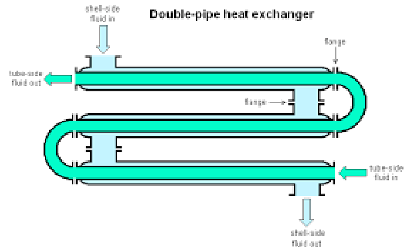
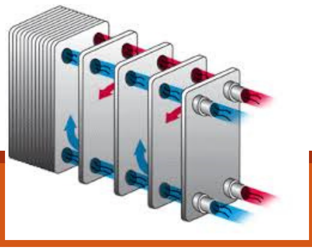
Processamento Térmico Descontínuo e Contínuo de Alimentos:
Conceitos e Cálculos Preditivos

PROFA. DRA. CYNTHIA DITCHFIELD

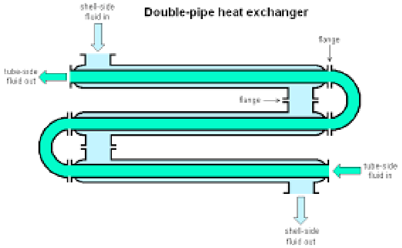
Processo Térmico de Alimentos



- Conceitos
- Cinética de destruição microbiana
- Processo térmico descontínuo
- Curvas de penetração de calor
- Processo térmico contínuo

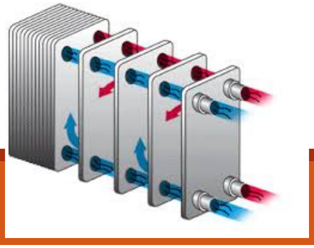


Processo Térmico de Alimentos

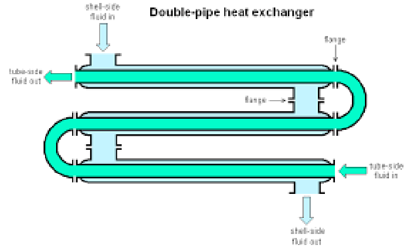


- Processo térmico: uso do calor para estender a vida de prateleira do produto

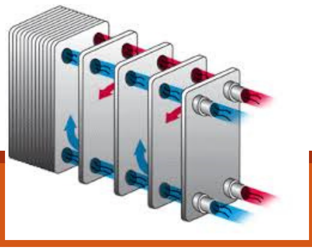
- Determinar a combinação de tempo-temperatura que resulte:
  - ✓Produto seguro (Saúde pública)
  - ✓Longa vida de prateleira (Comercial)
  - ✓Alta qualidade nutricional e sensorial (Consumidor)



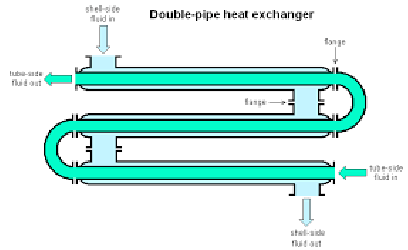
Processo Térmico de Alimentos



- Critérios:
  - ✓Destruição de microrganismos
  - ✓Inativação de enzimas
- Restrições:
  - ✓Preservação de nutrientes
  - ✓Controle da textura



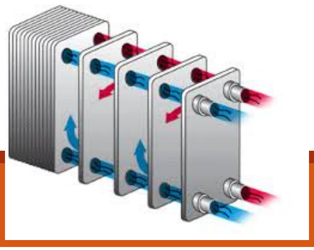
Processo Térmico de Alimentos



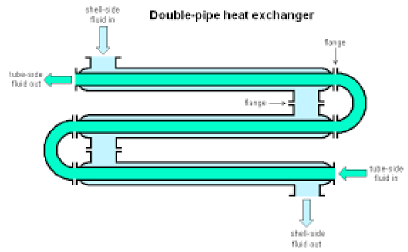
- Tipos de Processo Térmico:
  - ✓ Branqueamento

• Remoção de gases dos tecidos
• Pré-tratamento de frutas e vegetais
• Imersão em água fervente ou vapor fluente

• Inativação de enzimas
• Limpeza e amolecimento do tecido
• Redução inicial de microrganismos



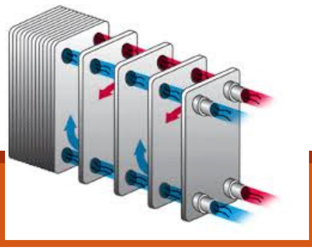
Processo Térmico de Alimentos



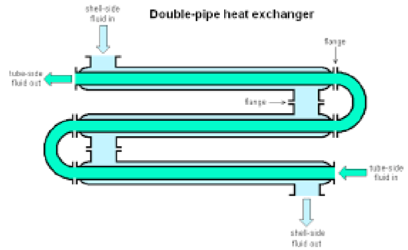
- Tipos de Processo Térmico:
  - Eliminação de microrganismos patogênicos (células vegetativas)
  - Temperaturas mais brandas de processo
  - Inativação de enzimas

✓ Pasteurização

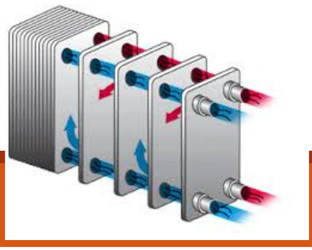
- Combinação com outros tratamentos (refrigeração, aditivos químicos, embalagem, fermentação,....)



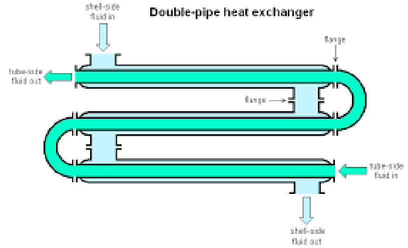
Processo Térmico de Alimentos



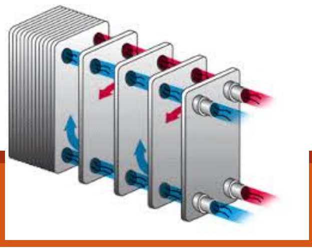
- Tipos de Processo Térmico: ✓Esterilização
  - Nenhum microrganismo viável no alimento
  - Estável em temperatura ambiente
  - Esterilidade comercial



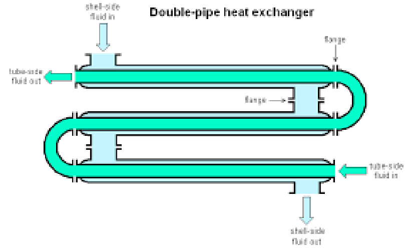
Processo Térmico de Alimentos



- Condições de processo
  - Características intrínsecas do alimento: pH, força iônica, potencial redox, nível de oxigênio
  - Armazenamento pós processo
  - Microrganismos ou esporos de interesse

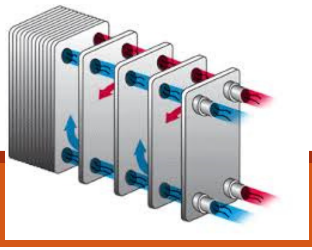


Processo Térmico de Alimentos

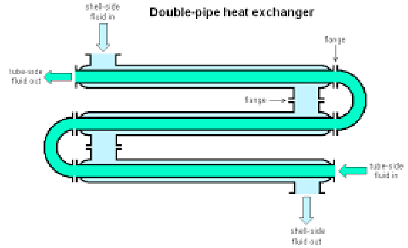


Condições de processo

- Contaminação inicial
- Propriedades termofísicas do alimento
- Modo de transferência de calor
- Tamanho e forma da embalagem

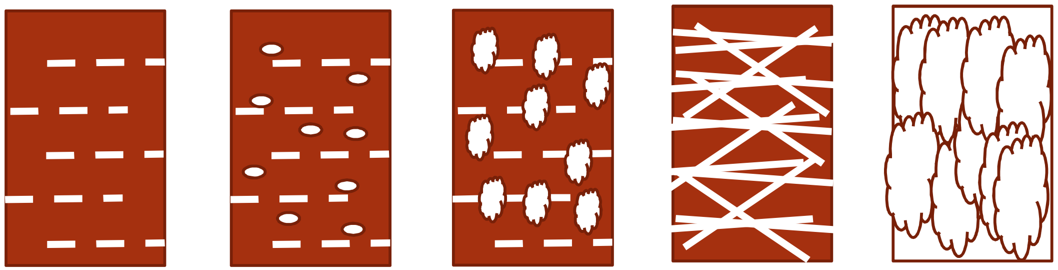


Processo Térmico de Alimentos

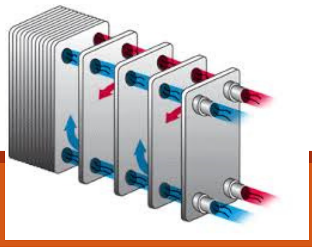


Modos de Transferência de Calor em Latas

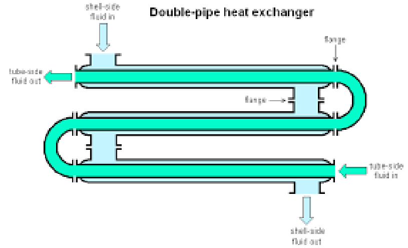
Aquecimento por convecção	Aquecimento por convecção e condução	Aquecimento por condução



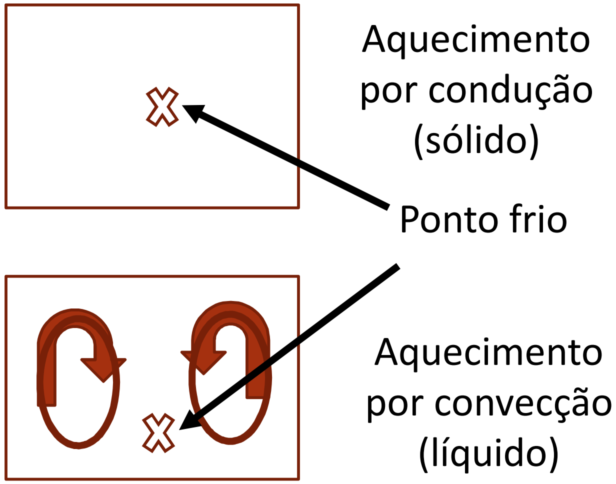
Alimento fluido	Partículas em líquido	Partículas num líquido viscoso	Alimento em camadas densas	Alimento sólido empacotado

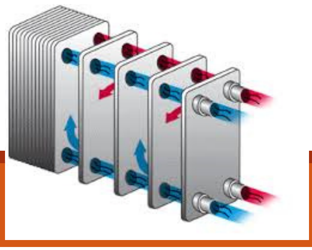


Processo Térmico de Alimentos

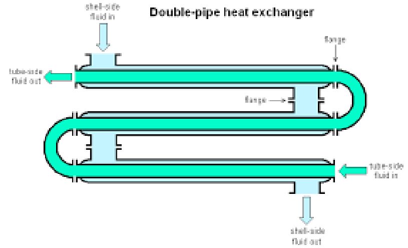


Localização do Ponto Frio em Latas

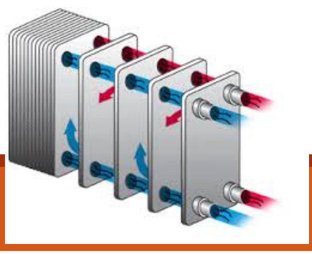




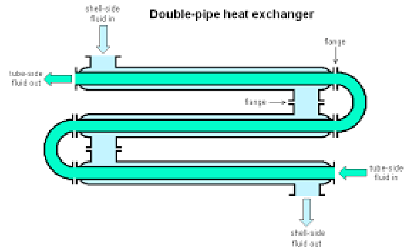
Processo Térmico de Alimentos

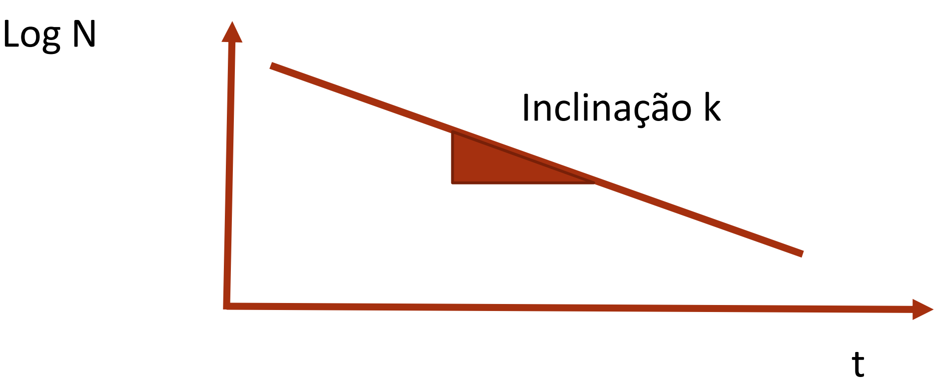


- Definição do Processo Térmico
  - ✓ Destruição de microrganismos
    - Tempo e Temperatura : Letalidade
    - Taxas de Inativação – decaimento logarítmico
    - Exposição a uma temperatura constante: aumento da inativação com aumento do tempo e da temperatura
    - Reação de Primeira ordem

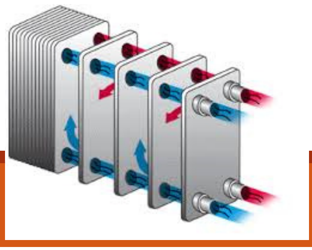


Processo Térmico de Alimentos

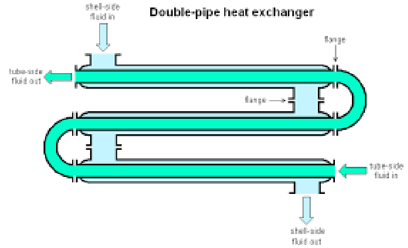




N = número de microrganismos viáveis



Processo Térmico de Alimentos



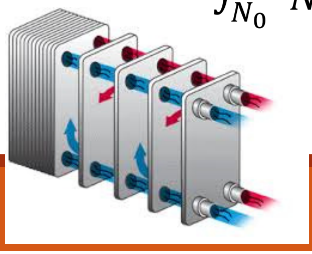
$$\frac{dN}{dt} = -kN \quad (1)$$

Separando as variáveis:

$$\frac{dN}{N} = -kdt \quad (2)$$

Integrando e considerando que para t = 0, N = N_0:

$$\int_{N_0}^{N} \frac{dN}{N} = -\int_0^t kdt \quad (3)$$



Considerando que k é constante:

$$ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -kt \quad (4)$$

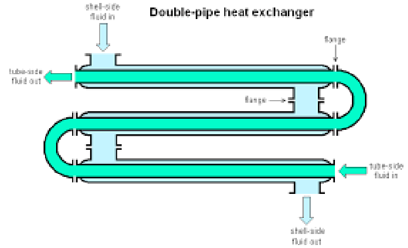
Transformando para logaritmo decimal:

$$2{,}303 \log\left(\frac{N}{N_0}\right) = -kt; \log\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\frac{k}{2{,}303}t \qquad (5)$$

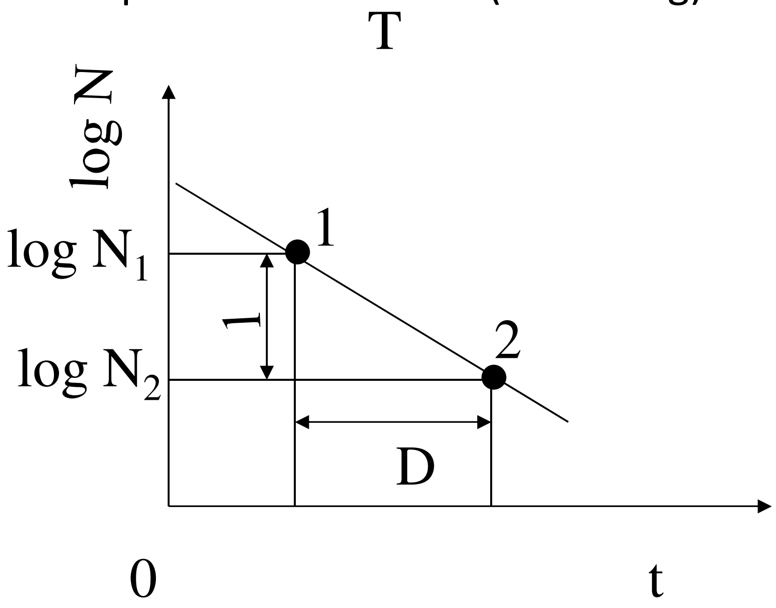
Como D = 2,303/k:

$$\log\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\frac{t}{D} \qquad (6)$$

Processo Térmico de Alimentos



- Tempo de Redução Decimal (D)
  - ✓Tempo necessário a uma dada temperatura para reduzir a população de microrganismos viáveis por um fator de 10 (1 ciclo log)



$$D = 2{,}303/k$$

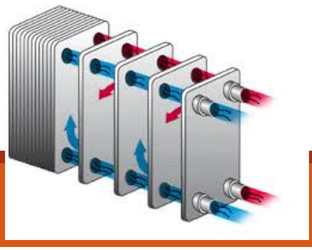
$$\log N_f = \log N_0 - (1/D)\, t$$

$$N_f = N_0\, 10^{-(t/D)}$$

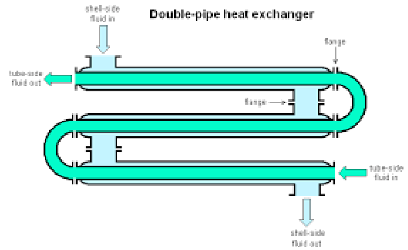
N_f = número de microrganismos sobreviventes

$N_f \geq 1$ haverá deterioração

$N_f < 1$ probabilidade de deterioração

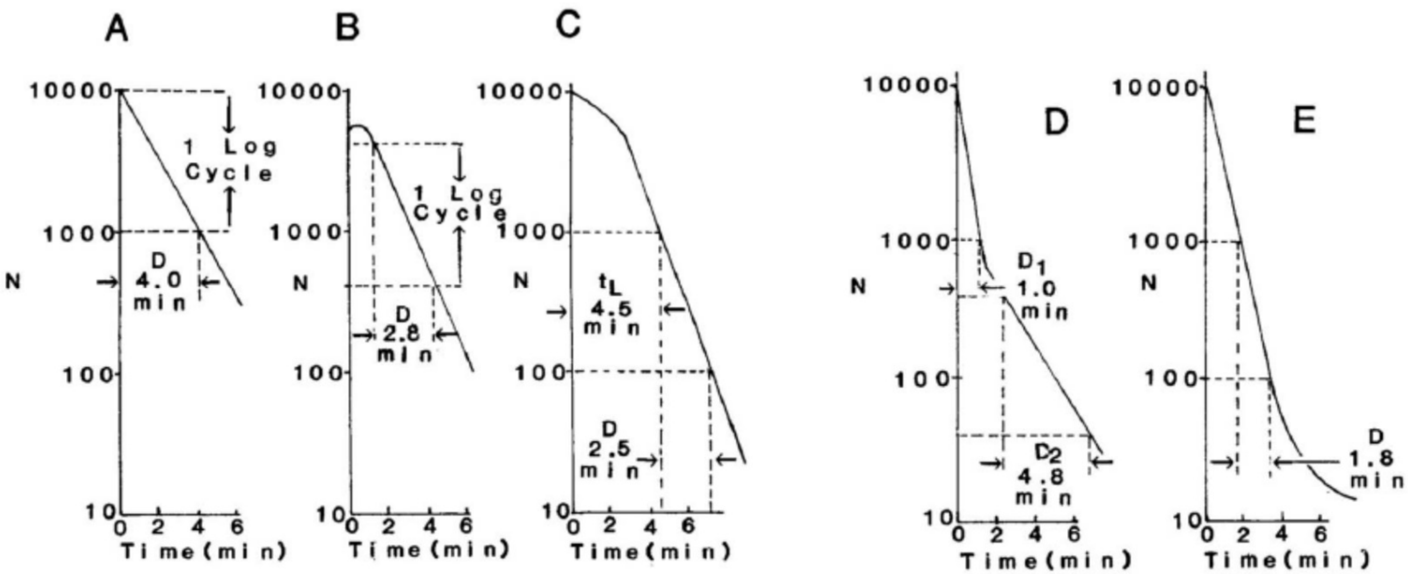


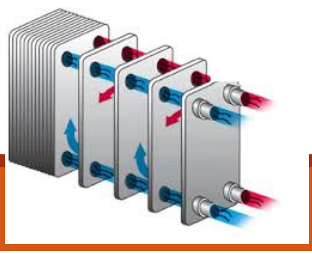
Processo Térmico de Alimentos



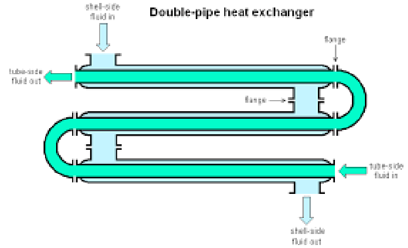
➢Curvas de Inativação Microbiana

TOLEDO, R. T. Thermal Process Calculations In: TOLEDO, R. T. **Fundamentals of Food Process Engineering.** New York: Springer Science +Business Media, LLC, 2007. Cap. 9, p. 301-378.



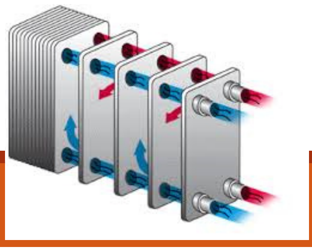


Processo Térmico de Alimentos

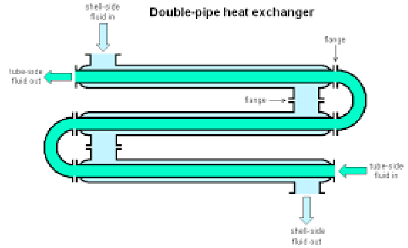


- Valor de Esterilização ou Letalidade
  - ✓ Destruição de microrganismos num material aquecido
    - S = número de reduções decimais

$$S = \log N - \log N_0 = \log (N/N_0) = t/D$$



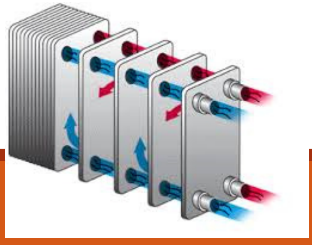
Processo Térmico de Alimentos



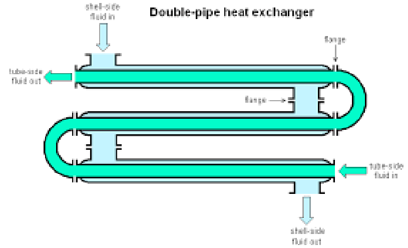
- Valor de Esterilização ou Letalidade

  ✓ F_T (tempo) Tempo total de aquecimento a uma dada temperatura T para atingir uma determinada letalidade

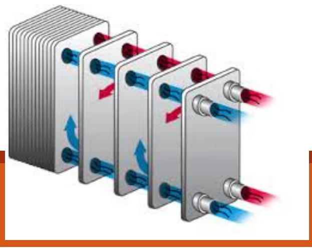
  $F_T = SD_T$ processo isotérmico



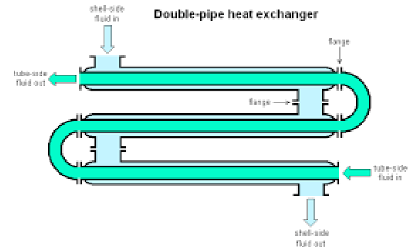
Processo Térmico de Alimentos



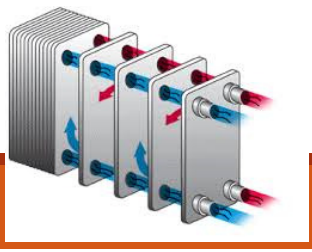
- Para microrganismos patogênicos (Ex. *Clostridium botulinum*) o valor ideal para S = 12
- F é expresso numa temperatura de referência
  - Esterilização T = 121,1 °C = 250 °F F_0, D_0
  - Pasteurização T = 82,2 °C = 180 °F $F_{82,2}, D_{82,2}$



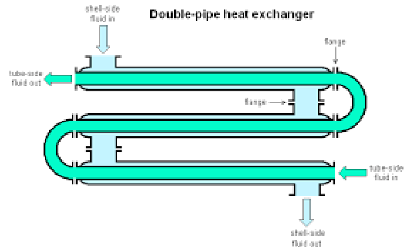
Processo Térmico de Alimentos



- Valor de Esterilização ou Letalidade
  - ✓Microrganismos patogênicos
    - (pH > 4,5 baixa acidez *Clostridium botulinum*) 12 D



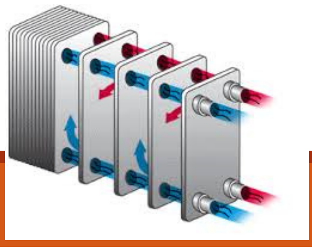
Processo Térmico de Alimentos



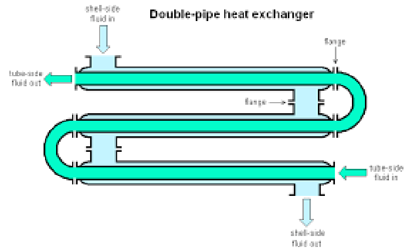
➢Valor de Esterilização ou Letalidade

✓Microrganismos deterioradores

- Bactérias esporuladas não patogênicas (*Clostridium sporogenes*, *Bacillus subtilis*) 5 D
- Bactérias termófilas não patogênicas (*Bacillus stearothermophilus*) 3 D



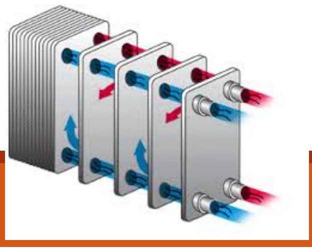
Processo Térmico de Alimentos



➢Valor de Esterilização ou Letalidade

✓D_0 *C. botulinum* = 0,21 min   12*D = 12*0,21 = 2,52 min

✓D_0 *C. sporogenes* PA 3679 = 1 min   5*D = 5*1 = 5 min



Processo Térmico de Alimentos

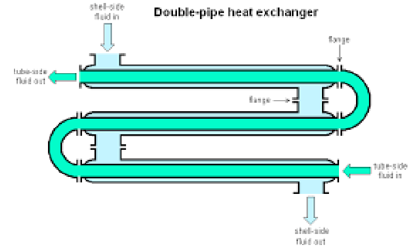
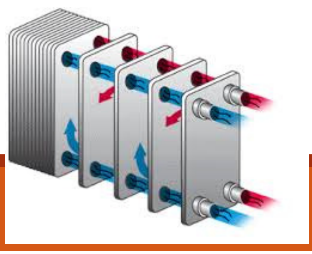


Table 9.2 Heat Resistance of Spoilage Microorganisms in Low-Acid Canned Foods

Organism	*Product*	D_0 *(min)*	*z* (°F)	*z* (°C)
Clostridium botulinum 213-B	Phosphate buffer (pH7)	0.16	18	10
	Green beans	0.22	22	12
	Peas	0.22	14	8
Clostridium botulinum 62A	Phosphate buffer (pH7)	0.31	21	12
	Green beans	0.22	20	11
	Corn	0.3	18	10
	Spinach	0.25	19	11
Clostridium spp. PA 3679	Phosphate buffer (pH7)	1.45	21	12
	Asparagus	1.83	24	13
	Green beans	0.70	17	9
	Corn	1.20	18	10
	Peas	2.55	19	10
	Shrimp	1.68	21	12
	Spinach	2.33	23	13
Bacillus stearother-mophilus FS 1518	Phosphate buffer (pH7)	3.28	17	9
	Asparagus	4.20	20	11
	Green beans	3.96	18	10
	Corn	4.32	21	12
	Peas	6.16	20	11
	Pumpkin	3.50	23	13
	Shrimp	3.90	16	9
	Spinach	4.94	21	12

Source: Reed, J. M., Bohrer, C. W. and Cameron, E. J., *Food Res. 16:338–408.*
Reprinted from: Toledo R. T. *1980.* Fundamentals of Food Engineering. AVI Pub. Co., Westport, CT.

TOLEDO, R. T. Thermal Process Calculations In: TOLEDO, R. T. **Fundamentals of Food Process Engineering.** New York: Springer Science +Business Media, LLC, 2007. Cap. 9, p. 301-378.



Processo Térmico de Alimentos

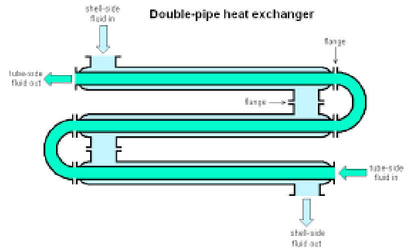


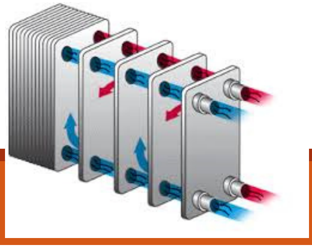
Table 9.3 Heat Resistance of Spoilage Microorganisms in Acid and in Pasteurized Foods

	Temperature			*Z*	
Organism	°*F*	°*C*	*D (min)*	°*F*	°*C*
Bacillus coagulans	*250*	*121.1*	*0.07*	*18*	*10*
Bacillus polymyza	*212*	*100*	*0.50*	*16*	*9*
Clostridium pasteurianum	*212*	*100*	*0.50*	*16*	*9*
Mycobacterium tuberculosis	*180*	*82.2*	*0.0003*	*10*	*6*
Salmonella spp.	*180*	*82.2*	*0.0032*	*12*	*7*
Staphylococcus spp.	*180*	*82.2*	*0.0063*	*12*	*7*
Lactobacillus spp.	*180*	*82.2*	*0.0095*	*12*	*7*
Yeasts and molds	*180*	*82.2*	*0.0095*	*12*	*7*
Clostridium botulinum Type E	*180*	*82.2*	*2.50*	*16*	*9*

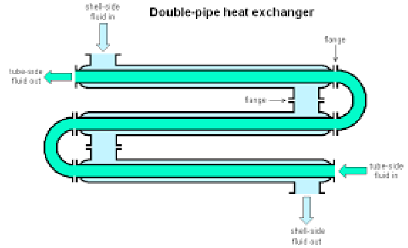
Source: (1) Anderson, E. E., Esselen Jr., W. B. and Fellers, C. R. *Food Res. 14:499–510, 1949. (2)* Crissley, F. D., Peeler, J. T., Angelotti, R. and Hall, H. E., *J. Food Sci. 33:133–137, 1968. (3)* Stumbo, C. R. *77termobacteriology in Food Processing*, Academic Press, New York, *1973. (4)* Townsend, C. T. *Food Res. 4:231–237, 1939. (5)* Townsend, C. T., and Collier, C. P. *Proc. Technical Session of the 48th Annual Convention of the National Canners Association (NCA). NCA information Newsl. No. 1526,* February *28, 1955. (6)* Winter, A. R., Stewart, G. F., McFarlane, V. H. and Soloway, *M. Am. J. Pub. Health 36:451–460, 1946. (7)* Zuccharo. J. B., Powers, J. J., Morse, R. E. and Mills *W. C. Food. Res. 16:3038, 1951*

Reprinted from: Toledo, *1980.* Fundamentals of Food Process Engineering, Ist. ed. AVI Pub. Co. Westport, Conn.

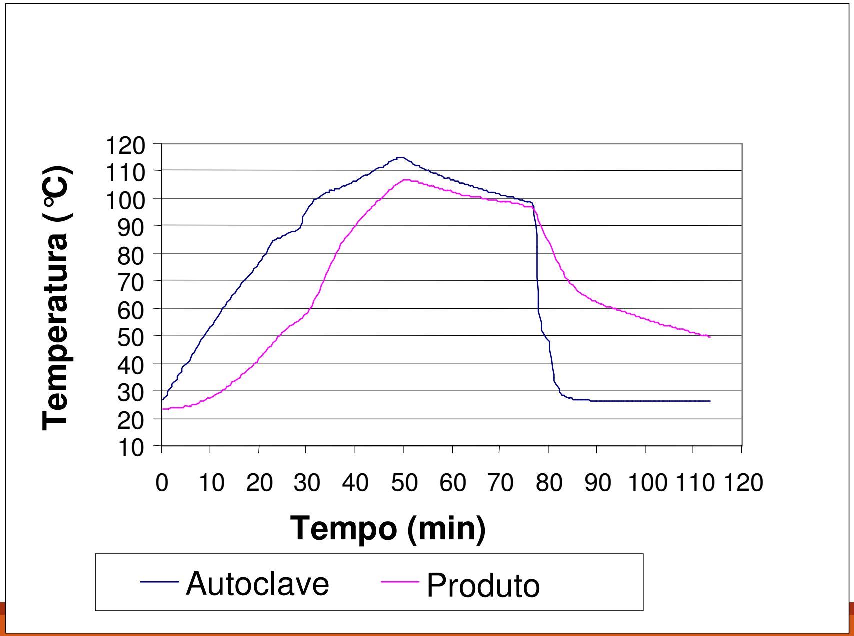
TOLEDO, R. T. Thermal Process Calculations In: TOLEDO, R. T. **Fundamentals of Food Process Engineering.** New York: Springer Science +Business Media, LLC, 2007. Cap. 9, p. 301-378.

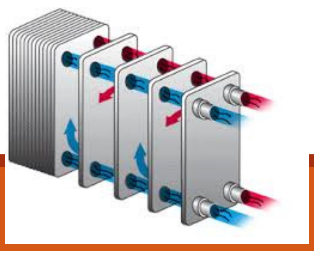


Processo Térmico de Alimentos

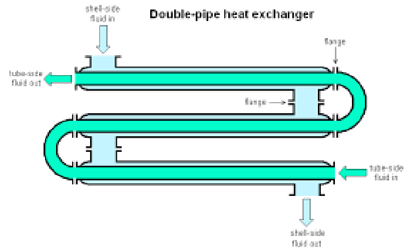


- Processos reais não ocorrem a temperatura constante
  - ✓ Descrever a dependência da taxa de inativação com a temperatura

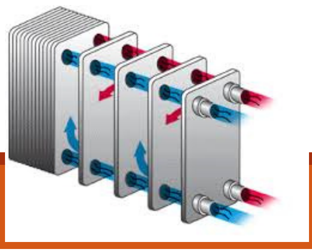




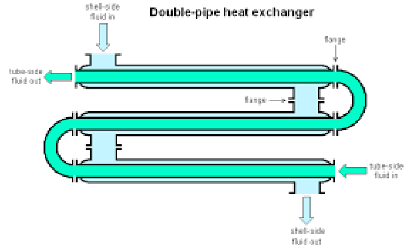
Processo Térmico de Alimentos

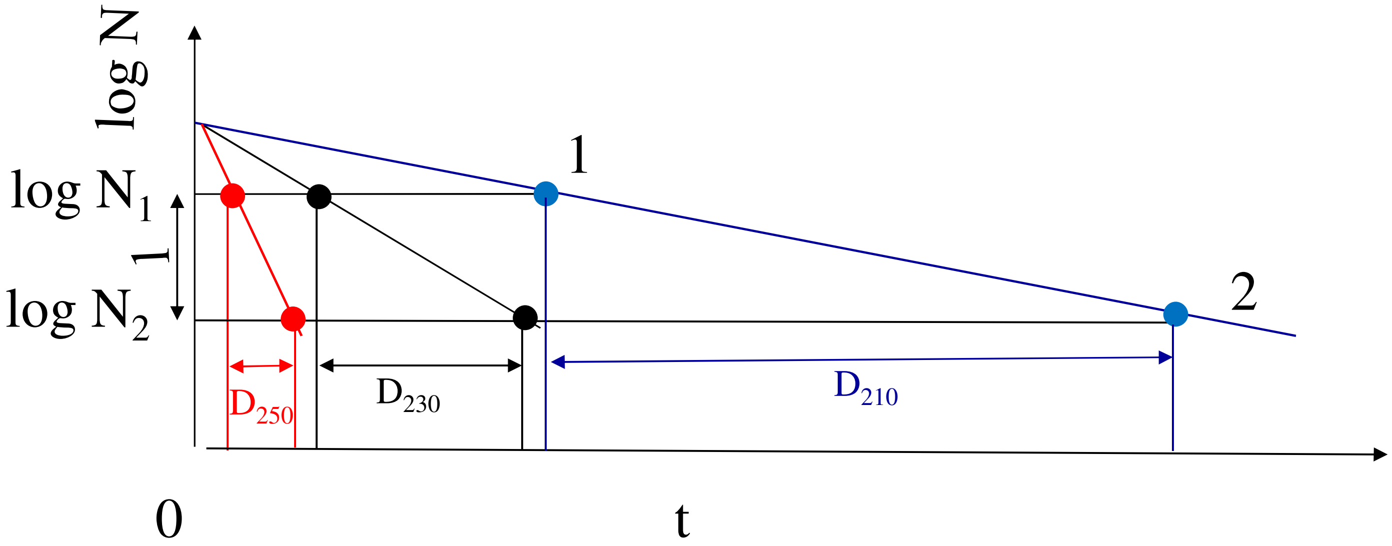


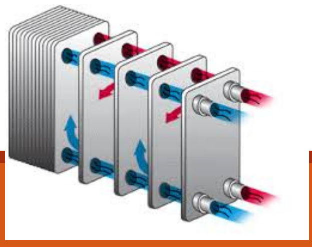
- Curvas de Tempo de Morte Térmica “TDT”
  - ✓Curvas de inativação microbiana em diferentes temperaturas
  - ✓Determinação dos valores de D em cada temperatura



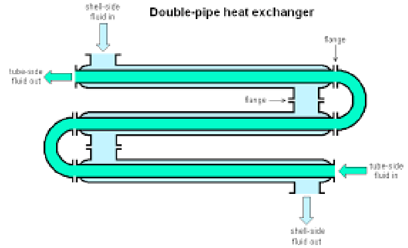
Processo Térmico de Alimentos



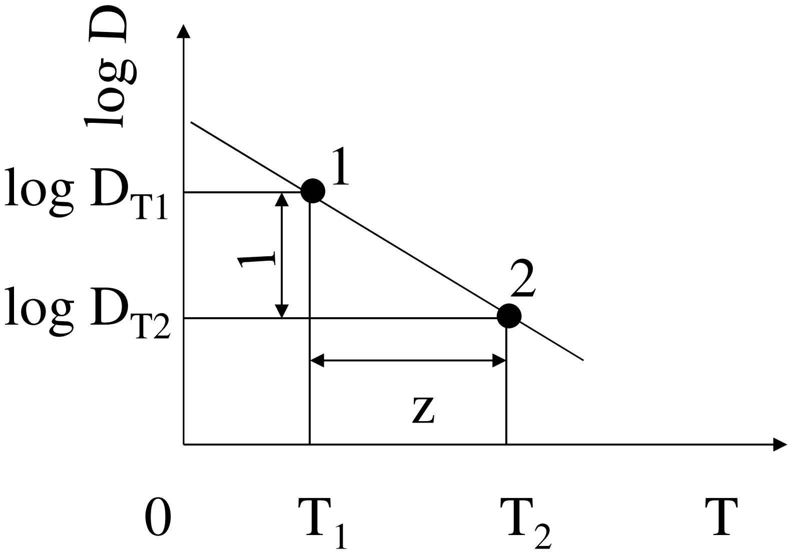




Processo Térmico de Alimentos



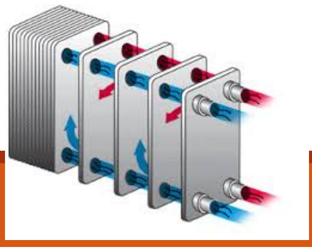
- Valor z
  - ✓Diferença de temperatura necessária para reduzir o valor do tempo de redução decimal (D) por um fator de dez (1 ciclo log)



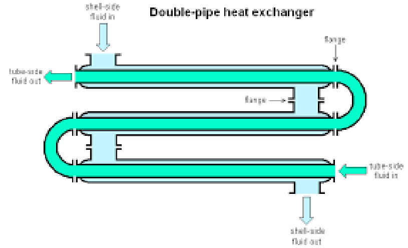
$$\log D_{T2} = \log D_{T1} - (1/z)\,(T_2 - T_1)$$

$$D_{T2} = D_{T1}\; 10^{-\,(T2 - T1)/z}$$

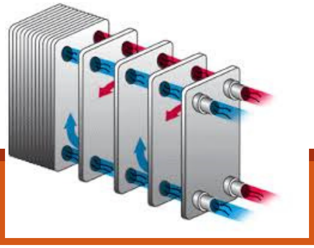
$$D_T = D_0\; 10^{-\,(T - T0)/z}$$



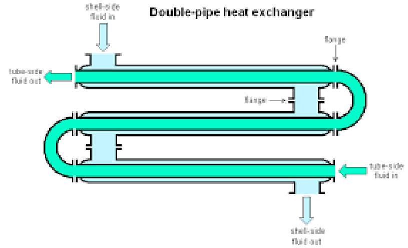
Processo Térmico Descontínuo



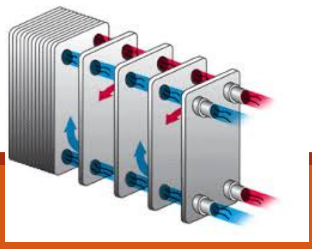
- Alimento contido numa embalagem (lata, vidro, bolsa flexível)
- Processo de aquecimento e resfriamento em autoclave batelada ou contínua



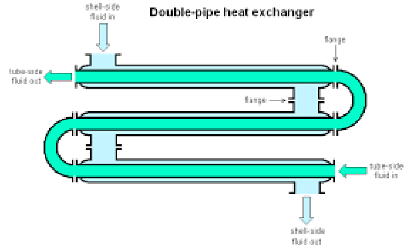
Processo Térmico Descontínuo



- Determinar a letalidade do processo para verificar se foi atingido o grau desejado de esterilização
  - ✓ $F_T = SD_T$
  - ✓ Métodos para determinar a letalidade
    - Método geral – integração da curva temperatura/tempo
    - Método das fórmulas – previsão da temperatura do produto (Stumbo e Hayakawa)



Processo Térmico Descontínuo



$$F_T = SD_T \qquad (1)$$

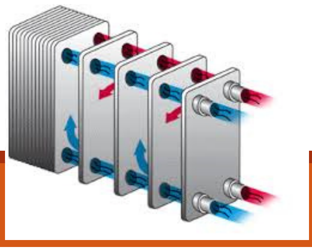
$$F_0 = SD_0 \qquad (2)$$

Dividindo (1) por (2):

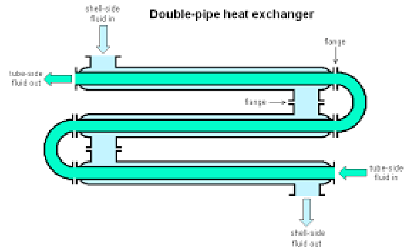
$$\frac{F_T}{F_0} = \frac{SD_T}{SD_0} = \frac{D_T}{D_0} = 10^{-\frac{(T-T_0)}{z}} \qquad (3)$$

Fator de Letalidade ou Taxa Letal (L):

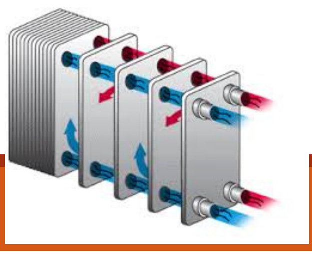
L = $10^{\frac{(T-T_0)}{z}}$



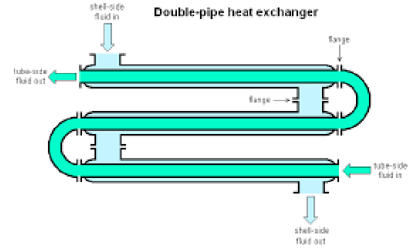
Processo Térmico Descontínuo



- Determinar o microrganismo a ser utilizado como referência
- Calcular o valor de letalidade desejado (F_0)
- Teste de penetração de calor obtendo a história da temperatura do produto no ponto frio



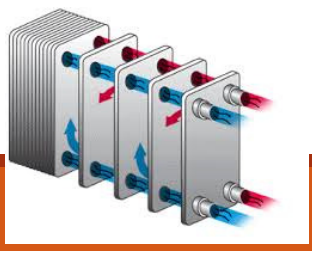
Processo Térmico Descontínuo



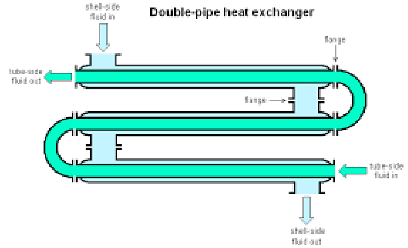
- Obter o valor de F_0 resultante do processo térmico realizado

- Comparar os valores e determinar os parâmetros para que se obtenha a letalidade desejada

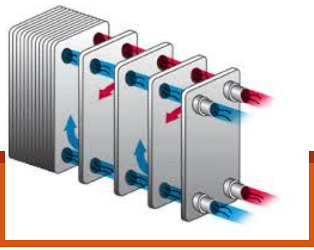
$$F_0^z = \int_0^t L_t dt$$



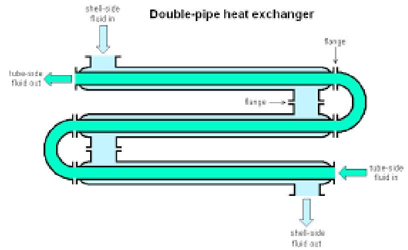
Processo Térmico Descontínuo



- Método Geral
  - ✓ Regra de Simpson
  - ✓ Estabelecer um δt tal que $t/\delta t$ seja um número par
  - ✓ $i = 0, t = 0; i = 1, t = \delta t, i = 2, t = 2\ \delta t$
  - ✓ $A = \delta t/3\ [L_0 + 4L_1 + 2L_2 + 4L_3 + 2L_4 + \ldots..\ 2L_{i-2} + 4L_{i-1} + L_t\ ] = F_0$

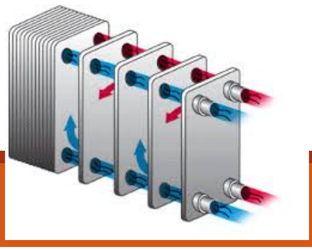


Processo Térmico Descontínuo

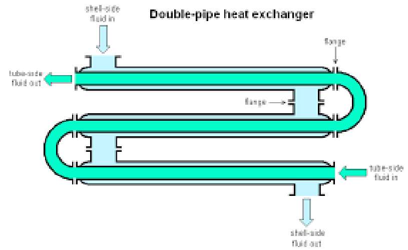


- Curvas de Penetração de Calor
  - ✓Predição da temperatura no ponto frio do produto
  - ✓Cilindro finito

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = exp\left[\left(\frac{-hA}{\rho C_p V}\right)t\right]$$



Temperatura no Aquecimento

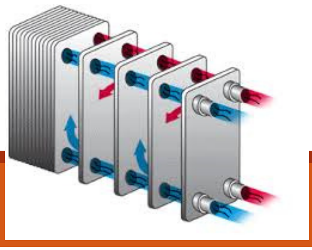


$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = exp\left[\left(\frac{-hA}{\rho C_p V}\right)t\right] \qquad \frac{(T_\infty - T)}{j_h I_h} = \frac{g}{j_h I_h} = 10^{\frac{-t}{f_h}}$$

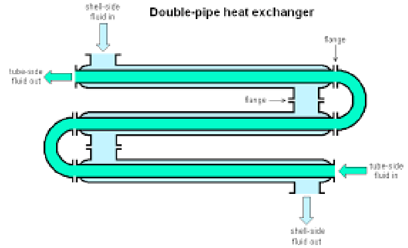
$$(T_\infty - T) = j_h I_h 10^{\frac{-t}{f_h}}$$

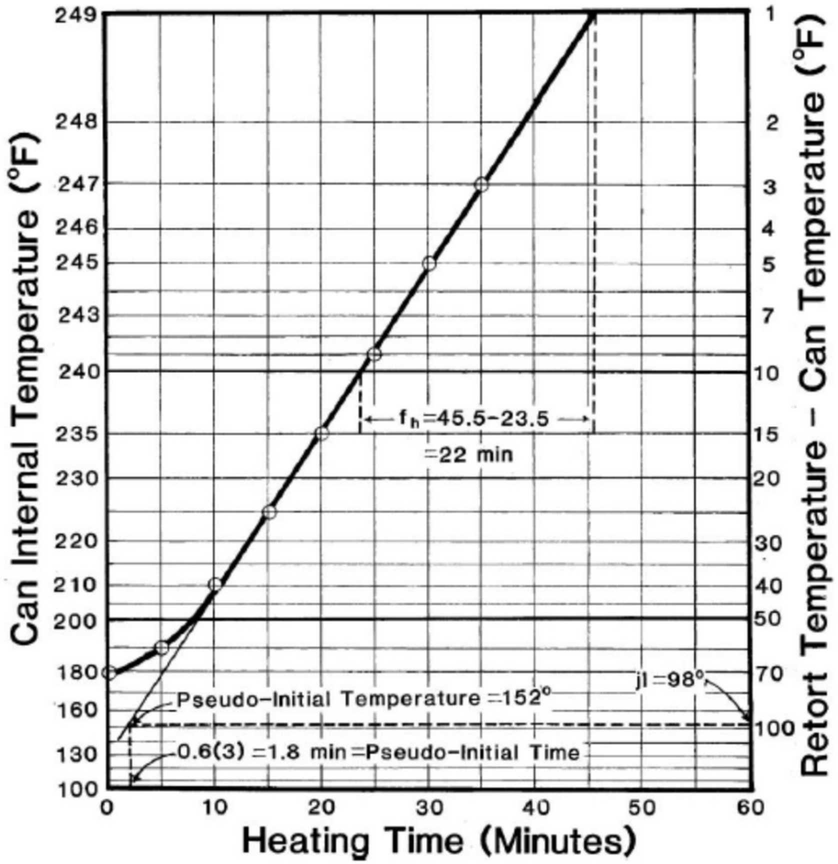
$$T = T_\infty - j_h I_h 10^{\frac{-t}{f_h}}$$

T_∞= Temperatura da Autoclave
T_0 = Temperatura inicial
I_h = Diferença Inicial de Temperatura = T_∞ - T_0
g = Diferença de temperatura entre a autoclave e o ponto frio do produto = T_∞ - T
f_h = Tempo necessário para que a diferença de temperatura entre a autoclave e o ponto frio do produto diminua em 1 ciclo logarítmico
t_{CUT} = Tempo de aquecimento da autoclave ("come up time")
t_{pi} = Tempo pseudo inicial = 0,6* t_{CUT}
T_{pi} = Temperatura na intersecção do prolongamento da reta com t_{pi}
j_h = Fator "lag" = $\frac{T_\infty - T_{pi}}{T_\infty - T_0}$



Temperatura no Aquecimento



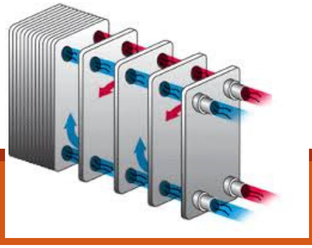


Temperatura da autoclave (T_∞) = 250 °F

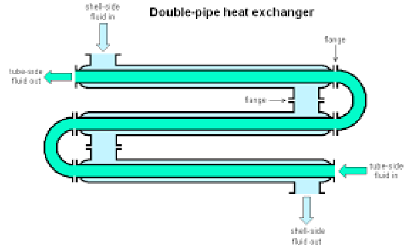
Tempo de aquecimento (t_{CUT}) = 3 min

Temperatura do meio resfriador = 60 °F

TOLEDO, R. T. Thermal Process Calculations In: TOLEDO, R. T. **Fundamentals of Food Process Engineering.** New York: Springer Science +Business Media, LLC, 2007. Cap. 9, p. 301-378.



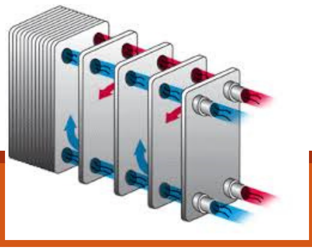
Processo Térmico Descontínuo



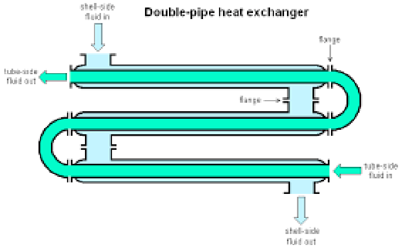
Dados de temperatura ao longo do processamento na autoclave

Time (min)	*Temp. (°F)*	*Time (min)*	*Temp. (°F)*
0	180	30	245
5	190	30 (cool)	245
10	210	35	235
15	225	40	175
20	235	45	130
25	241	50	101

TOLEDO, R. T. Thermal Process Calculations In: TOLEDO, R. T. **Fundamentals of Food Process Engineering.** New York: Springer Science +Business Media, LLC, 2007. Cap. 9, p. 301-378.



Temperatura no Resfriamento

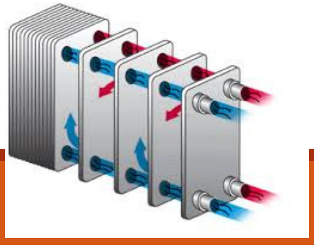


$$\frac{(T \quad - T_c)}{j_c I_c} = 10^{\frac{-t_c}{f_c}}$$

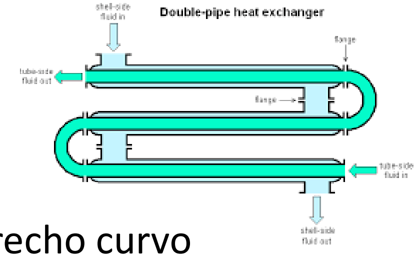
$$(T \quad - T_c) = j_c I_c 10^{\frac{-t_c}{f_c}}$$

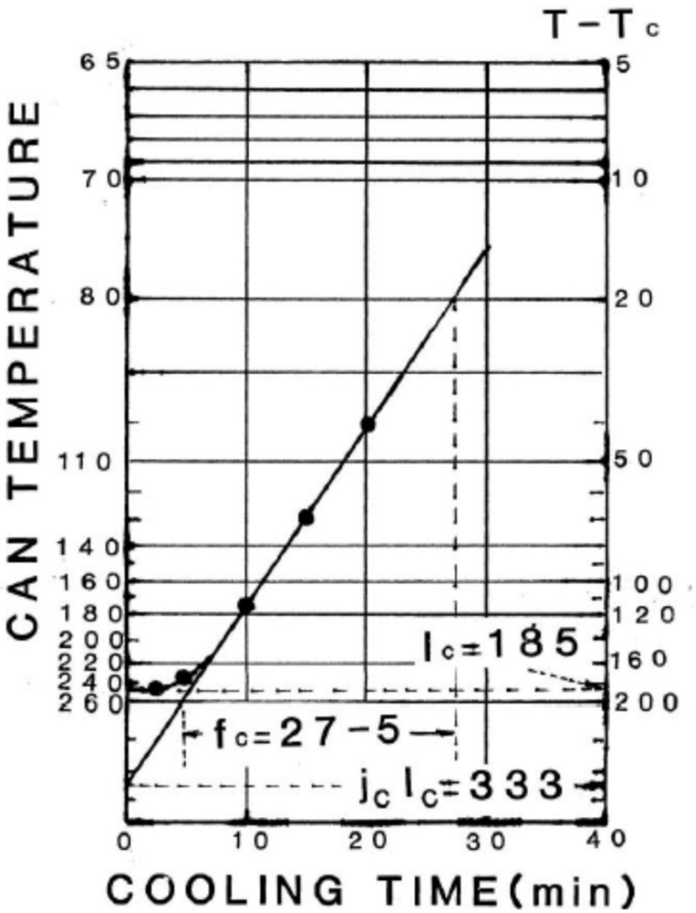
$$T = T_c + j_c I_c 10^{\frac{-t_c}{f_c}}$$

T_c= Temperatura da água de resfriamento
T_g = Temperatura do ponto frio no final do aquecimento
I_c = Diferença de Temperatura no início do resfriamento = T_g - T_c
f_c = Tempo necessário para que a diferença de temperatura entre a água de resfriamento e o ponto frio do produto diminua em 1 ciclo logarítmico
j_c = Fator "lag", sendo j_c I_c = a intersecção entre o prolongamento da reta com o tempo inicial do resfriamento (t_c = 0)



Processo Térmico Descontínuo





Hayakawa – função trigonométrica trecho curvo

$$T = T_c + \left[T_g - T_c\right]^{cos(Bt_c)}$$

$$B = \frac{1}{t_L}\left[arccos\left[\frac{log(j_c I_c) - \frac{t_L}{f_c}}{logI_c}\right]\right]$$

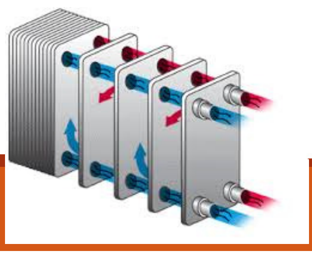
Ângulo em radianos

t_L = tempo para intersecção do trecho curvo com o trecho reto

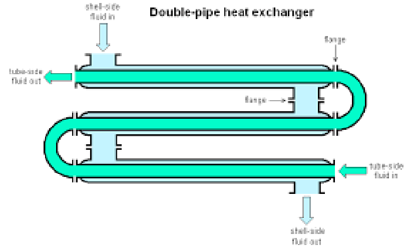
$$t_L = f_c\, log\left(\frac{j_c}{k}\right)$$

Valor típico k = 0,95

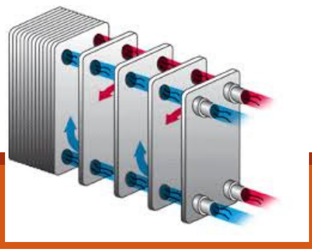
TOLEDO, R. T. Thermal Process Calculations In: TOLEDO, R. T. **Fundamentals of Food Process Engineering.** New York: Springer Science +Business Media, LLC, 2007. Cap. 9, p. 301-378.



Processo Térmico Descontínuo



			(Temp °F)	
Time (t_c)	E	A	$70 + 174.3^E$	$70 + (313.74)^A$
0	1	1	244.3	(383.7)
2	0.998	0.811	243.3	(324.5)
4	0.993	0.658	240.4	(276.4)
6	0.984	0.534	235.7	(237.3)
8		0.433		199.4
10		0.351		180.2
12		0.285		159.4
14		0.231		142.5
16		0.187		128.8



TOLEDO, R. T. Thermal Process Calculations In: TOLEDO, R. T. **Fundamentals of Food Process Engineering.** New York: Springer Science +Business Media, LLC, 2007. Cap. 9, p. 301-378.