado habitualmente de atomização), tem-se uma nuvem de pequenas gotas nas que interessam principalmente, pela importância posterior, o tamanho das partículas obtidas e sua distribuição.

A presença de sólidos diminui a velocidade de secagem com respeito à das gotas de líquidos puros. De acordo com a natureza dos sólidos contidos nas gotas podem ser considerados dois grupos que apresentam características diferentes durante a secagem.

1.1 Secagem de gotas contendo sólidos dissolvidos

Ranz e Marshall (31) observaram que na superfície da gota a água é evaporada rapidamente e forma-se uma solução saturada. A temperatura superficial é constante na temperatura de bulbo úmido da solução saturada, que é mais elevada que a do solvente puro, proporcionando um período chamado de velocidade constante de secagem. O sólido pode-se difundir da superfície da gota para o interior e a água em sentido contrário.

Em determinado momento, a solução torna-se supersaturada e aparecem os primeiros cristais sólidos. A partir daí a temperatura da gota eleva-se paulatinamente devido a difusão da água

tornar-se mais difícil, até alcançar as condições finais da secagem. Este período é chamado de velocidade decrescente. Se a capa sólida formada oferece muita resistência à passagem da água, a temperatura da gota poderá elevar-se muito e ainda apresentar vaporização interna, podendo dar lugar a formação de partículas expandidas e com buracos.

1.2 Secagem de gotas contendo sólidos insolúveis

Ao començar a evaporação, a temperatura superficial é igual à temperatura de bulbo úmido do solvente puro. Mas à medida que a evaporação vai-se processando os sólidos vão se concentrando e deste modo a pressão de vapor diminui e a temperatura da gota se eleva. Dessa maneira há uma elevação constante da temperatura superficial e a secagem se processa em sua maior parte no período de velocidade decrescente. Charleworth e Marshall (05) secando gotas de extrato de café encontraram que o período de velocidade constante parecia não existir.

1.3 Mecanismos da secagem

Qualquer que seja a natureza dos sólidos contidos na gota, a secagem se processa com a transferência simultânea e interatuante de calor, massa e quantidade de movimento.

1.3.1 Transferência de calor e massa

Durante a secagem se transfere calor por convecção do ar para a gota. Esse calor é em grande parte utilizado como calor latente de vaporização da água, que é transportada por convecção e difusão para a corrente de ar. A velocidade de secagem é resultante da temperatura, umidade, propriedades do ar bem como do diâmetro, velocidade relativa e temperatura da gota.

A teoria da camada limite prediz e tem sido comprovada experimentalmente por Frössling que a transferência de calor não é uniforme em toda a superfície da gota, apresentando um máximo na frente e um mínimo onde ocorre a separação da camada limite.

Muitos pesquisadores estudaram este problema, propondo equações para calcular os coeficientes de transferência de calor e de massa baseados em números adimensionais. A forma geral dessas equações é, segundo Masters (23), a seguinte:

$$Sh = 2 + K (Re)^x (Sc)^y$$

$$Nu = 2 + K (Re)^x (Pr)^y$$

sendo K, x e y constantes cujos valores, segundo seus autores, figuram no Quadro 1.

Quadro 1: Constantes da equação Nu (o Sh) = $2 + K (Re)^x (Pr$ o $Sc)^y$

Pesquisadores	K	x	y	Re
Ranz - Marshall	0,6	0,5	0,33	2 - 200
Ingebo	0,303	0,6	0,6	0 - 500
Frössling	0,552	0,5	0,33	2 - 1300
Maxwell - Storrow	0,552	0,5	0,33	1 - 1000
Schwartzberg	0,347	0,62	0,31	

Quando $Re = 0$, resulta $Sh = Nu = 2$. Bose e Pei (21) trabalhando com partículas de 40 a 125μ , demonstraram que a suposição $Re = 0$, pode ser aplicada sem grande erro somente com partículas de diâmetros menores que as utilizadas por eles.

1.3.2 Transferência de quantidade de movimento

Imediatamente depois de surgir do disco atomizador, as gotas ficam submetidas a distintas forças, como: a de inercia, gravitacional, forças devido a fricção com o ar, a flotação; que modificam sua velocidade inicial. Lapple e Shepherd (15) deduziram equações para os gradientes de velocidade horizontal e vertical no intervalo de tempo Δt , aplicáveis a partículas que se movem em um campo gravitacional em duas dimensões, a saber:

$$\Delta U_h = - \left[\frac{3 \cdot \rho \cdot C_D \cdot U \cdot U_h}{4 \cdot \rho_s \cdot D_p} \right] \Delta t$$

$$\Delta U_v = \left[g \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \right) - \frac{3 \cdot \rho \cdot C_D \cdot U \cdot U_v}{4 \cdot \rho_s \cdot D_p} \right] \Delta t$$

C_D é o fator de fricção, que é função do Número de Reynolds da partícula e de sua forma.

As equações são integráveis somente nos casos mais simples e por tanto de pouco valor prático. Os autores propõem uma solução numérica conhecida como método de Lapple e Shepherd, calculando os gradientes de velocidade em pequenos intervalos de tempo.

Produzida a desaceleração da partícula, esta continua a cair com sua velocidade terminal.

1.4 Simulação de secadores spray

Masters e Mohtadi (24) estudando a trajetória das partículas dentro do secador spray, plantearam as equações de transferência de calor, massa e quantidade de movimento, e devido a com-

plexidade do problema o consideraram particularmente apropriado para solução com computador. Acharam os resultados de valor limitado devido a dificuldade de definir as correntes de ar dentro do secador.

Parti e Paláncz (28) desenvolveram um modelo matemático bem completo para o cálculo de secagem spray em contra-correntes e correntes paralelas. O modelo considera que as partículas se contraem de acordo com a quantidade de água evaporada durante o período de velocidade constante de secagem, permanecendo inalteráveis depois de atingir o conteúdo crítico de umidade. Os resultados apresentados referem-se a um único tamanho de partículas no spray.

2. Tratamento térmico

Muitas vezes alguns constituintes da alimentação do secador são termosensíveis, sofrendo transformações quando submetidas a temperaturas elevadas por tempo suficiente. Eles incluem, em particular, células de microorganismos, proteínas, vitaminas, substâncias corantes e enzimas.

2.1 Cinética das reacções

A cinética das reacções envolvidas podem ser variadas e geralmente não são ainda suficientemente conhecidas. Para microorganismos em meio líquido é aceite que o número de células viáveis reduzem-se exponencialmente com o tempo de exposição a uma temperatura letal constante (33). O mesmo tipo de comportamento foi observado por Dworschák e Hegedűs (09) na decomposição de triptofânio presente em leite em pó e ovo em pó, sendo também aceite para a destruição de tiamina em alimentos (12). Esse tipo de cinéti-

ca corresponde a uma reação monomolecular ou bimolecular de primeira ordem, que é expressa matematicamente como:

$$\frac{-dc}{dt} = k \cdot C$$

Separando variáveis e integrando entre as condições limites, concentrações C_1 e C_2 nos tempos t_1 e t_2 respectivamente:

$$\int_{C_1}^{C_2} \frac{dc}{C} = k \int_{t_1}^{t_2} dt$$

$$-\ln C_2 - (-\ln C_1) = k (t_2 - t_1)$$

$$\ln \frac{C_1}{C_2} = k (t_2 - t_1)$$

$$2,303 \log \frac{C_1}{C_2} = k \cdot \Delta t \quad (1)$$

Chamando D ao tempo necessário para diminuir em 90 % a concentração inicial

$$2,303 \log \frac{100}{10} = k \cdot D$$

$$\frac{2,303}{k} = D$$

Substituindo na equação (1) resulta:

$$D \cdot \log \frac{C_1}{C_2} = \Delta t$$

Os valores de D resultam deste modo uma forma simples de comparar a influência da temperatura em uma reacção. Geralmente coloca-se como subíndice a temperatura, assim, D_{250} significa valor de D a 250 °F.

Ao comparar valores de D obtidos a diferentes temperaturas se obtém uma curva logarítmica, ou linha reta em gráfico semilogarítmico. Chamando-se de Z o número de graus Fahrenheit necessarios para que D varia de 90 %, tem-se (06):

$$\log \frac{D_2}{D_1} = \frac{T_1 - T_2}{Z}$$

Esta equação permite relacionar efeitos térmicos a diferentes temperaturas conhecendo o valor de Z.

2.2 Relação de Z com a energia de ativação

Hayakawa (11) deduz a seguinte relação entre Z e a energia de ativação:

$$\Delta E = 2,55 T^2 / Z$$

Aplicando a fórmula anterior, calculamos o quadro 2:

Quadro 2: Valores da energia de ativação a 212°F

Z	Energia de Ativação
20	57.525 cal/mol
40	28.762 "
80	14.381 "
200	5.752 "
300	3.835 "

2.3 Resistência dos microorganismos ao calor seco

A resistência térmica dos microorganismos ao calor seco tem sido pesquisada por vários investigadores, mostrando em alguns casos ser ela centenas de vezes superior à manifestada em calor úmido, estando também grandemente influenciada pelo conteúdo de umidade do material.

Barrile e Cone (02) apresentaram valores de D_{160} para *Salmonella anatum* em chocolate, variando de 20 horas a 0 % de umidade e 1 hora a 10 % de umidade.

Banwart e Ayres (01) observaram que a sobrevivência de *Salmonella pullorum*, *oranienburg* e *senftenberg* a 50 e 70 °C em clara de ovo seca decrescia rapidamente quando o conteúdo de umidade aumentava de 3 - 5 % para 6 - 12 %.

Riemann(32) *Salmonella typhimurium* obteve diminuições de 10^6 a 90 °C em farinha de carne a 10 % de umidade e de 10^3 a 100 °C quando continha 4 % de umidade.

Donough e Hargrove (25) publicaram dados de concentração de *Salmonella* em função de tempo em leite em pó desnatado com 4 % de umidade, aquecida em estufa á distintas temperaturas. Com esses dados foi calculado o seguinte quadro:

Quadro 3: Resistência de *Salmonella* ao calor seco

Tempo (min.)	D_{140}	D_{170}	D_{185}	D_{240}
15	140	-	-	19,5
30	162	40,9	26,8	14,5
60	359	49,6	29,6	-
120	332	103,0	49,4	-
180	695	75,4	58,6	-
300	831	110,5	64,3	-
600	200	180,6	-	-

Eles encontraram que 2 horas a 85 °C eram insuficientes para destruir todas as Salmonellas em pós de 4 e 7 % de umidade, enquanto 30 minutos eram suficientes em produtos com 25 % de umidade.

Os mesmos autores efetuaram testes com leite em pó desnatado e inoculado com Salmonella, aquecida em leite fluidizado. Os resultados obtidos permitem calcular os seguintes valores de D:

Quadro 4: Influência da umidade na resistência térmica

Teor de umidade % base úmida	D ₁₈₉	D ₂₁₀	D ₂₄₀	D ₃₀₀
4,0	5,25	9,50	3,38	5,12-7,87
7,0	4,37	4,24	3,78	-
10,0	4,07	1,87	3,6-5,78	-
15,0	1,49	1,75	1,8-2,59	1,1

2.4 Destruição de microorganismos durante a secagem spray

A constatação de que muitos produtos secados em spray poderiam ser portadores de microorganismos aumentou o interesse de alguns pesquisadores para descobrir o grau de destruição que poderia atingirse durante a secagem. Também no campo da produção de proteínas unicelulares foram efetuados alguns estudos.

Labuza et. al. (14) estudaram a produção de proteínas unicelulares com leveduras que eram secadas em spray. Utilizando alimentação com 10 % de sólidos e ar entrando a 180 ó 250 °C com saída entre 60 e 150 °C, obtiveram redução de 4 - 5 ciclos logarítmicos. Eles concluíram que a energia de ativação para a destruição de leveduras é menor durante a secagem spray e que além da temperatura poderiam existir outros fatores com efeitos letais, como as tensões desenvolvidas durante a atomização e o mesmo pro

cesso da secagem.

Peri e De Cesari (29) secaram suspensões de leveduras com ar entrando a 170 °C e saindo entre 70 - 110 °C. Eles também concluíram que a energia de ativação diminui, resultando uma maior resistência das células a temperatura. Contudo, acham que a umidade do produto maior ou menor que uma umidade crítica de 10 %, tem mais importância sobre a sobrevivência dos microorganismos que um incremento na temperatura de secagem ou uma variação na concentração microbiana.

LiCari e Potter (17) secaram leite desnatado concentrado a 40 % de sólidos, utilizando temperaturas de saída de 150, 200 e 250 °F. Os resultados obtidos demonstram distinta resistência em diferentes cepas de Salmonella e que a um incremento da temperatura de saída do ar corresponde menor sobrevivência dos microorganismos. O tamanho das partículas e a concentração inicial de salmonella não apresentaram efeito sensível sobre a sobrevivência nos intervalos estudados.

LiCari e Potter (18), em outra análise do mesmo trabalho, calcularam valores de D oscilantes entre 5,3 e 0,61 seg. para diferentes cepas e condições de secagem. Eles concluíram que a resistência à secagem manifestada pelas diferentes cepas não mantem relação estreita com a sua resistência em leite líquido e que Salmonella tennessee era a cepa mais resistente das quatro testadas.

Miller et. al. (26) secaram vários produtos alimentícios inoculados com distintas cepas de Salmonella e Escherichia coli. Os resultados mostram menor sobrevivência de microorganismos a menor concentração da alimentação do secador e quando há maior concentração de graxa no produto. Eles concluem que os fatores que influenciam a morte das células durante a secagem em spray são complexos e interrelacionados, e que a sobrevivência durante esta

operação é desconhecida dentro do problema total da contaminação de Salmonella em alimentos desidratados. Segundo eles, o industrial não pode ainda confiar na secagem em spray como eliminador de microorganismos, devendo por tanto, assegurar adequada pasteurização antes da secagem e evitar contaminação posterior do produto.

OBJETIVOS

O objetivo da presente tese é estudar, com o auxílio do computador, o tratamento térmico que sofrem as partículas durante a secagem em spray, e a influência das distintas variáveis nesse processo.

Finalmente, comparar-se-ão os resultados obtidos com da dos publicados na literatura.

ANALISES DO SISTEMA E SIMULAÇÃO

Considerando um secador spray operando em condições estacionárias com fluxos em correntes paralelas, o processo físico pode ser ilustrado da seguinte maneira:

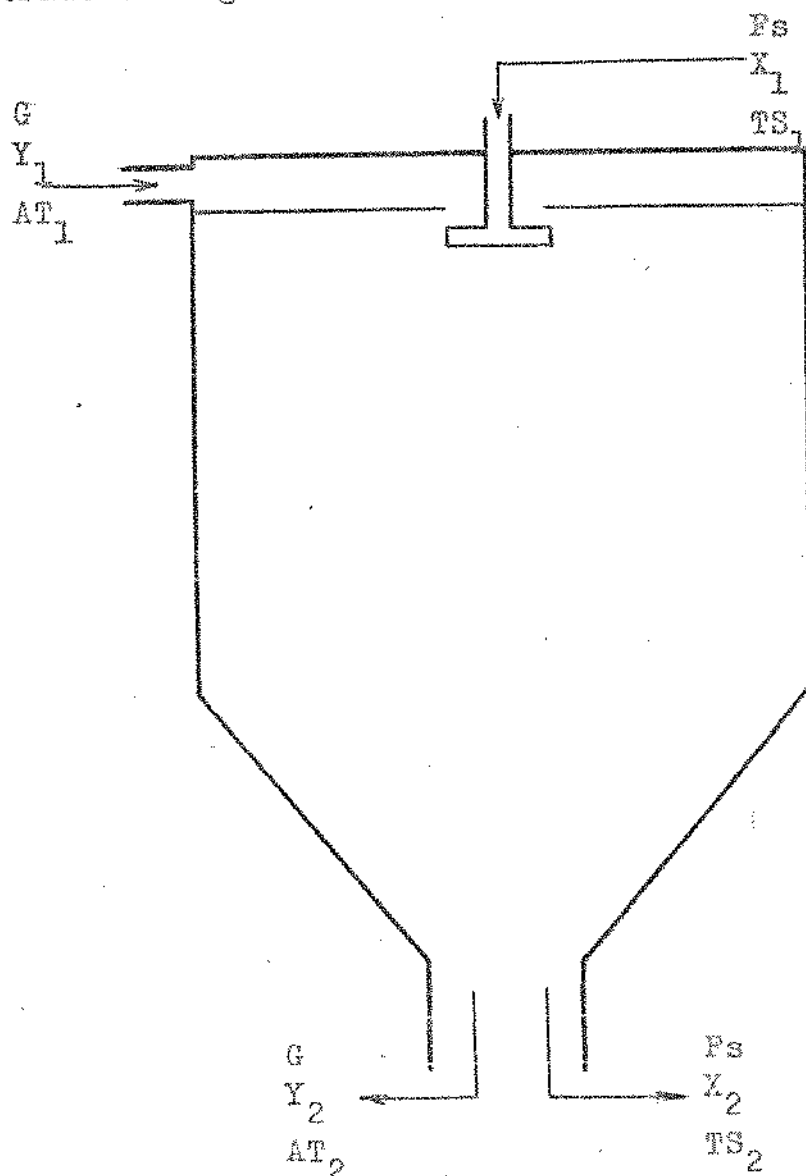


Figura 1: Secador Spray

Se considerarmos os diversos fenômenos compreendidos no sistema, o modelo matemático correspondente poderá ser ilustrado pela figura 2(10):

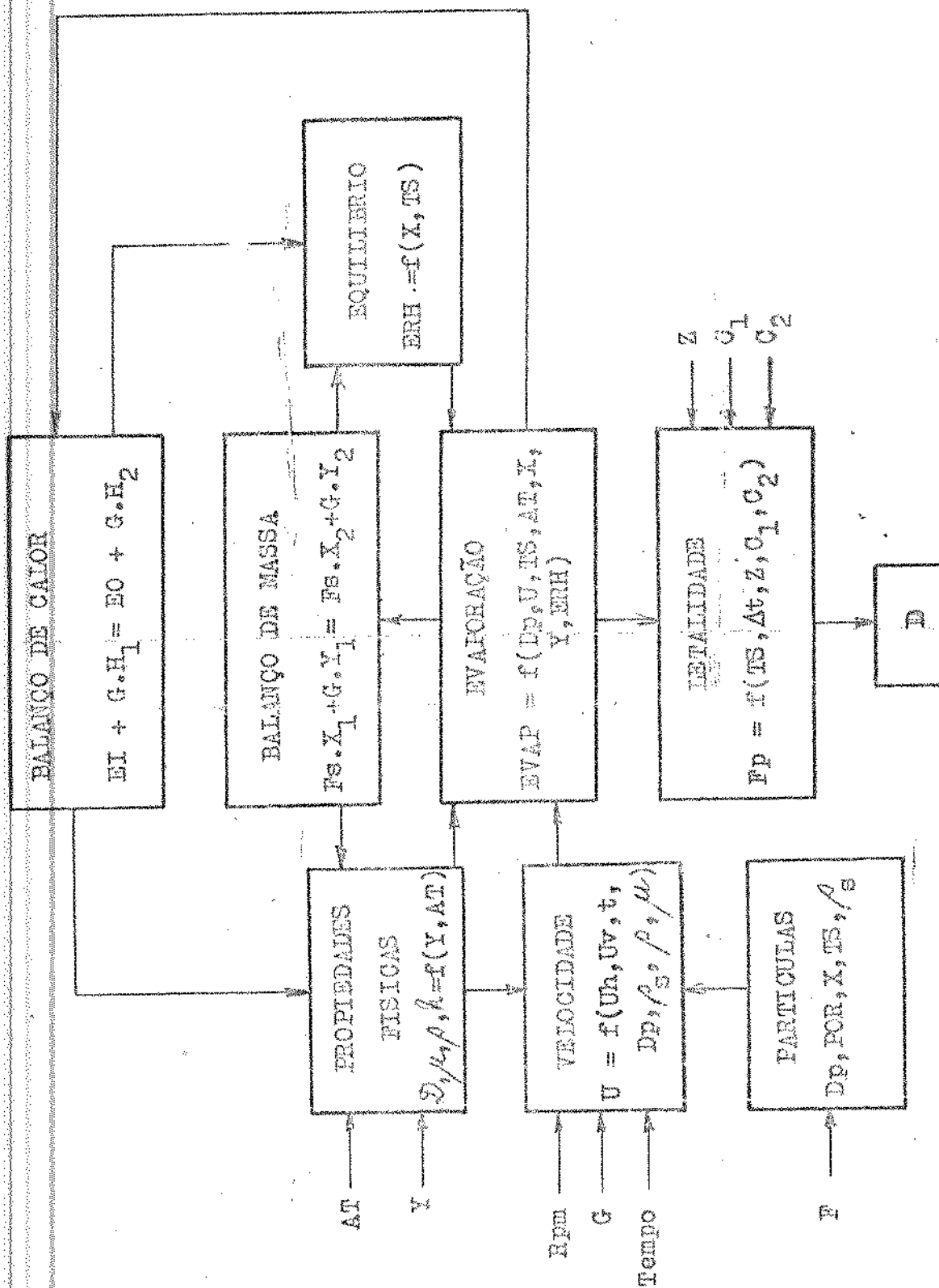


Figura 2: Modelo Matemático

A simulação do modelo matemático se realiza mediante a aplicação, em intervalos de tempo muito pequenos, das equações de transferência de quantidade de movimento, calor e massa a cada partícula, conjuntamente com balanços totais de matéria e energia no princípio e no fim de cada intervalo. As temperaturas calculadas para cada tamanho de partícula são então utilizadas para calcular o tratamento térmico.

1. Simulação do secador spray

A simulação do secador spray foi feita através do programa principal, quatro subrotinas e uma função, que passamos a descrever com detalhe:

1.1 Programa Principal

Foi escrito para trabalhar com 5 tamanhos de partículas, cuja importância percentual se conhece. Outros dados que precisam ser introduzidos são os seguintes: vazão, temperatura e umidade absoluta do ar que entra; vazão, temperatura, concentração e densidade da alimentação; raio do atomizador e sua velocidade em r.p.m.; diâmetro e altura do secador; precisando-se ainda selecionar um intervalo de tempo conveniente.

Se começa calculando o número de partículas que se formam por segundo, em cada tamanho, a partir da equação abaixo deduzida.

$$\frac{4\pi}{3} \left[\left(\frac{Dp(1)}{2} \right)^3 N(1) + \left(\frac{Dp(2)}{2} \right)^3 N(2) + \dots \right] = \frac{F}{\rho_s \cdot 3600}$$

$$\frac{4\pi}{3.8} N(1) \left[Dp(1)^3 + Dp(2)^3 \frac{N(2)}{N(1)} + \dots \right] = \frac{F}{\rho_s \cdot 3600}$$

$$\text{Chamando: } Z(I) = \frac{N(I)}{N(1)} Dp(I)^3 = \frac{POR(I)}{POR(1)} Dp(I)^3$$

$$ZZ = Z(1) + Z(2) + Z(3) + Z(4) + Z(5)$$

$$\text{Resulta: } N(1) = \frac{3 \cdot 8 \cdot F}{4 \cdot \pi \cdot \rho_s \cdot 3600 \cdot ZZ} = \frac{1,9098 \cdot F}{\rho_s \cdot 3600 \cdot ZZ}$$

$$N(I) = \frac{POR(I)}{POR(1)} N(1)$$

Em continuação se calcula o peso de água e de sólido que correspondem a cada tamanho de partícula, pelas equações:

$$WW(I) = N(I) \frac{4 \cdot \pi}{3 \cdot 8} Dp(I)^3 \cdot \rho_s \cdot \left(\frac{X}{1 + X} \right)$$

$$WS(I) = N(I) \cdot 0,5236 \cdot Dp(I)^3 \cdot \rho_s \cdot \left(1 - \frac{X}{1 + X} \right)$$

Calcula-se as entalpias da alimentação e do ar ao ingresso no secador:

$$EI = \sum WS(I) \cdot (0,36 + X(I) \cdot 1) \cdot TS(I)$$

$$H = (0,24 + 0,45 \cdot Y) \cdot AT + 1090 \cdot Y$$

Calcula-se as propriedades do ar pela subrotina PRO e depois para cada tamanho de partícula, a velocidade e a posição pela subrotina VELO e a temperatura, evaporação, teor de umidade e densidade pela subrotina SE. A subrotina TP calcula o tratamento tér-

mico baseada na temperatura e no tempo.

Calcula-se a entalpia do produto com as novas temperaturas e umidades:

$$EO = \sum WS(I) \cdot (0,36 + X(I) \cdot 1) \cdot TS(I)$$

A quantidade total de água evaporada:

$$EV = EVAP(1) + EVAP(2) + EVAP(3) + EVAP(4) + EVAP(5)$$

A subrotina BAL faz então, os balanços de massa e energia, de terminando as novas condições do ar, a saber: umidade absoluta e temperatura.

De acordo com a velocidade das partículas maiores ou o gradiente de temperatura do ar selecciona-se um novo intervalo de tempo. Se a temperatura das partículas maiores está muito perto da temperatura do ar, considera-se completada a secagem e o computador termina calculando o tratamento térmico durante a restante permanência no secador e a umidade de produto em base úmida.

O diagrama de blocos do programa principal está representado na figura 3.

1.2.1 Subrotina PRO

A subrotina PRO calcula as propriedades do ar que influenciam os fenômenos de transporte, e que são funções de umidade e temperatura. É chamada no começo de cada intervalo de tempo, calculando:

$$\mu = 1,91 \cdot 10^{-7} (AT + 460)^{0,667} ((1 + 1,005 \cdot Y) / (1 + 1,608 \cdot Y)) \text{ lb/pé.ses}$$

$$\rho = (1 + Y) / ((0,0252 + 0,0405 \cdot Y)(AT + 460)) \text{ lb/pé}^3$$

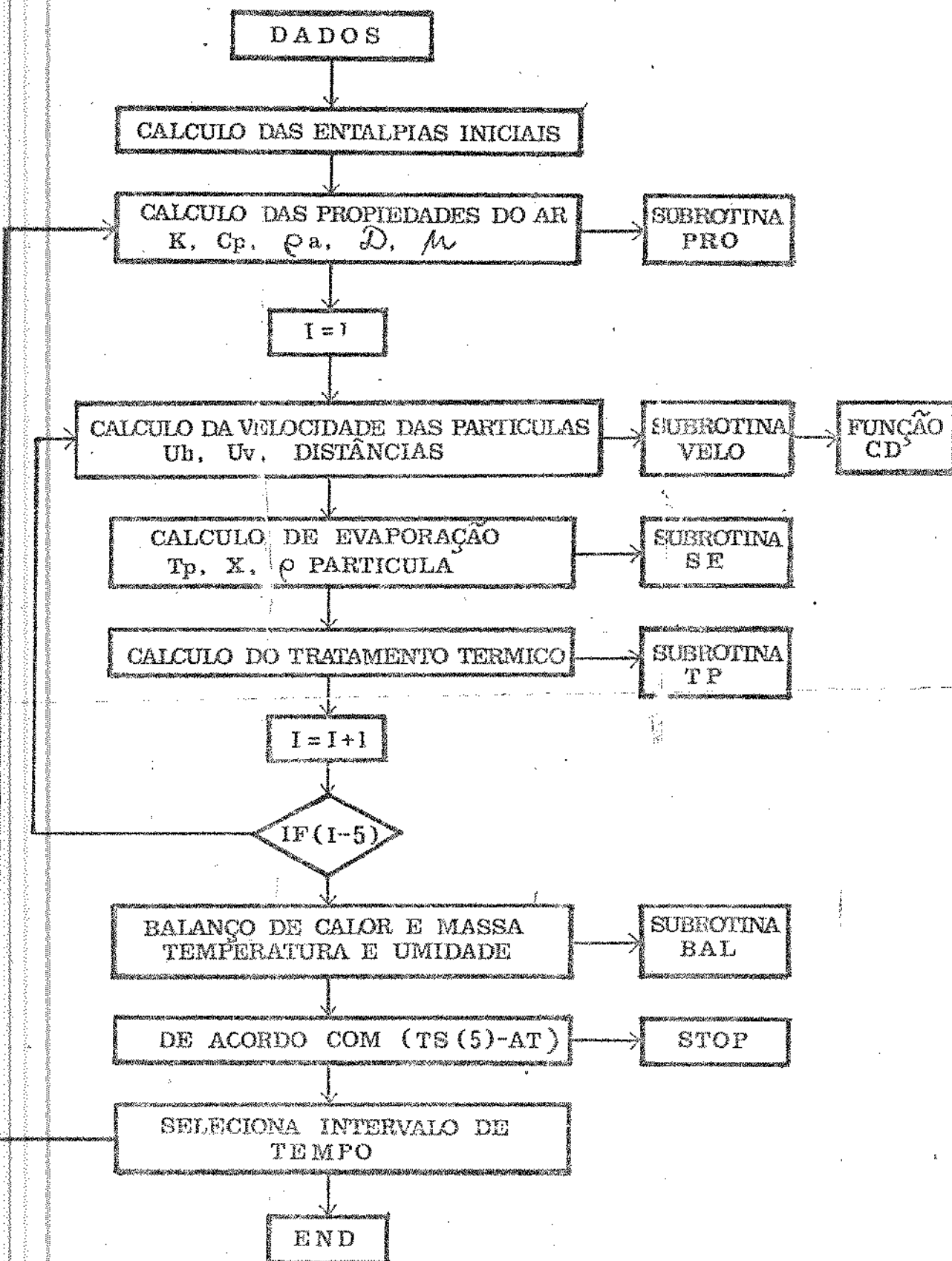


Fig. 3: DIAGRAMA DE FLUXO DO PROGRAMA PRINCIPAL

$$k = 2,64 \cdot 10^{-9} (AT + 460)^{1,15} ((1 + 1,4.Y)/(1 + 1,61.Y)) \text{ BTU/pé.s.}^{\circ}\text{F}$$

$$D = 4,5 \cdot 10^{-9} (AT + 460)^{1,75} \text{ pé/seg}$$

1.2.2 Subrotina VELO

A subrotina VELO calcula para cada tamanho de partícula a velocidade e a posição em função do tempo. Utiliza para isso as equações desenvolvidas por Lapple e Sheperd (15) e o método de cálculo proposto por eles.

$$\Delta U_h = \frac{-3 \cdot \rho \cdot C_D \cdot U \cdot U_h \cdot \Delta t}{4 \cdot \rho_s \cdot D_p}$$

$$\Delta U_v = \left[\frac{\varepsilon (\rho_s - \rho)}{\rho_s} - \frac{3 \cdot \rho \cdot C_D \cdot U \cdot U_v}{4 \cdot \rho_s \cdot D_p} \right] \Delta t$$

O fator de fricção C_D se calcula por um subprograma "func-tión" baseado nas siguientes equações:

$Re > 1000$	$C_D = 0,46$
$1000 > Re > 100$	$C_D = 0,26 + 12/Re^{0,6}$
$100 > Re > 3$	$C_D = 18,5 / Re^{0,6}$
$3 > Re > 0,5$	$C_D = (24 / Re) + Re$
$0,5 > Re$	$C_D = 24 / Re$

O movimento vertical é acelerado até atingir o máximo a velocidade terminal da partícula que é calculada pelas fórmulas:

Se $Re < 0,2$

$$V_t = D_p^2 \cdot 32,2 \cdot (\rho_s - \rho) / 18$$

Se $Re > 0,2$

$$Vt = 0,153.Dp^{1,14}.32,2^{0,71} \cdot (\rho_s - \rho) / (\rho^{0,29} \cdot \mu^{0,4})$$

A velocidade resultante da partícula se obtém somando vetorialmente as componentes horizontal e vertical

$$U = (U_h^2 + U_v^2)^{0,5}$$

A posição radial calcula-se pela fórmula:

$$R_a = R_a + (U_h + 0,5 \Delta U_h) \cdot \Delta t$$

A coordenada vertical:

$$A_l = A_l + (V_v + U_v + 0,5 \cdot \Delta U_v) \cdot \Delta t$$

Sendo V_v a velocidade do ar dentro do secador, deduzida de:

$$\frac{\pi \cdot DD^2}{4} V_v = \frac{G \cdot V_e}{3600}$$

$$V_v = 3,54 \cdot 10^{-4} \cdot G \cdot (0,0252 + 0,0405 \cdot Y) (AT + 460) / DD^2$$

1.2.3 Subrotina SE

A subrotina SE calcula a quantidade de água evaporada no intervalo de tempo, para cada tamanho de partícula.

Baseia-se no seguinte balanço de calor para uma partícula:

Calor que entra	=	Calor que sai com vapor	+	Calor utilizado em aquecer a gota	+	Calores de contração, etc
-----------------	---	-------------------------	---	-----------------------------------	---	---------------------------

O calor que entra nas gotas será:

$$Q_e(I) = N(I) \cdot \pi \cdot D_p(I)^2 \cdot h \cdot (AT - TS) \cdot \Delta t$$

o coeficiente pelicular de transferência de calor h calcula-se pela fórmula:

$$h = \frac{k}{D_p} (2 + 0,347 \cdot Re^{0,62} \cdot Pr^{0,31})$$

Para calcular o calor que sai das gotas devido a evaporação da água, utiliza-se a fórmula:

$$Q_s(I) = N(I) \cdot \pi \cdot D_p(I)^2 \cdot k_y \cdot (Y_S - Y) \cdot \lambda \cdot \Delta t$$

O coeficiente de transferência de massa é calculado por:

$$k_y = \frac{D}{D_p \cdot Ve} (2 + 0,347 \cdot Re^{0,62} \cdot Sc^{0,31})$$

Como o calor latente de vaporização λ é função da temperatura, este será calculado pela equação:

$$\lambda = 1080 - 0,612 (TS - 32)$$

A umidade na superfície da partícula Y_S acha-se relacionada com sua temperatura através das equações:

$$Y_S = 0,622 \frac{ERH \cdot p'}{1 - ERH \cdot p'}$$

$$p' = 0,068 \cdot \exp (16,62 (TS - 100)/(TS + 460))$$

$$ERH = \frac{X}{X + (TS/250)^4 \cdot 1,04} \exp ((-B \cdot X)/(X + E)^2)$$

O calor utilizado em aquecer a gota calcula-se pela fórmula:

$$Q_a(I) = N(I) \frac{4 \cdot \pi}{3 \cdot 8} D_p(I)^3 \cdot \rho_s \cdot C_p \cdot \Delta T_S$$

Assumiendo que os calores de cristalização e concentração são desprezíveis, busca-se por prova e êrro o valor da temperatura T_S que permite o cumprimento da igualdade da equação de balanço dentro de uma margem de êrro de 5 %. Com essa temperatura se calcula a quantidade de água evaporada, a densidade e o conteúdo de umidade.

Se uma partícula for completamente desidratada, assume-se que ela continuará trocando calor com o ar, comportando-se como uma esfera com resistência interna desprezível. Nesse caso, pode-se calcular a temperatura da gota pela equação (13):

$$T_S = A_T + (T_S - A_T) \exp \left(\frac{h \cdot 6 \cdot \Delta t}{0,36 \cdot \rho_s \cdot D_p} \right)$$

1.2.4 Subrotina BAL

Depois de ter calculado, para cada tamanho de gota, a quantidade de água evaporada, o programa principal chama a subrotina BAL para efetuar os balanços de massa e energia(30)

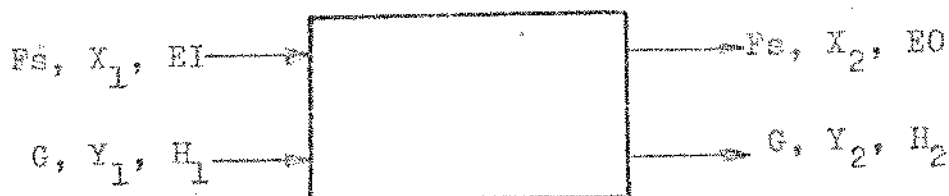


Figura 4: Balanços de massa e energia

Balanço de massa:

$$F_s \cdot X_1 + G \cdot Y_1 = F_s \cdot X_2 + G \cdot Y_2$$

$$Fs(X_1 - X_2) = EV = G(Y_2 - Y_1)$$

$$Y_2 = Y_1 + (EV / G)$$

Balanço de energia:

$$EI + G \cdot H_1 = EO + H_2 \cdot G$$

$$\text{Entalpia do ar: } H = (0,24 + 0,45 \cdot Y) \cdot AT + 1090 \cdot Y$$

$$AT = \frac{((EI - EO)/G) + H_1 - 1090 \cdot Y_2}{0,24 + 0,45 \cdot Y_2}$$

2. Tratamento térmico

2.1 Subrotina TP

A temperatura de cada gota varia durante a secagem e é calculada na subrotina SE, explicada anteriormente. A fim de reduzir o efeito dessas temperaturas para uma temperatura de referência que se atribuiu arbitrariamente a 212 °F, usa-se a equação:

$$F_p = 10^{((TS - 212)/Z)} \cdot \Delta t / 60$$

F_p é por tanto, um tempo de exposição (em minutos) a 212 °F que produz um tratamento térmico igual a um tempo de exposição Δt a temperatura TS.

2.2 Subrotina SD

Foi aplicada para estudar a sobrevivência de Salmonella.

Depois de conhecer o tempo de exposição a 212 °F de cada tamanho de partícula, calculase com a subrotina SD o valor de

D_{212} que permite obter no produto uma concentração de microorganismos no máximo 5 % diferente da reportada por Licari e Potter (17) em seu trabalho.

Isto deve ser realizado por prova e erro. Assume-se um valor de D_{212} e calcula-se para cada uma das 5 frações da alimentação a concentração residual de microorganismos, a partir da equação:

$$D_{212} \cdot \log \frac{C_1}{C_2(I)} = Fp(I)$$

$$C_2(I) = 10^{(\log C_1 - (Fp(I)/D_{212}))}$$

Conhecendo o peso seco de cada fração, $WS(I)$, calcula-se a concentração de microorganismos de produto total. Se ela resulta mais de 5 % diferente da reportada, assume-se outro valor de D_{212} e repete-se o cálculo.

3. Computação

As equações foram escritas em FORTRAN IV (27). Os programas, subprogramas e um exemplo de saída do computador se encontram no Apêndice.

A seleção de intervalos de tempo adequados foi sempre difícil. Em geral usava-se no começo do processo de cálculo, valores de 0,00005 seg., mas para partículas maiores os intervalos de tempo eram maiores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente estudo foram utilizados 5 tamanhos de partículas, com diferentes distribuições. Geralmente usaram-se partículas de: 4, 7, 10, 13 e 16 μ , que industrialmente seriam consideradas como finas já que habitualmente produzem-se partículas bem maiores; mas nos secadores de laboratório e planta piloto são comuns (08), (21).

O raio do disco atomizador foi suposto de 0,197 pés e sua velocidade de 24000 r.p.m.

A temperatura da alimentação do secador foi mantida constante em 110 °F e a densidade em 72 lb/pé³.

1. Perfis de temperatura

As figuras 5 e 6 representam as temperaturas das partículas e do ar durante o tempo de secagem, calculados para duas condições diferentes.

Pode-se ver que todas as partículas atingem em tempo muito curto uma temperatura em torno de 120 °F, correspondente à do bulbo úmido do ar, e a partir daí sua temperatura eleva-se à medida que prossegue a secagem. As partículas menores secam mais rapidamente que as maiores e de acordo com o modelo planteado, alcançadas as condições de umidade de equilíbrio, sua temperatura se eleva em seguida, para atingir a temperatura do ar. Os tempos de secagem calculados são da ordem de alguns milésimos de segundo, concordando com resultados obtidos por vários autores em condições similares (06), (23).

A temperatura do ar cai de início rapidamente devido à velo-

cidade de secagem elevada e à presença de partículas pequenas. Nos casos apresentados, em 20 % do tempo de secagem, a temperatura do ar cai em mais de 80 % do total.

2. Perfis de umidade

Nas figuras 7 e 8 encontram-se grafados os teores de umidade das partículas e do ar em função do tempo, para as mesmas condições de secagem que as utilizadas nos gráficos 5 e 6 apresentados anteriormente.

As partículas menores aparecem completamente secas em tempo muito curto enquanto que as maiores apresentam um teor final de umidade. O modelo não considera a possibilidade de reabsorção de água nos estágios finais da secagem (04).

3. Tratamento térmico durante a secagem

Em cada condição de funcionamento do secador que foi simulada, calculou-se o tratamento térmico para os seguintes valores de Z: 20, 40, 80, 200 y 300; para as quais correspondem energias de ativação calculadas no quadro 2.

3.1 Efeito da distribuição de tamanhos das partículas

Utilizou-se 5 distribuições diferentes que se indicam no quadro 5.

As distribuições 3, 4 e 5 são similares às obtidas por Licari e Potter, variando a pressão de atomização. Entretanto as distribuições 1 e 2 são a inversão das numeradas 4 e 5. Estas últimas apresentam a maior porcentagem de partículas grandes dentre as estudadas.

Quadro 5: Distribuição percentual das partículas

Distribuição Nº	Porcentagem				
	4	7	10	13	16
1	0,0	1,1	10,6	57,8	30,5
2	1,0	7,9	26,6	49,3	15,1
3	3,2	39,5	37,5	14,0	5,9
4	15,1	49,3	26,6	7,9	1,0
5	30,5	57,8	10,6	1,1	0,0

As letalidades em minutos a 212 °F, calculadas em cada caso, indicam-se no Quadro 6.

Observase que em todos os casos existem diferenças no tratamento térmico recebido pelas partículas durante a secagem, sendo este mais enérgico para as partículas menores. A importância dessa diferença depende do valor de Z, sendo maior para valores menores de Z. Para valores de Z maiores, o tratamento sofrido após a secagem, ou seja, durante o transporte até a saída do secador, é a fração mais importante.

A distribuição com maior quantidade de partículas pequenas parece mais conveniente, devido à rápida caída da temperatura do ar nas primeiras fases da secagem. Na prática pode não ser viável devido aos problemas de recuperação do produto, quando ele seja um pó fino demais(16), (19).

3.2 Efeito do tamanho das partículas

Simulou-se a secagem de partículas com diâmetros de 4, 7, 10, 13 e 16 μ e sprays integrados com partículas de tamanhos duplos, quadruplos, sextuplos, octuplos e decuplos dos primeiros.

todos êles com distribuição Nº 4 de quadro 5 e mantendo as de mais condições de secagem constantes. Os resultados obtidos são apresentados no quadro 7.

Observa-se que os sprays constituídos de gotas maiores, sofrem um tratamento térmico maior durante a secagem. Isto é por demorarem mais a secar, permanecendo mais tempo à temperaturas altas.

3.3 Efeito do teor de sólidos na alimentação

Mantendo constantes as temperaturas de entrada e saída e vazão do ar, variou-se a vazão da alimentação e o teor de sólidos da mesma, nos valores de 10, 20, 25, 30, 40 e 50 %. A distribuição de partículas foi em todos os casos a Nº 4 do quadro 5. As letalidades calculadas para temperaturas de saída de 250 e 175 °F são apresentadas nos quadros 8 e 9.

O menor teor de sólidos parece favorecer um maior tratamento térmico durante a secagem, a pesar das diferenças não serem muito grandes, sendo pouco significativas frente aos efeitos durante o transporte quando Z tem valores altos.

O efeito desta variável é difícil de determinar já que na prática ela pode afetar o desenvolvimento da secagem e modificar substancialmente os resultados aqui apresentados.

3.4 Efeito da temperatura

É lógico que a temperatura é um fator importante no tratamento térmico. O quadro 10 apresenta os resultados obtidos em duas simulações variando somente a temperatura de entrada do ar de 560 para 550 °F, como consequência, a temperatura de saída variou de 250 para 242,6 °F. Para valores de Z pequenos, a di-

ferença de tratamento térmico é muito significativa.

4. Sobrevivência de Salmonella durante a secagem em spray

A fim de estudar a sobrevivência de Salmonella na secagem em spray, foram simuladas no computador as condições de secagem e concentrações de microorganismos utilizadas por Licari e Potter (17). Eles efetuaram 36 testes e determinaram a influência da temperatura de saída do secador, da distribuição de tamanhos das partículas e do nível de contaminação na sobrevivência à secagem de quatro cepas de Salmonella, a saber: Typhimurium, Thompson, Tennessee e Kentucky.

No Quadro 11 são apresentadas as condições de secagem utilizadas na simulação, juntamente com a comparação dos resultados experimentais e os calculados pelo computador.

Com os valores de letalidade a 212 °F calculados nas condições de secagem e assumindo diferentes valores de Z, calculou-se o valor de D_{212} que produziu uma concentração de salmonella no pó seco no máximo 5 % diferente ao obtido por Licari e Potter. Os resultados obtidos são representados nas figuras 9, 10, 11 e 12.

Pode-se ver que ao aumentar os valores de Z, os valores de D_{212} manifestam tendência a convergir, situando-se entre valores de 0,0009 e 0,018 minutos a $Z = 200$ °F para Salmonella Typhimurium, Thompson e Kentucky. Salmonella Tennessee apresentou valores de D_{212} entre 0,036 e 0,044 minutos a $Z = 200$ °F. Devido a escassez de dados e imprecisão dos resultados, não se considerou conveniente a continuação dos cálculos para valores de Z maiores de 200 °F; a pesar de algumas curvas apresentarem

teniência de convergir nesse valor.

Como foi calculado no quadro 2, a um valor de $Z = 200$ °F corresponderia uma energia de ativação para a destruição de microorganismos de 5,74 Kcal/mol. Peri e De Cesari (29) determinaram que para secagem em spray de Saccharomyces Cerevisiae essa energia de ativação variaria bruscamente para unidades da ordem de 10 %, calculando valores de 1,05 e 2,71 Kcal/mol para dois casos com unidades inferiores a esse valor crítico, e de 14,2 e 21,7 Kcal/mol para unidades maiores.

4.1 Límite de confiança dos valores de D

Pode-se esperar que os valores de D e Z estejam interrelacionados, dependendo da resistência térmica do microorganismo. Todos os dados publicados na literatura tem sido provavelmente obtidos sem controlar todos os fatores que podem afetar o processo, e os valores calculados indiretamente.

Baseados na simulação do modelo proposto e utilizando as condições de trabalho de Licari e Potter, a saber: distribuição nº 4, temperatura de saída 175 °F e concentração da alimentação de 40 % de sólidos, a variação de D_{212} com Z para várias espécies se apresentam no quadro 12.

Utilizou-se os valores do quadro 12 e a teoria das pequenas amostras, com 95 % de probabilidade $D_{212} = 0,0143 \pm 0,0018$ para Salmonella Typhimurium, Thompson e Kentucky a $Z = 200$ °F.

Quadro 6: Efeito da distribuição de tamanhos das partículas

Equivalência em minutos a 212°F

Condições iniciais: AT = 330 °F

Y = 0,017 lb água/lb ar seco

G = 300 lb/hr

F = 18,2 lb/hr

X = 1,5 lb água/lb sólido seco

Temperatura de saída do ar = 175 °F

Z = 20

	Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4	Nº 5
Dp(1)	0,2506	0,1591	0,0473	0,0156	0,0022
Dp(2)	0,0320	0,0059	0,0009	0,0002	0,0000
Dp(3)	0,0003	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000
Dp(4)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Dp(5)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Transporte: 0,0008

Z = 40

	Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4	Nº 5
Dp(1)	0,0031	0,0023	0,0012	0,0007	0,0003
Dp(2)	0,0012	0,0006	0,0003	0,0002	0,0001
Dp(3)	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001
Dp(4)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Dp(5)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Transporte: 0,0064

Quadro 6: continuação

Z = 80

	Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4	Nº 5
Dp(1)	0,0007	0,0006	0,0005	0,0004	0,0003
Dp(2)	0,0004	0,0004	0,0003	0,0003	0,0002
Dp(3)	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Dp(4)	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Dp(5)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Transporte: 0,0180

Z = 200

	Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4	Nº 5
Dp(1)	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
Dp(2)	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
Dp(3)	0,0003	0,0003	0,0004	0,0003	0,0004
Dp(4)	0,0002	0,0002	0,0002	0,0003	0,0003
Dp(5)	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002

Transporte: 0,0330

Z = 300

	Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4	Nº 5
Dp(1)	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0005
Dp(2)	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0005
Dp(3)	0,0003	0,0003	0,0004	0,0004	0,0004
Dp(4)	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
Dp(5)	0,0002	0,0002	0,0003	0,0003	0,0003

Transporte: 0,0377

Quadro 7: Efeito do tamanho das partículas

Equivalência em minutos a 212 °F

Condições iniciais: AT = 330 °F

Y = 0,017 lb água/lb ar seco

G = 300 lb/hr

F = 18,2 lb/hr

X = 1,5 lb água/lb sólido seco

Distribuição Nº 4 do quadro 5

Temperatura de saída do ar = 175 °F

Z = 20

	1	x2	x4	x6	x8	x10
Dp(1)	0,0156	0,0500	0,1900	0,7500	1,2507	2,7858
Dp(2)	0,0002	0,0005	0,0014	0,0055	0,0080	0,0139
Dp(3)	0,0000	0,0000	0,0001	0,0003	0,0006	0,0008
Dp(4)	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001	0,0002	0,0003
Dp(5)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Transporte: 0,0008

Z = 40

	1	x2	x4	x6	x8	x10
Dp(1)	0,0007	0,0025	0,0095	0,0311	0,0647	0,0769
Dp(2)	0,0002	0,0006	0,0019	0,0048	0,0075	0,0123
Dp(3)	0,0001	0,0003	0,0009	0,0018	0,0035	0,0046
Dp(4)	0,0000	0,0001	0,0005	0,0010	0,0017	0,0023
Dp(5)	0,0000	0,0000	0,0001	0,0002	0,0004	0,0005

Transporte: 0,0064

Quadro 7: Continuação

Z = 80

	1	x2	x4	x6	x8	x10
Dp(1)	0,0004	0,0014	0,0051	0,0118	0,0215	0,0300
Dp(2)	0,0003	0,0010	0,0033	0,0073	0,0122	0,0182
Dp(3)	0,0002	0,0007	0,0023	0,0047	0,0087	0,0120
Dp(4)	0,0001	0,0005	0,0015	0,0033	0,0055	0,0078
Dp(5)	0,0000	0,0002	0,0007	0,0015	0,0026	0,0037

Transporte: 0,0180

Z = 200

	1	x2	x4	x6	x8	x10
Dp(1)	0,0004	0,0016	0,0059	0,0125	0,0216	0,0310
Dp(2)	0,0004	0,0015	0,0052	0,0110	0,0187	0,0272
Dp(3)	0,0003	0,0013	0,0045	0,0093	0,0164	0,0230
Dp(4)	0,0003	0,0011	0,0037	0,0078	0,0132	0,0188
Dp(5)	0,0002	0,0008	0,0029	0,0059	0,0100	0,0143

Transporte: 0,0330

Quadro 8: Efeito do conteúdo de sólidos

Equivalência em minutos a 212 °F

Condições iniciais: AT = 560 °F

Y = 0,026 lb água/lb ar seco

G = 155 lb/hr

Distribuição Nº 4 do quadro 5

Temperatura de saída do ar = 250 - 251 °F

Z = 20

	10%	20%	25%	30%	40%	50%
Dp(1)	21×10^6	7×10^6	73×10^6	44×10^6	12×10^6	2×10^6
Dp(2)	247,0000	83,2235	54,3464	30,0072	24,9140	19,8776
Dp(3)	0,1953	0,1600	0,1160	0,0763	0,0602	0,0406
Dp(4)	0,0224	0,0174	0,0156	0,0135	0,0129	0,0131
Dp(5)	0,0030	0,0023	0,0027	0,0028	0,0029	0,0033

Transporte: 4,0000

Z = 40

	10%	20%	25%	30%	40%	50%
Dp(1)	13,6385	7,7026	21,0802	15,9520	8,5224	3,3090
Dp(2)	0,0723	0,0418	0,0338	0,0255	0,0439	0,0188
Dp(3)	0,0057	0,0048	0,0042	0,0034	0,0030	0,0028
Dp(4)	0,0021	0,0017	0,0016	0,0014	0,0013	0,0015
Dp(5)	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0005

Transporte: 0,4469

Quadro 8: continuação

$Z = 80$

	10%	20%	25%	30%	40%	50%
Dp(1)	0,0149	0,0112	0,0169	0,0145	0,0108	0,0068
Dp(2)	0,0026	0,0020	0,0018	0,0016	0,0017	0,0013
Dp(3)	0,0012	0,0011	0,0010	0,0008	0,0008	0,0008
Dp(4)	0,0007	0,0006	0,0005	0,0005	0,0004	0,0005
Dp(5)	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002

Transporte: 0,1500

$Z = 200$

	10%	20%	25%	30%	40%	50%
Dp(1)	0,0008	0,0008	0,0008	0,0007	0,0006	0,0006
Dp(2)	0,0007	0,0006	0,0006	0,0005	0,0005	0,0005
Dp(3)	0,0005	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004	0,0004
Dp(4)	0,0004	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
Dp(5)	0,0003	0,0002	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002

Transporte: 0,0780

$Z = 300$

	10%	20%	25%	30%	40%	50%
Dp(1)	0,0006	0,0005	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004
Dp(2)	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
Dp(3)	0,0005	0,0004	0,0004	0,0003	0,0003	0,0003
Dp(4)	0,0004	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
Dp(5)	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002

Transporte: 0,0672

Quadro 9: Efeito do conteúdo de sólidos

Equivalência em minutos a 212 °F

Condições iniciais: AT = 330 °F

Y = 0,017 lb água/lb ar seco

G = 300 lb/hr

Distribuição Nº 4 do quadro 5

Temperatura de saída do ar = 175 °F

Z = 20

	10%	20%	25%	30%	40%	50%
Dp(1)	0,0974	0,0619	0,0471	0,0338	0,0156	0,0086
Dp(2)	0,0004	0,0003	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002
Dp(3)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Dp(4)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Dp(5)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Transporte: 0,0008

Z = 40

	10%	20%	25%	30%	40%	50%
Dp(1)	0,0018	0,0014	0,0012	0,0010	0,0007	0,0004
Dp(2)	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0001
Dp(3)	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Dp(4)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Dp(5)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Transporte: 0,0064

Quadro 9: continuação

$Z = 80$

	10%	20%	25%	30%	40%	50%
Dp(1)	0,0006	0,0006	0,0005	0,0005	0,0004	0,0003
Dp(2)	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002
Dp(3)	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Dp(4)	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Dp(5)	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Transporte: 0,0180

$Z = 200$

	10%	20%	25%	30%	40%	50%
Dp(1)	0,0006	0,0005	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004
Dp(2)	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004	0,0004	0,0003
Dp(3)	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0003	0,0003
Dp(4)	0,0004	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002
Dp(5)	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002

Transporte: 0,0330

$Z = 300$

	10%	20%	25%	30%	40%	50%
Dp(1)	0,0006	0,0006	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004
Dp(2)	0,0006	0,0005	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004
Dp(3)	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
Dp(4)	0,0005	0,0004	0,0004	0,0004	0,0003	0,0003
Dp(5)	0,0004	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003

Transporte: 0,0377

Quadro 10: Efeito da temperatura

Equivalência em minutos a 212 °F

Condições iniciais: $Y = 0,026$ lb água/lb ar seco

$G = 155$ lb/hr

$X = 1,5$ lb água/lb sólido seco

$F = 18,2$ lb/hr

Distribuição Nº 4 do quadro 5

Temperatura de entrada do ar = 560 °F

Temperatura de saída do ar = 250 °F

	$Z = 80$	$Z = 200$
Dp(1)	0,0108	0,0006
Dp(2)	0,0017	0,0005
Dp(3)	0,0008	0,0004
Dp(4)	0,0004	0,0003
Dp(5)	0,0001	0,0002
Transporte:	0,1500	0,0780

Temperatura de entrada do ar = 550 °F

Temperatura de saída do ar = 242,6 °F

	$Z = 80$	$Z = 200$
Dp(1)	0,0104	0,0006
Dp(2)	0,0012	0,0004
Dp(3)	0,0007	0,0004
Dp(4)	0,0003	0,0003
Dp(5)	0,0001	0,0001
Transporte:	0,1209	0,0711

Quadro 11: Comparação de valores experimentais e calculados

Temperatura do ar °F			Teor de umidade		G	Y
Entrada	Saída	Saída cal.	Experim.	Calculado		
<u>Salmonella Typhimurium</u>						
270	150	151,25	4,5	3,88	380	0,021
350	200	200,54	3,0	2,61	313	0,024
440	250	251,34	2,5	2,43	256	0,025
330	175	175,04	1,8	2,94	300	0,017
340	175	174,92	2,1	2,70	280	0,021
330	175	175,01	2,2	2,63	300	0,018
<u>Salmonella Thompson</u>						
280	150	150,96	3,6	3,73	350	0,021
365	200	200,25	2,4	2,56	284	0,024
460	250	249,72	1,7	1,72	230	0,026
330	175	175,04	2,8	2,94	300	0,017
340	175	174,92	3,1	2,70	280	0,021
330	175	175,01	2,8	2,63	300	0,018
<u>Salmonella Tennessee</u>						
270	150	151,25	3,4	3,88	380	0,021
380	200	199,67	2,7	3,02	260	0,021
530	250	250,28	2,1	2,66	172	0,026
330	175	175,04	2,9	2,94	300	0,017
340	175	174,92	3,3	2,70	280	0,021
325	175	176,07	3,7	3,53	310	0,019

Quadro 11: Continuação

Temperatura do ar °F			Teor de umidade		G	Y
Entrada	Saída	Saída cal.	Experim.	Calculado		
<u>Salmonella Kentucky</u>						
290	150	151,04	2,6	3,46	328	0,017
380	200	199,67	2,5	3,02	260	0,021
560	250	250,01	2,3	2,85	155	0,026
330	175	175,04	3,0	2,94	300	0,017
340	175	174,92	3,4	2,70	280	0,021
325	175	176,07	3,7	3,53	310	0,019
340	175	174,92	2,6	2,70	280	0,021

Figura 12: Variação de D_{212} com Z

Distribuição Nº 4 do quadro 5

X = 1,5 lb água/lb sólido seco

Temperatura de saída: 175 °F

Z = 80

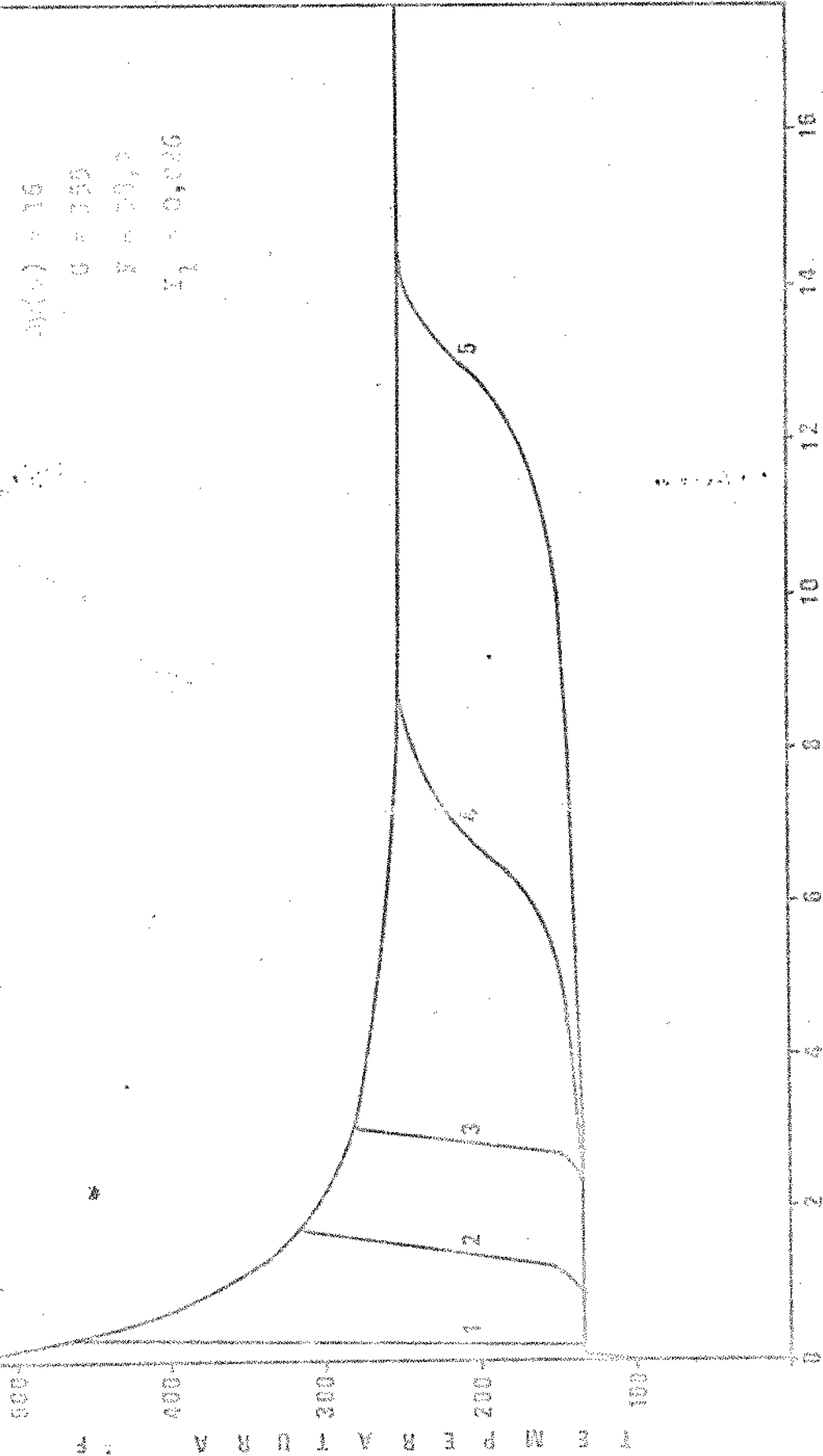
	D_{212}	S
Salmonella Typhimurium	0,0057	0,0011
Salmonella Thompson	0,0084	0,0015
Salmonella Kentucky	0,0081	0,0004
Salmonella Tennessee	0,021	0,0007

Z = 200

	D_{212}	S
Salmonella Typhimurium	0,0111	0,0018
Salmonella Thompson	0,0160	0,0043
Salmonella Kentucky	0,0156	0,0008
Salmonella Tennessee	0,0397	0,0017

1. The only a...
 2. The only a...
 3. The only a...

1. The only a...
 2. The only a...
 3. The only a...
 4. The only a...
 5. The only a...



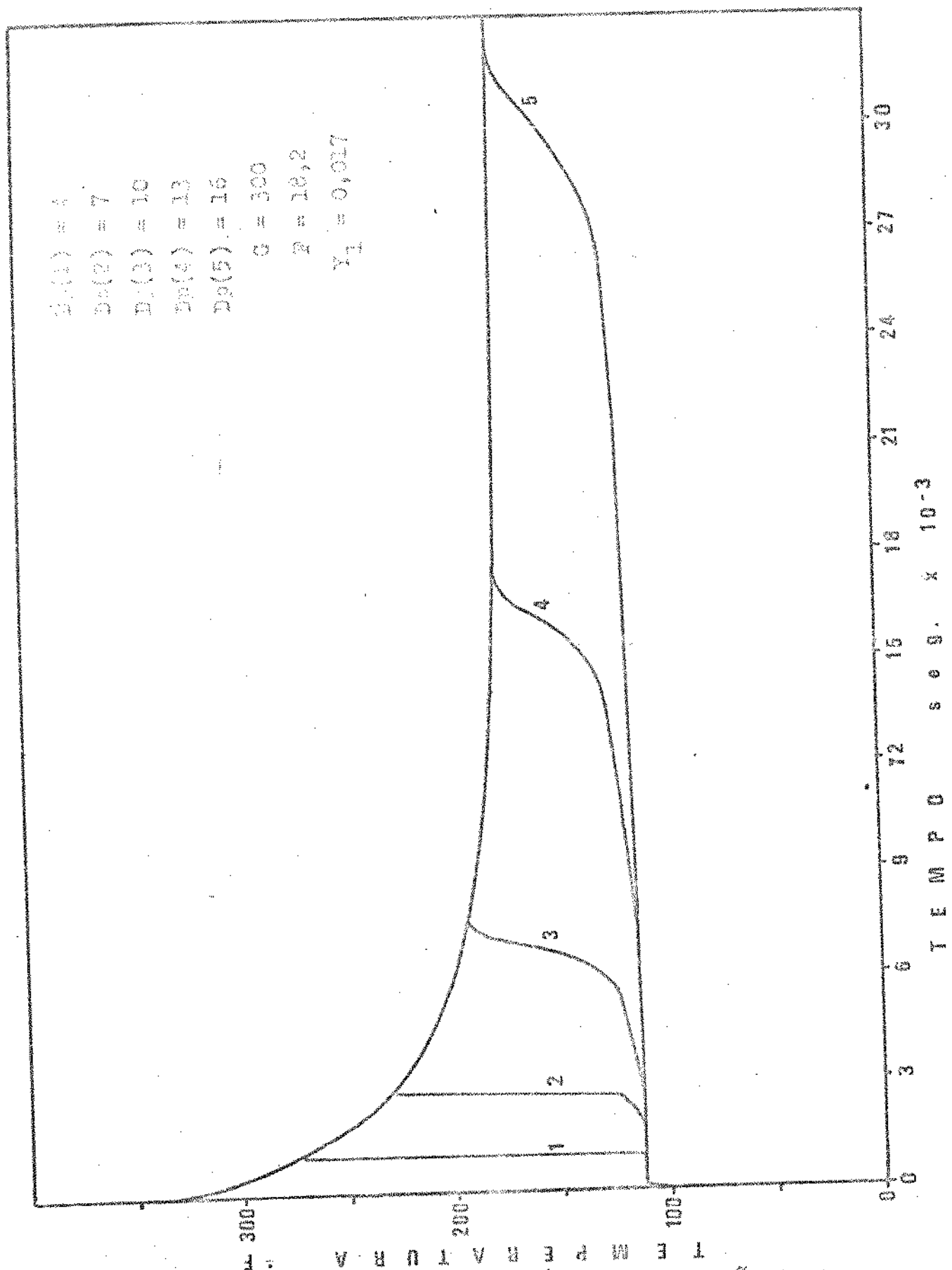
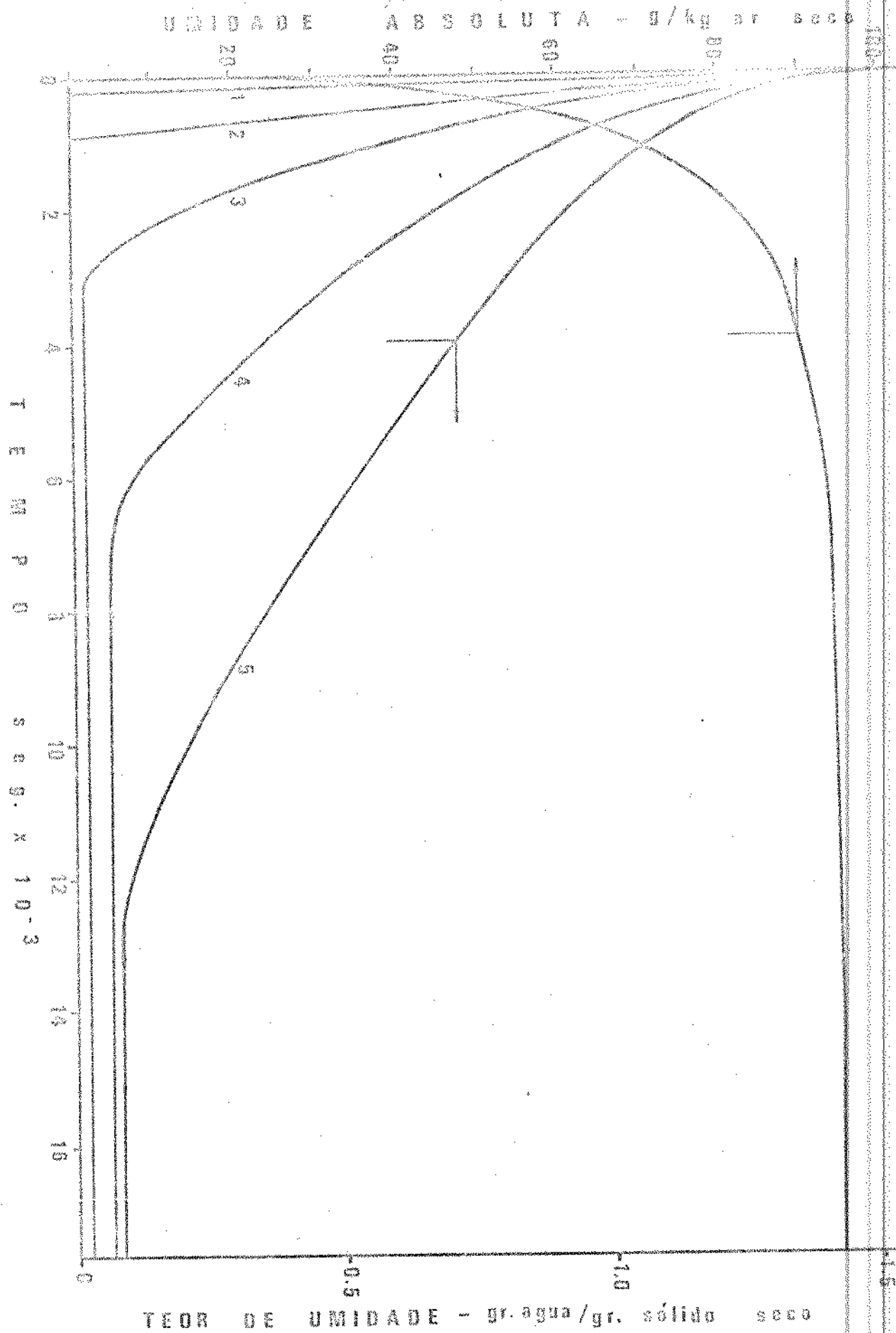


Figura 6: Temperatura do ar e das partículas em função de tempo. Ar entrando a 330 °F.



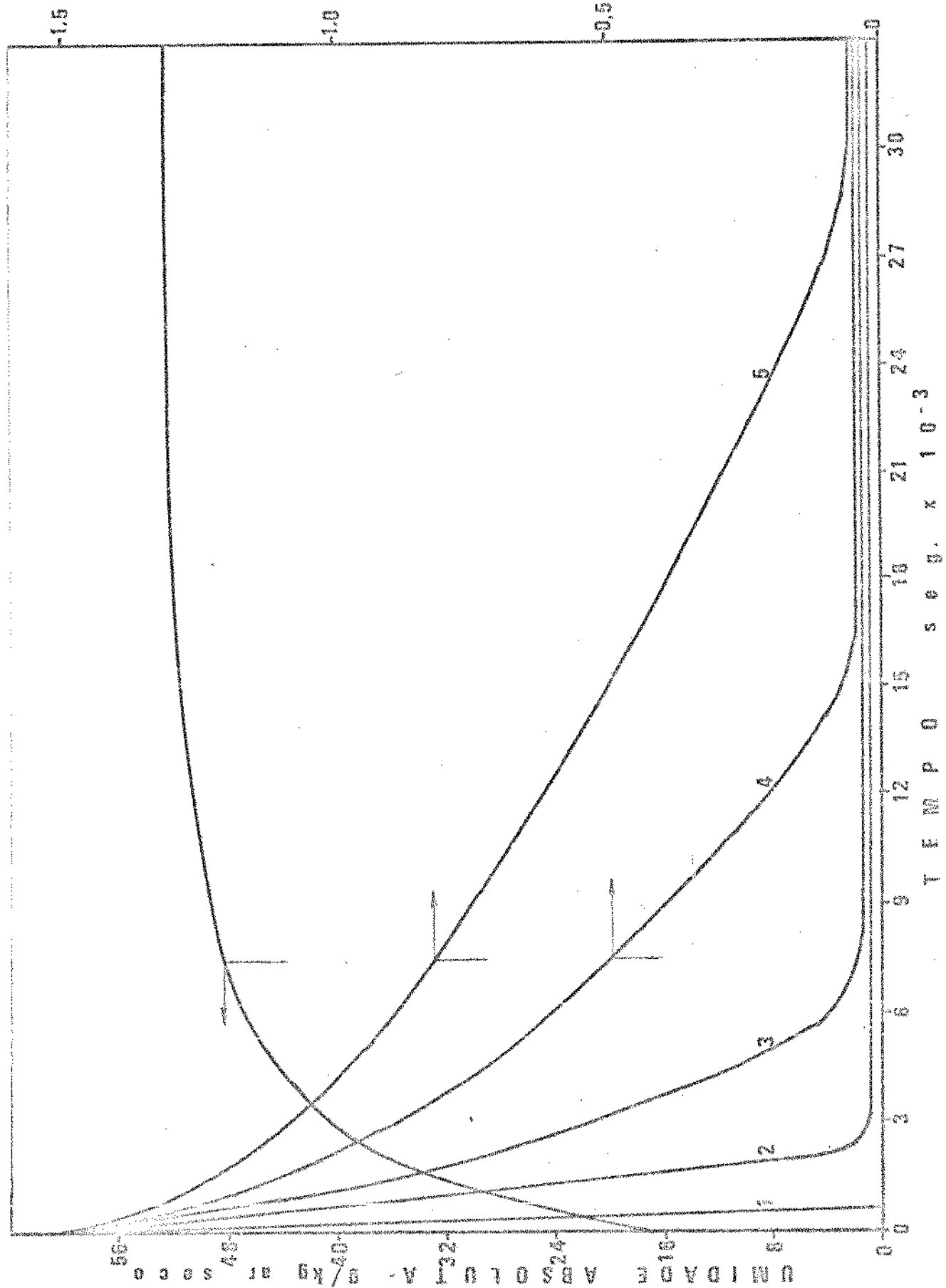


figura 8: Umidade do ar e das partículas em função do tempo.

D

0,1

0.01

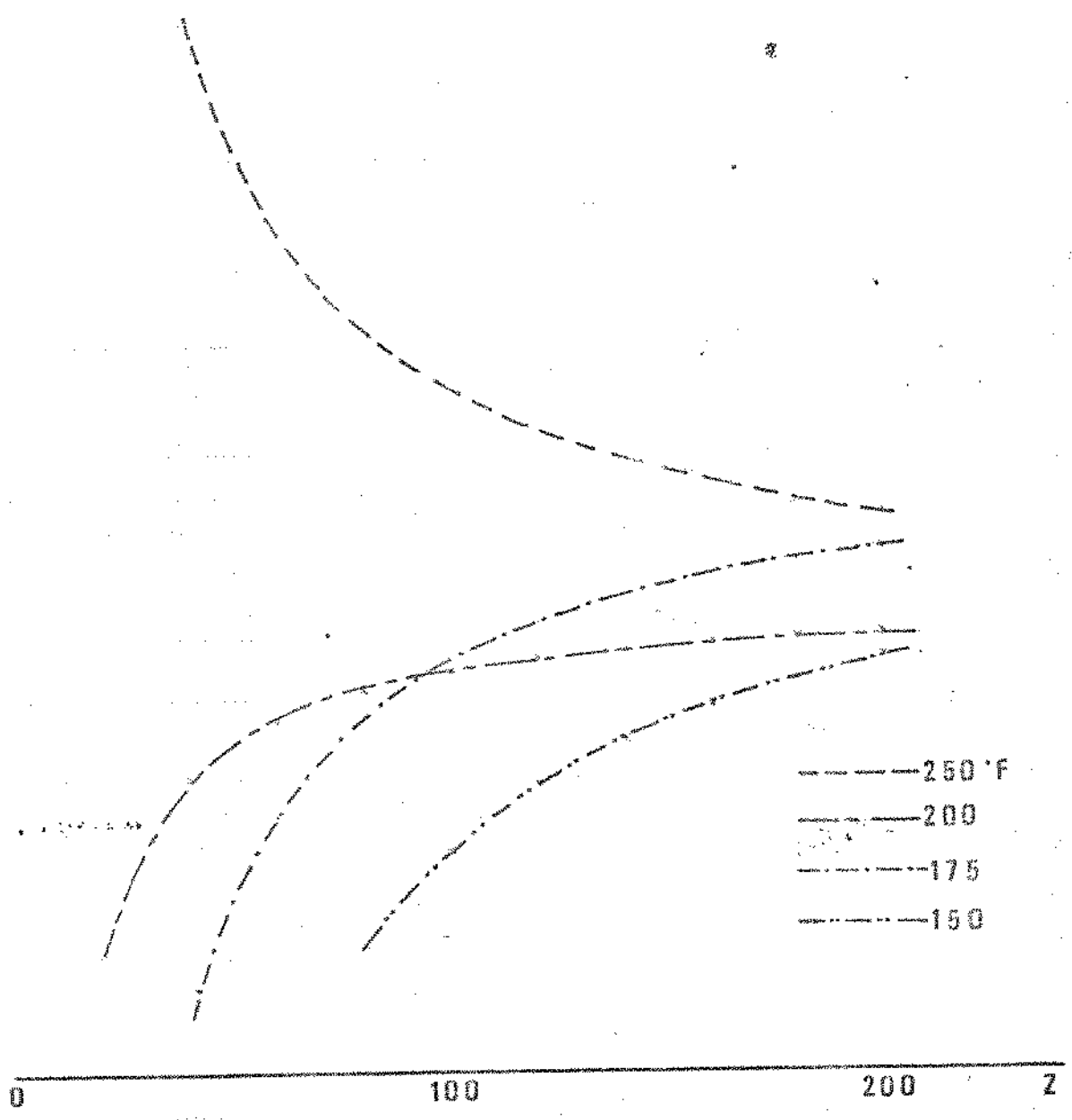


Figura 9: Diagrama D vs. Z para Salmonella Typhimurium

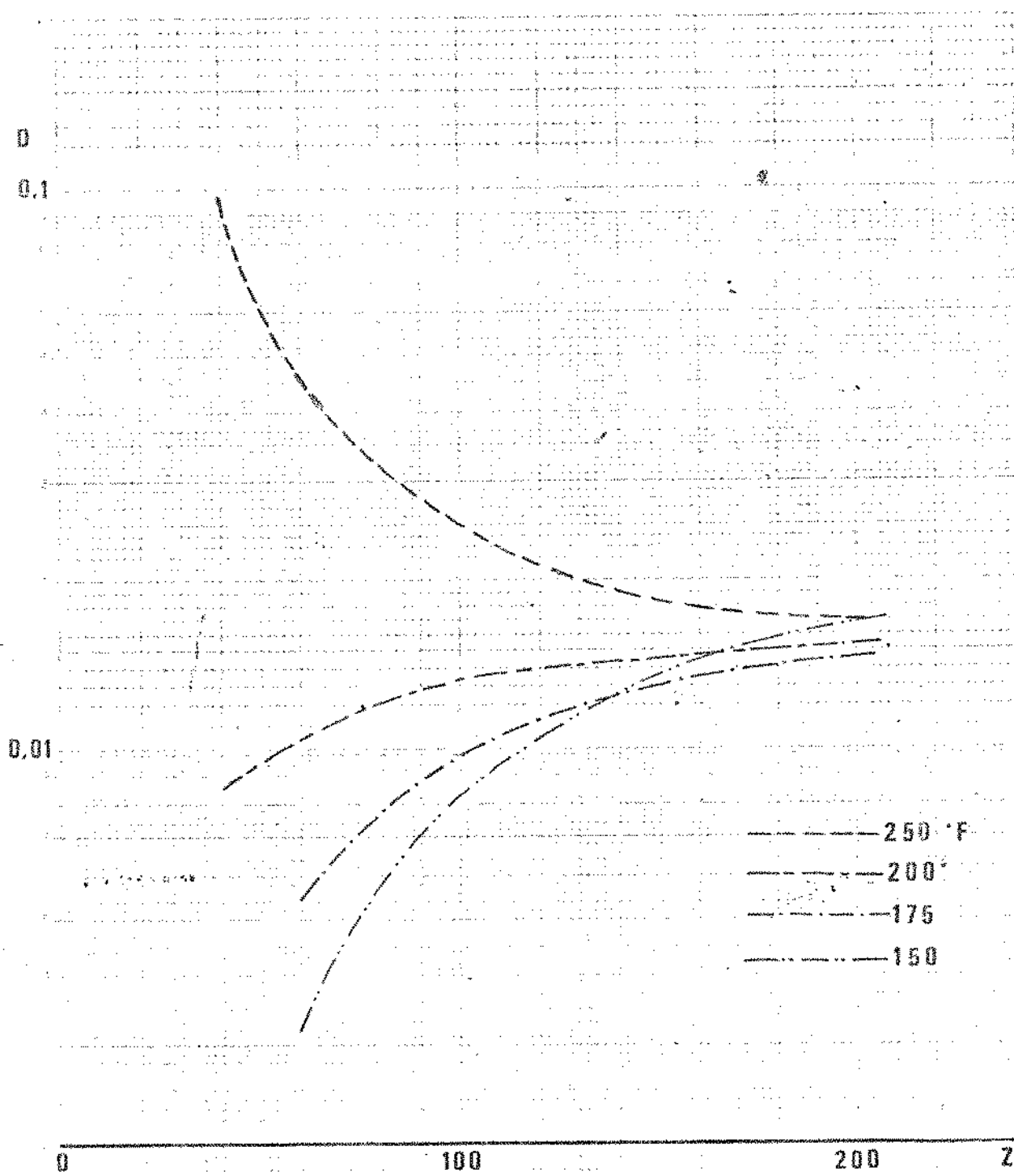


Figura 10: Diagrama Dvs. Z para Salmonella Kentucky

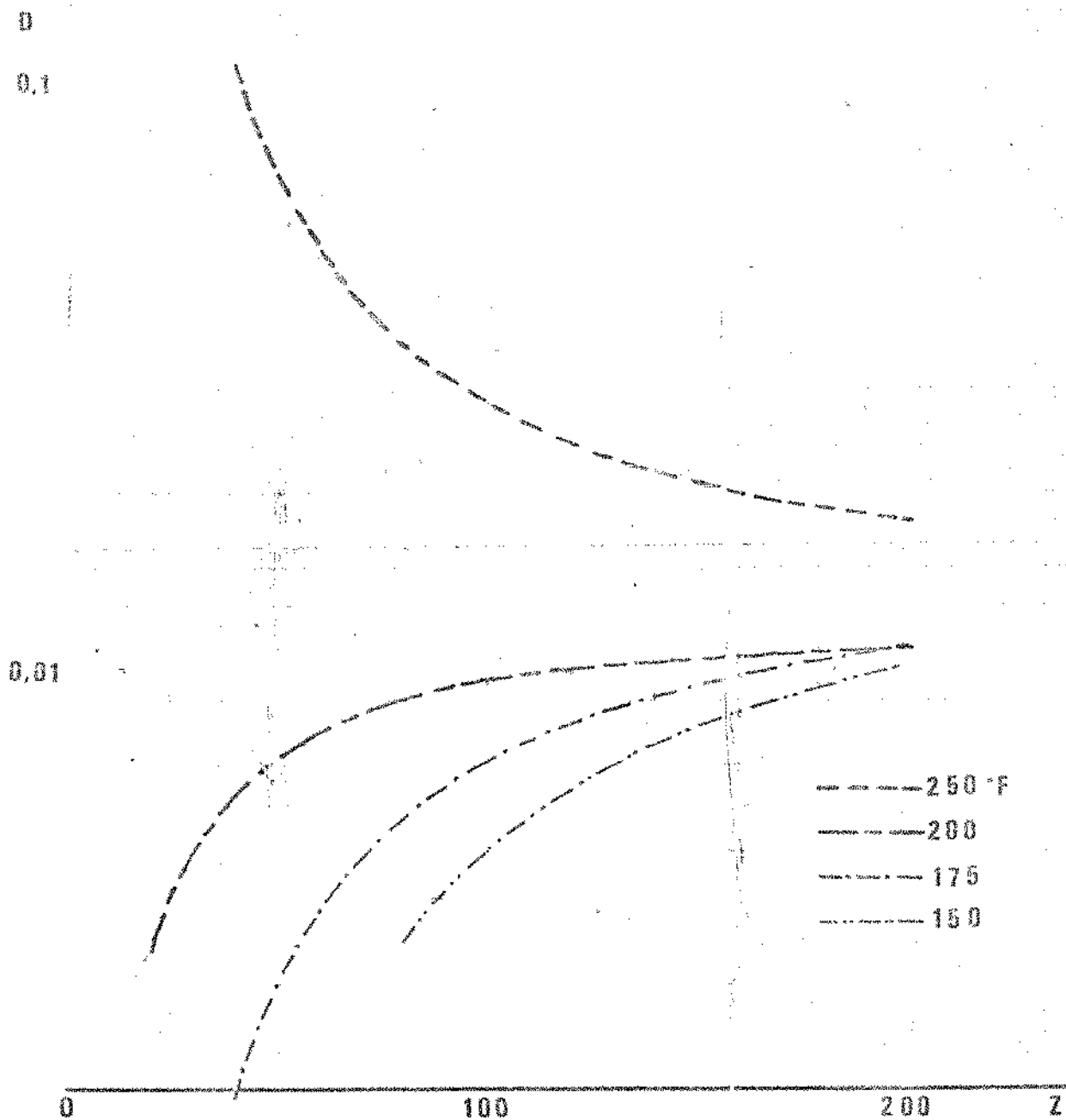


Figura 11: Diagrama D vs. Z para Salmonella Thompson

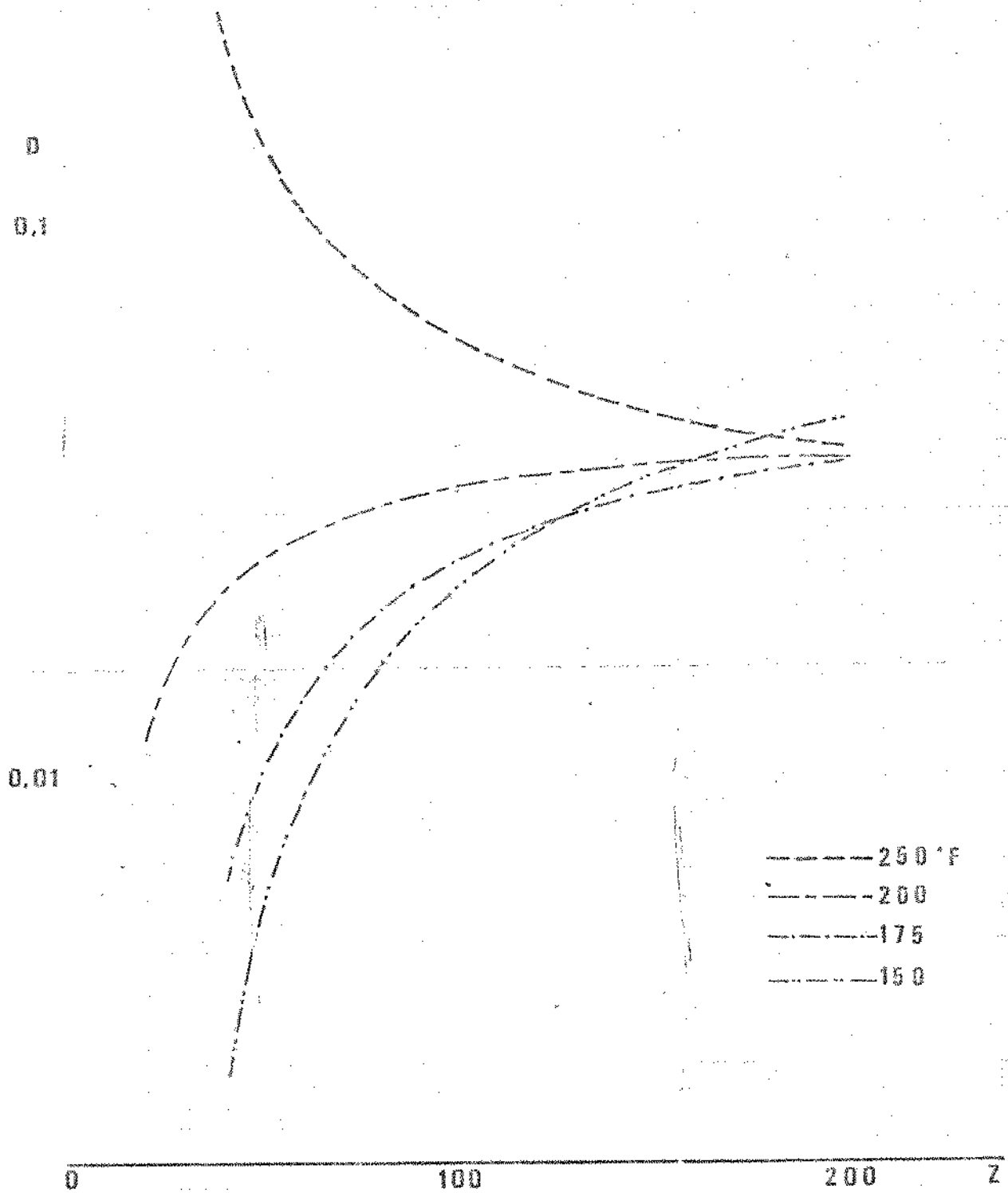


Figura 12: Diagrama D vs. Z para Salmonella Tennessee

CONCLUSÕES

Do trabalho efetuado e dos resultados obtidos pode-se tirar as seguintes conclusões:

- 1) O tratamento térmico em secador spray poderia ser dividido em duas partes:
 - a) Durante a secagem, com um tempo muito curto e diferente para cada partícula.
 - b) Durante o transporte até a saída do secador, igual para todas as partículas.
- 2) O tratamento térmico durante a secagem é influenciado por:
 - a) O valor de Z ou da energia de ativação da reação, é mais importante quando Z tem valores pequenos.
 - b) O tamanho das partículas, aumentando para partículas maiores.
 - c) Distribuição de tamanhos, maior quantidade de partículas pequenas diminui o tratamento térmico.
 - d) Temperatura atingida pela partícula durante a secagem e o tempo de secagem.
- 3) O tratamento térmico durante o transporte é influenciado por:
 - a) Valor de Z e da energia de ativação da reação, mais importante quando Z tem valores altos.
 - b) Temperatura de saída do secador.
 - c) Tempo de permanência no secador.

SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

As seguintes sugestões podem ser feitas:

- 1) São necessários mais estudos sôbre secagem de gotas, unidade de equilíbrio e comportamento de secadores spray.
- 2) O tratamento térmico durante a secagem em spray deveria ser estudado em equipamentos de laboratório com comportamento mais ideal, determinando concentrações do componente em estudo para diferentes teores de unidade e tempos de residência.
- 3) Deverá ser controlada rigorosamente a temperatura de saída do produto e o resfriamento imediato.

REFERÊNCIAS

01. Banwart, G.J. e J.C. Ayres. 1956. The effect of high Temperature storage on the content of Salmonella and on the functional properties of dried egg white. Food Technology. 10. 68 - 73.
02. Barrile, J.C. e J. Frank Cone. 1970. Effect of added moisture on the heat resistance of Salmonella anatum in milk chocolate. Appl. Microbiol. 19. 177 - 178.
03. Blakebrough, N. 1968. Biochemical and Biological Engineering Science - Volume 2. Academic Press.
04. Coulter, S.T. 1955. Evaporation of water from milk by Spray Drying. Journal Of Dairy Science. 38. 1180 - 1184.
05. Charlesworth, D.H. e W.R. Marshall Jr. 1960. Evaporation from drops containing dissolved solids. Am. Inst. Che. Eng. J. 6. 1. 9 - 23.
06. Charm, S. 1971. Fundamentals of Food Engineering, 2th ed. The Avi Publishing Company Inc.
07. Dega, C.A. 1972. Heat resistance of Salmonellae in concentrated milk. Appl. Microbiol. 23. 2. 415 - 420.
08. Dlouhy, J. e W.H. Gauvin. 1960. Heat and Mass transfer in Spray Drying. Am. Inst. Che. Eng. J. 6. 1. 29 - 34.

09. Dworschák E. e M. Hegedus. 1974. Effect of heat treatment on the nutritive value of proteins in milk powder. Acta Alimentaria. 3. 3. 337 - 347.
10. Franks, Roger G. E. 1972. Modeling and simulation in Chemical engineering. Wiley Interscience.
11. Hayakawa, K. 1971. Curso de modernos conceitos e técnicas na avaliação da esterilização de alimentos: Fac. de Tecnologia de Alimentos. UNICAMP. Campinas-SP.
12. Jen, U., J.E. Manson, C.R. Stumbo, J.W. Zahradnik. 1971. A procedure for estimating sterilization of and quality factor degradation in thermally processed foods. J. Food Sci. 36. 4. 692 - 698.
13. Kreith, F. 1973. Princípios da Transmissão de calor. Editora Edgard Blücher Ltda. -SP.
14. Labuza, T.P., J.P. Le Roux, T.S. Fan, S.R. Tannenbaum. 1970. Engineering factors in single cell protein production. II. Spray Drying and cell viability. Biotechnology and Bioengineering. 12. 135 - 140.
15. Lapple, E. e C.B. Shepherd. 1940. Calculation of particle trajectories. Ind. Eng. Che. 32. 5. 605 - 617.
16. Laster, R. 1953. Factors in the selection and design of a Spray Dryer. Food Technology. 7. 264 - 267.

17. Licari, J.J. e N.N. Potter. 1970. Salmonella survival during spray drying and subsequent handling of skimmilk powder. II. Effect of drying conditions. Journal of Dairy Science. 53. 7. 871 - 876.
18. Licari, J.J. e N.N. Potter. 1970. Salmonella survival differences in heated skimmilk and in spray drying of evaporated milk. Journal of Dairy Science. 53. 9. 1287 - 1289.
19. Lyne, C.W. 1971. A review os spray drying. Brit. Chem. Eng. 16. 4/5. 370 - 373.
20. Marth, E.H. 1969. Salmonellae and Salmonellosis associated with milk and milk products. A review. Journal of Dairy Science. 52. 3. 283 - 315.
21. Marshall, W.R. Jr. 1954. Atomization and spray drying. Chem. Eng. Prog. Monograph Series, Nº 2. Vol. 50
22. Masters, K. 1968. Spray Drying. Ind. Eng. Che. 60. 10. 53-63.
23. Masters, K. 1972. Spray Drying - An introduction to principles, operational practice and aplications. Leonard Hill Books. London.
24. Masters, K. e M.P. Mohtadi. 1968. A study of centrifugal atomization and spray drying. Brit. Chem. Eng. 13. 2. 242 - 244.

25. Mc. Donough, F.E. e R.E. Hargrove. 1968. Heat resistance of Salmonella in dried milk. Journal of Dairy Science. 51. 10. 1587 - 1591.
26. Miller, D.L., J.E. Pert e C.H. Amundson. 1972. Survival of salmonellae and escherichia coli during the spray drying of various food products. J. Food Sci. 37. 828 - 831.
27. Pacitti, T. 1970. Principios Monitor Fortran. 2da. Ed. Ao livro técnico S.A. Rio de Janeiro.
28. Parti, K. e B. Paláncz. 1974. Mathematical model for spray drying. Che. Eng. Science. 29. 355 - 362.
29. Peri, C. e L. De Cesari. 1974. Thermodynamics of water sorption on Sacc. Cerevisiae and Cell viability during Spray - Drying. Lebensmittel - Wissenschaft + Technologie 7.2.76-81
30. Perry, J.H. 1963. Chemical Engineers Handbook, 4th. ed. Mc Graw Hill. Tokio.
31. Ranz, G.E. e W.R. Marshall Jr. 1952. Evaporation from drops. Chem. Eng. Prog. 48. 3. 141 - 146; 4. 173 - 180.
32. Riemann, H. 1968. Effect of water activity on the heat resistance of Salmonella in "Dry" materials. Appl. Microbiol. 16. 10. 1621 - 1622.

33. Stumbo, C.R. 1973. Thermobacteriology in food processing,
2 ed. Academic Press. New York.

APÊNDICE

NOTAÇÃO UTILIZADA NOS PROGRAMAS

A	Variável auxiliar
AL	Distância vertical decorrida, pés
ANSC	Número de Schmidt, adimensional
ANPR	Número de Prandtl, adimensional
AR	Raio do atomizador, pés
AT	Temperatura do ar, °F
ATA	Temperatura do ar no intervalo de tempo anterior, °F
B	Variável auxiliar
C	Variável auxiliar
CAL	Calor de aquecimento da partícula, BTU
CD	Fator de fricção
CI	Concentração inicial, base seca
CF	Concentração final, base seca
CFC	Concentração final calculada, base seca
COND	Condutividade térmica do ar, BTU/pé.seg.°F
CP	Calor específico do ar, BTU/lb.°F
D	Tempo para destruir 90 % da concentração inicial a uma certa temperatura, minutos
DD	Diâmetro do secador, pés
DENPA	Densidade da partícula, lb/pé ³
DENS	Densidade do ar, lb/pé ³
DH	Altura do secador, pés
DIFP	Difusividade do ar, pé ² /seg
DP	Diâmetro das partículas, pés
DTIME	Intervalo de tempo, seg.
DUH	Diferença de velocidade horizontal, pés/seg
DUV	Diferença de velocidade vertical, pés/seg
E	Constante da equação de umidade relativa

EI	Entalpia inicial da alimentação, BTU
ENTA	Entalpia inicial do ar, BTU/lb ar seco
EO	Entalpia do produto, BTU
ERH	Unidade relativa de equilibrio
EV	Agua evaporada no intervalo de tempo, lb
EVAP	Agua evaporada por um tamanho de partícula, lb
F	Vazão da alimentação, lb/hr
FP	Equivalência em minutos a 212 °F do calor aplicado, min.
G	Vazão do ar, lb/hr
PNRE	Número de Reynolds da partícula, adimensional
POR	Porcentagem de partículas de um certo tamanho
PRES	Pressão de vapor da água, atm.
PS	Peso de materia seca, lb/hr
RA	Distância radial decorrida, pés
RT	Tempo de retenção, seg.
TIME	Tempo, seg.
TS	Temperatura da partícula, °F
U	Velocidade da partícula, pés/seg.
UH	Componente horizontal da velocidade, pés/seg.
UHC	Variável auxiliar
UT	Velocidade terminal da partícula, pés/seg.
UV	Componente vertical da velocidade, pés/seg.
UVC	Variável auxiliar
VH	Calor de vaporização da água, BTU/lb.
VISC	Viscosidade do ar, lb/pé.sec.
VV	Velocidade do ar dentro do secador, pés/seg
WCP	Peso de água no produto, lb
WPOR	Porcentagem de unidade do produto, base úmida
WS	Peso de material seco em certo tamanho, lb/seg
WW	Peso de água em certo tamanho, lb/seg

X	Umidade da partícula, lb água/lb sólido seco
XH	Coefficiente de transferência de calor, $\text{BTU}/\text{pé}^2 \cdot \text{seg} \cdot ^\circ\text{F}$
XKY	Coefficiente de transferência de massa, $\text{lb}/\text{lb} \cdot \text{pé}^2 \cdot \text{seg}$
XN	Número de partículas
XNH	Calor transferido por convecção no intervalo Δt , BTU
XNM	Calor utilizado na evaporação da água, BTU
Y	Umidade absoluta do ar, lb água/lb ar seco
YS	Umidade na superfície da partícula, lb água/lb ar seco
Z	Graus Farenheit necessários para que a curva de destruição térmica atravessasse um ciclo logaritmico, $^\circ\text{F}$
ZZ	Variável auxiliar

PROGRAMA PRINCIPAL

```

0005 SP. 54
0010 DIMENSION DP(5),UH(5),UV(5),UX(5),RR(5),RL(5),FP(5),RT(5)
0015 DIMENSION TS(5),X(5),POR(5),SVRP(5),XN(5),WN(5),WE(5)
0020 DIMENSION E1(5),E2(5),DENPR(5)
0025 COMMON V,RT,DTIME,G,DO,DENS,VISC,COND,DIFF
0030 DATA (DP(N),N=1,5)/.12E-4,.23E-4,.33E-4,.43E-4,.53E-4/
0035 DATA (FP(N),N=1,5)/0.,0.,0.,0.,0./
0040 DATA (POR(N),N=1,5)/15.,49.,4.,26.,6.,7.,9.,1.,5/
0045 TYPE 919
0050 910 FORMAT (30X,'CONDICIONES INICIALES')
0055 TYPE 999, (DP(N),POR(N),N=1,5)
0060 999 FORMAT(5X,'DIAMETRO-',F9.3,7X,'PORCENTAJEM-',F6.1)
0065 Z=99.
0070 D=9.045
0075 DTIME=0.00085
0080 TIME=0.0
0085 RT=339.
0090 V=9.047
0095 F=19.2
0100 DO=1.0
0105 DH=2.
0110 G=399.
0115 RPM=24000.
0120 RR=197.
0125 VL=9.88+RR*(RPM/60.)
0130 DO 9 1-1.5
0135 UH(1)=VL
0140 UV(1)=0.0
0145 UX(1)=VL
0150 RR(1)=RR
0155 RL(1)=0.0
0160 RT(1)=3.
0165 * DENPR(1)=72.
0170 X(1)=1.5
0175 TS(1)=119.
0180 9 TYPE 100, F,X(1),TS(1),DENPR(1)
0185 TYPE 200, G,V,RT
0190 TYPE 300, RPM,RR,Z,RT(1)
0195 Z2=(POR(2)/POR(1))*DP(2)**2.
0200 Z3=(POR(3)/POR(1))*DP(3)**2.
0205 Z4=(POR(4)/POR(1))*DP(4)**2.
0210 Z5=(POR(5)/POR(1))*DP(5)**2.
0215 ZZ=DP(1)**2.+Z2+Z3+Z4+Z5

```

Programa Principal - continuação

```

000300      MN(1)=(F/(DENPA(1)+3600.))*((1.9098/72))
000310      MN(2)=(POR(2)/POR(1))+MN(1)
000320      MN(3)=(POR(2)/POR(1))+MN(1)
000330      MN(4)=(POR(4)/POR(1))+MN(1)
000340      MN(5)=(POR(5)/POR(1))+MN(1)
000350      DO 10 I=1,5
000360      MW(1)=MN(1)+.5026+DP(1)+*3.+DENPA(1)+(X(1)/(1.+X(1)))
000370      WS(1)=MN(1)+.5026+DP(1)+*3.+DENPA(1)+(1.-(X(1)/(1.+X(1))))
000380 10      E1(1)=WS(1)+(.25+X(1))*TS(1)
000390      E1=E1(1)+E1(2)+E1(3)+E1(4)+E1(5)
000400      ENTA=(.24+.45+Y)*RT+1098.+Y
000410 1      TIME=TIME+DTIME
000420      CALL PRD
000430      I=2
000440 0      VELOCIDADE, SECAO, ENTALPIA Y TRATAMIENTO TERMICO
000450 2      CALL VELO(DP(1),UH(1),UV(1),U(1),RA(1),AL(1),DENPA(1))
000460      CALL SE(DP(1),U(1),TS(1),X(1),MN(1),MW(1),WS(1),EVAP(1),TS
000470      )
000480      E2(1)=WS(1)+(.36+X(1))*TS(1)
000490      CALL TP(TS(1),FP(1),DTIME,Z)
000500      I=I+1
000510      IF(I-5)2,2,5
000520 5      EV=EVAP(1)+EVAP(2)+EVAP(3)+EVAP(4)+EVAP(5)
000530      EQ=E2(1)+E2(2)+E2(3)+E2(4)+E2(5)
000540      RTA=RT
000550      CALL SAL(EV,E1,EQ,ENTA)
000560      IF((R-X(5)),EQ,0.0)GO TO 12
000570      R=X(5)
000580      IF((RT-TS(5)),LT,2.0)GO TO 12
000590 0      SELECAO DO INTERVALO DE TEMPO
000600      IF(U(5)-140.0)78,78,4
000610 78      IF(U(5)-70.0)79,79,81
000620 81      DTIME=-0.0002
000630      GO TO 4
000640 79      IF(U(5)-10.0)75,75,76
000650 76      DTIME=-0.0005
000660      GO TO 4
000670 75      IF (U(5)-2.0)83,83,82
000680 82      DTIME=-0.001
000690      GO TO 4
000700 83      IF(R-RT),LT,1.2) DTIME=-1.5*DTIME
000710 82      IF(DTIME,GT,0.000) DTIME=-0.000
000720      GO TO 4
000730 12      TYPE 000
000740 000      FORMAT(24X,'RESULTADOS',/,/,2X,'EFEITO DURANTE A SECAOEN')
000750      TYPE 000, (FP(N),N=1,5)
000760      TYPE 000
000770      DO 11 I=1,5
000780      RT(I)=RT(1)-TIME
000790      FP(I)=FP(1)+((10.+(RT-212.)/7))*((RT(1)/50.))
000800 11

```

Programa Principal - continuação

```

00961      TYPE 500, FP(1),FP(2),FP(3),FP(4),FP(5)
00963      MCP=X(1)+NS(1)+X(2)+NS(2)+X(3)+NS(3)+X(4)+NS(4)+X(5)+NS(5)
00965      NPOR=MCP+100, / (MCP+NS(1)+NS(2)+NS(3)+NS(4)+NS(5))
00967      TYPE 910
00969      TYPE 500, V,AT
00970      TYPE 901, NPOR
00972      FORMAT(2X, 'Y-', F5, 3, 5X, 'TEMP. SAIDA-', F5, 1)
00974      500      FORMAT (F22, 4, 2F14, 4, 2F9, 4)
00976      901      FORMAT(2X, 'UNIDADE DO PRODUTO-', F4, 2)
00978      100      FORMAT(2X, 'F-', F5, 1, 5X, 'X-', F3, 1, 5X, 'TEMP. AL-', F5, 1,
00980      15X, 'DENS. AL. -', F5, 1)
00982      200      FORMAT(2X, 'S-', F5, 1, 5X, 'Y-', F5, 3, 5X, 'TEMP. AR-', F5, 1)
00984      300      FORMAT(2X, 'RPM-', F7, 0, 2X, 'R. AT. -', F5, 3, 5X, 'Z-', F5, 0,
00986      15X, 'TEMPO RET. -', F3, 1)
00988      830      FORMAT(2X, 'TRATAMENTO TERMICO TOTAL')
00990      910      FORMAT(20X, 'CONDIÇÕES FINAIS')
00992      STOP
00994      END

```

VELO. F4

```

SUBROUTINE VELO(DP, UH, UV, U, RA, RL, DENPA)
COMMON V, AT, DTIME, G, DD, DENS, VISC, COND, DIFF
R=0.05
C
COMPONENTE HORIZONTAL
IF(UH=0.1)15,15,80
15
DUH=0.0
UH=0.0
GO TO 23
80
PNRE=(DP*UH+DENS)/VISC
DUH1=(3.+DENS*DD(PNRE)+U*UH+DTIME)/(4.+DENPA*DP)
IF(UH+DUH1)69,69,70
69
DUH=UH
UH=0.0
GO TO 23
70
UH=UH+DUH1
C=UH
62
PNRE=(DP*UH+DENS)/VISC
DUH2=(3.+DENS*DD(PNRE)+U*UH+DTIME)/(4.+DENPA*DP)
DUH=(DUH1+DUH2)/2.
UHC=C-DUH1+DUH
IF(ABS(UH-UHC),PUR3=R)60,69,61
60
UH=UHC
GO TO 23
61
UH=UHC
GO TO 62
C
COMPONENTE VERTICAL
UT=DP+2.+32.2*(DENPA-DENS)/(18.+VISC)
RE=(DP+DENS*UT)/VISC
IF(RE=0.0)11,11,10
10
UT=.153*DP+1.44*32.2+71*(DENPA-DENS)/(DENS+.09+VISC+.0.4)
IF(UT-UV)12,12,63
11
UV=UT
12
DUV=0.0
GO TO 67
63
PNRE=(DP+U+DENS)/VISC
R=32.2*(DENPA-DENS)/DENPA
B=(3.+DENS*DD(PNRE)+U*UV)/(4.+DENPA*DP)
IF(R=0)12,24,24
24
DUV1=(R-B)*DTIME
UV=UV+DUV1
B=UV
66
PNRE=(DP+U+DENS)/VISC
R=32.2*(DENPA-DENS)/DENPA
B=(3.+DENS*DD(PNRE)+U*UV)/(4.+DENPA*DP)
DUV2=(R-B)*DTIME
DUV=(DUV1+DUV2)/2.
UVC=D-DUV1+DUV

```

Subroutine Velo - continuação

```

00305      IF(UVC-.001)12,12,13
00310      13      IF(ABS((UY-UVC)/UVC)-R)54,54,55
00320      54      UY-UVC
00321      IF(UT-UY)12,12,57
00330      GO TO 57
00340      55      UY-UVC
00350      GO TO 55
00355      57      U=SQRT(UH**2.+UY**2.)
00360      C      POSICION DE LA PARTICULA
00361      RA-RA+(UH-.5*DUH)*DTIME
00362      VV-(3.54E-4*(.0052+.0195*V)*(RT+450.))+(G/DD**2.)
00363      AL-AL+(VV+UY+.5*DUV)*DTIME
00364      RETURN
00365      END

```

TYPE	CD.F4	
00010	C	FATOR DE FRICCAO
00020		FUNCTION CD(PNRE)
00030		IF(PNRE-1000.)50,51,51
00040	51	CD=0.45
00050		RETURN
00060	50	IF(PNRE-100.)52,53,53
00070	53	CD=0.26+12./PNRE**0.5
00080		RETURN
00090	52	IF(PNRE-3.)54,55,55
00100	55	CD=19.5/PNRE**0.5
00110		RETURN
00120	54	IF(PNRE-0.5)56,57,57
00130	57	CD=(24./PNRE)+PNRE
00140		RETURN
00150	56	IF(PNRE-0.00001)58,59,59
00160	59	CD=24./PNRE
00170		RETURN
00180	58	CD=2400000.
00190		RETURN
00200		END

```

SUBROUTINE SE(DP, U, TS, X, XN, WN, NS, EVAP, DENPR)
COMMON V, AT, DTIME, B, DP, DENS, VISC, COND, DIFF
CONSTANTES DE LA ECUACION DE ERH
B=0.1
E=0.2
CALCULO DE COEFICIENTES
CP=(.24+.45*V)/(1.+V)
PNRE=(CP+U*DENS)/VISC
RNSC=VISC/(DENS*DIFF)
RMPR=(CP+VISC)/COND
XKY=(DIFF*(2.+247*PNRE+.62*RNSC+.31))/(DP+.0252*(AT+458))
XN=(COND/DP)*(2.+247*PNRE+.62*RMPR+.31)
IF(X=0.0016, 16, 19)
CPP=.26*(1.-(X/(1.+X)))+(X/(1.+X))
R=TS
PRES=0.068*EXP(16.63*(TS-198.)/(TS+468.))
C=(TS/250.)*+.4+.1.04
ERH=(X/(X+C))*EXP((-B*X)/(X+E)*+.2.)
VS=(.622+ERH*PRES)/(1.-ERH*PRES)
VH=1898.-0.612*(TS-32)
BALANCE DE CALOR
XNH=XN+.2.44*DP+.2.*XKY+(VS-V)*DTIME+VH
XNH=XN+.2.44*DP+.2.*XN*(AT-TS)+DTIME
CAL=XN+.0.5236*DP+.2.*DENPR*CPP*(TS-R)
IF(ABS((XNH-(XNH+CAL))/XNH)=0.96)18, 11, 11
IF(XNH-(XNH+CAL))22, 22, 22
TS=TS+.1
IF(TS, GT, AT)60 TO 20
GO TO 12
TS=TS-.01
GO TO 12
CANTIDAD EVAPORADA Y NUEVAS CONDICIONES
EVAP=XNH/VH
IF(WN-EVAP)14, 14, 15
EVAP=WN
WN=WN-EVAP
X=WN/VS
DENPR=((WN+NS)*1.9898)/(DP+.2.*XN)
RETURN
TS=AT+(TD-AT)*EXP((-XN+.6.*DTIME)/(1.26*DENPR+DP))
EVAP=0.0
RETURN
TS=AT
EVAP=0.0
RETURN
END

```

TYPE BAL.F4

```
00010 C BALANCOS DE CALOR E DE MASA
00020 SUBROUTINE BAL(EV,EI,EO,ENTR)
00030 COMMON V,RT,DTIME,G
00040 V=V+(3600.*EV)/G
00050 RT=((EI-EO)+(3600./G)*ENTR-1000.*V)/(1.34+.45*V)
00060 RETURN
00070 END
```

TYPE PRO.F4

```
00010 C CALCULA PROPIEDADES DO AR
00020 SUBROUTINE PRO
00030 COMMON V,RT,DTIME,G,DD,DENS,VISC,COND,DIFF
00040 VISC=1.91E-7*(RT+450.)**1.697*((1.+1.685*V)/(1.+1.689*V))
00050 DENS=(1.+V)/((1.0252+.0405*V)*(RT+450.))
00060 COND=2.64E-9*(RT+450.)**1.15*((1.+1.49*V)/(1.+1.51*V))
00070 DIFF=4.5E-9*(RT+450.)**1.75
00080 RETURN
00090 END
```

TYPE TR.F4

```
00005 C ESTA SUBROUTINA CALCULA EL TRATAMIENTO TERMICO
00010 SUBROUTINE TR(TS,FP,DTIME,Z)
00020 RT=(10.*((TS-310.)/2.))+(DTIME/60.)
00030 FP=FP+RT
00040 RETURN
00050 END
```

```

TYPE ED, F4
C
CALCULA VALOR DE D
SUBROUTINE SD (PA, PB, PC, PD, PE, NA, NB, NC, ND, NE, D, CFC)
DIMENSION V(5), B(5)
CI=312999999.
CF=177999.
D=0.000001
N=.43*ALOG(CI)
15 V(1)=PA/D
V(2)=PB/D
V(3)=PC/D
V(4)=PD/D
V(5)=PE/D
I=1.
22 IF((V(I)-N).GT.29.) GO TO 23
B(I)=10.+(X-V(I))
I=I+1.
IF(I.GT.5.)GO TO 24
GO TO 22
23 B(I)=0.0
I=I+1.
IF(I.LT.6.)GO TO 22
24 PS=NA+NB+NC+ND+NE
CFC=(B(1)+NA+B(2)+NB+B(3)+NC+B(4)+ND+B(5)+NE)/PS
IF(ABS((CFC-CF)-0.05)10.10.11
IF(CFC-CF)12.10.12
D=D+0.00001
GO TO 15
D=D-0.00000001
IF(D.EQ.0.0) GO TO 10
GO TO 15
10 TYPE 100, D, CFC, CF, CI
100 FORMAT(F13.10, 3E15, 4. //)
RETURN
END

```

EXEMPLO DE CALCULO

EN ROUTE SP. F4. VELO. F4. SE. F4. BRL. F4. PRO. F4. CD. F4. TP. F4

00000000: SP. F4

00000000: VELO. F4

00000000: SE. F4

00000000: BRL. F4

00000000: PRO. F4

00000000: CD. F4

00000000: TP. F4

00000000: LOADING

00000000: EXECUTION1

CONDICOES INICIAIS

DIAMETRO- .138E-04 PORCENTAJEM- 15.1

DIAMETRO- .238E-04 PORCENTAJEM- 49.4

DIAMETRO- .338E-04 PORCENTAJEM- 26.6

DIAMETRO- .438E-04 PORCENTAJEM- 7.9

DIAMETRO- .538E-04 PORCENTAJEM- 1.0

R- 10.0 X-1.5 TEMP. RL-110.0 DENS. RL- 72.0

Q- 230.0 Y- 0.017 TEMP. RR- 230.0

RP- 24000. R. RT- 0.197 Z- 00. TEMPO RET. -3.0

RESULTADOS

EFEITO DURANTE A SECCAO

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

TRATAMENTO TERMICO TOTAL

0.0175 0.0174 0.0173 0.0172 0.0172

CONDICOES FINAIS

V- 0.052 TEMP. SAIDA- 175.0

UMIDADE DO PRODUTO-2.06

END OF EXECUTION

CPU TIME: 3.75 ELAPSED TIME: 1:0.12

FIN