

CAPÍTULO 8

Conservação pelo calor



No presente capítulo, estudam-se os parâmetros que definem a destruição dos microrganismos pelo calor. Descrevem-se ainda os tipos de tratamentos térmicos que se aplicam na prática e os equipamentos utilizados para isso.

INTRODUÇÃO

Um dos procedimentos físicos de que dispõe a Tecnologia de Alimentos para aumentar a vida útil dos mesmos é a destruição dos microrganismos pela ação letal do calor. Existem duas modalidades de tratamento térmico: uma, denominada *pasteurização*, que pretende fundamentalmente a higienização dos alimentos, e a outra, *esterilização*, cujo objetivo é a destruição dos microrganismos presentes, esporulados ou não, ou pelo menos de todos aqueles que possam multiplicar-se no produto final. Com o primeiro, procura-se obter o alimento isento de microrganismos patogênicos não-esporulados e, com o segundo, o alimento microbiologicamente estável para poder ser armazenado durante longo tempo em temperatura ambiente. Entre esses últimos alimentos encontram-se os chamados genericamente de conservas.

De maneira geral, admite-se que esse tipo de processamento foi inventado na transição do século XVIII ao XIX, quando Nicolás Appert, confeitoiro francês, observou que os alimentos aquecidos em recipientes fechados podiam se conservar durante longo tempo se o recipiente não fosse aberto. Os cientistas daquela época explicaram o êxito de Appert dizendo que, de uma forma mágica e misteriosa, o ar se combinava com o alimento, evitando a putrefação. Sem dúvida, estavam muito alheios ao que ocorria na realidade. Foi preciso esperar meio século, até as descobertas de Pasteur, para explicar corretamente a causa da estabilidade dos alimentos *apertizados*. Desde então, mesmo introduzindo-se sucessivas melhorias tecnológicas, continua-se esterilizando bom número de alimentos por esse procedimento.

COMPORTAMENTO DE MICRORGANISMOS E ENZIMAS DIANTE DA TEMPERATURA

A temperatura é um dos agentes que mais influem no crescimento microbiano, na atividade das enzimas e na velocidade de muitas reações químicas. Portanto, ajusta-se à equação de Arrhenius:

$$\log v = -Ea/2,303 RT + \log A \quad (8.1)$$

onde:

v = velocidade da reação

Ea = energia de ativação (J/mol)

R = constante universal dos gases (8,3144 J/mol K)

T = temperatura absoluta (K)

A = constante denominada fator de frequência

A representação gráfica da equação (8.1) é apresentada na Figura 8.1a, na qual a velocidade da reação aumenta proporcionalmente ao aumento da temperatura, o que é válido para as reações químicas dependentes da temperatura, como, por exemplo, a reação de Maillard. Contudo, quando se representa a atividade enzimática e o crescimento microbiano a partir de dados obtidos experimentalmente, têm-se, respectivamente, as curvas gerais *b* e *c* da Figura 8.1, que indicam que ambos se ajustam à equação de Arrhenius apenas em um intervalo de temperaturas. A atividade enzimática diminui proporcionalmente ao decréscimo da temperatura do meio; porém, quando esta aumenta, chega um momento em que se perde a linearidade, devido à desativação da enzima pela ação do calor.

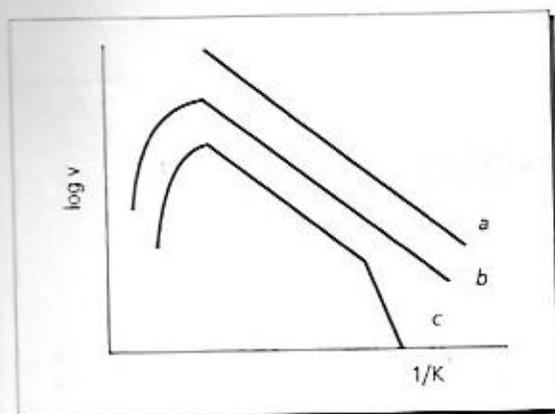


Figura 8.1 Representação de Arrhenius.

Do mesmo modo, pode-se dizer que o microrganismo cresce mais rapidamente (diminui o tempo de duplicação, g) quando aumenta a temperatura (Figura 8.1c), até atingir o valor (temperatura ótima de crescimento) no qual o gráfico muda bruscamente de curso, observando-se primeiro o decréscimo acentuado da velocidade de crescimento e, depois, sua cessação; isso se deve à destruição do microrganismo pela ação letal do calor. Contudo, e diferentemente do que ocorre com as enzimas, à medida que a temperatura diminui, desde o ponto ótimo, observa-se queda na velocidade de crescimento, até o momento, no ponto de inflexão do gráfico, em que o crescimento vai se tornando mais lento até cessar (temperatura diferente para cada tipo de microrganismo). Não necessariamente precisam ser os psicotróficos ou os psicrófilos, já que em meios congelados (até ao redor de -12°C) detectou-se crescimento de alguns microrganismos na fração líquida dos alimentos. A diminuição da velocidade de crescimento microbiano e sua cessação à medida que a temperatura diminui foram atribuídas à perda de atividade das permeases em baixa temperatura e/ou às mudanças na arquitetura da bicamada lipídica da membrana que impediram a combinação das permeases com os correspondentes substratos.

CINÉTICA DA DESTRUIÇÃO DOS MICRORGANISMOS PELO CALOR

Quando se aumenta a temperatura desde a máxima de crescimento de determinado microrganismo, primeiro, este é inibido e, depois, ocorrem lesões subletais no mesmo; ele pode ainda ser viável, porém é incapaz de multiplicar-se até que a lesão seja reparada; se a temperatura for suficientemente elevada, ocorrerá inevitavelmente a morte. Portanto, pode-se dizer, de forma geral, que qualquer temperatura acima da máxima de crescimento do microrganismo é letal para ele.

Os tratamentos térmicos letais provocam, nas populações microbianas homogêneas, decréscimo progressivo e ordenado de suas taxas, tanto mais elevado quando mais se prolonga o tempo de exposição. Embora se tenham observado exceções, está perfeitamente estabelecido que a destruição dos microrganismos pelo calor não é fortuita, mas segue progressão ordenada; ajusta-se essencialmente ao curso logarítmico. Isso foi demonstrado há quase um século, em 1920, para as formas esporuladas de *Bacillus stearothermophilus* e outras bactérias causadoras da alteração *flat sour* (acidificação sem produção de gás) de algumas conservas.

A natureza logarítmica da destruição dos microrganismos pelo calor explica-se perfeitamente de acordo com a equação geral das reações de primeira ordem:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-kt} \quad (8.2)$$

onde:

t = tempo

N_t = número de microrganismos em um tempo t

N_0 = número inicial de microrganismos

k = coeficiente de letalidade térmica (tempo^{-1})

O coeficiente de letalidade térmica define a destruição dos microrganismos durante um tratamento térmico. Contudo, na bibliografia, encontra-se com mais frequência o parâmetro denominado *tempo de redução decimal* (valor D), que se define como o tempo necessário, em uma determinada temperatura, para destruir 90% dos microrganismos presentes. O valor D é calculado a partir do gráfico de sobrevivência (Figura 8.2), que é a reta obtida ao representar o logaritmo do número de sobreviventes em função do tempo. O valor D é o tempo necessário para atravessar um ciclo logarítmico, sendo definido, com base na Figura 8.2, pela expressão:

$$D = t / (\log N_0 - \log N_t) \quad (8.3)$$

onde:

D = tempo de redução decimal (min)

t = tempo (min)

N_0 = número de microrganismos originalmente presentes

N_t = número de microrganismos após o tratamento térmico

O valor D também pode ser calculado a partir da equação da reta obtida pelo gráfico de sobrevivência, no qual:

$$D = 1/tg \alpha \quad (8.4)$$

A natureza logarítmica da morte dos microrganismos pela ação letal do calor indica que não é possível chegar ao zero absoluto de microrganismos, por mais que se prolongue o tempo de tratamento. Por exemplo, suponhamos que as formas esporuladas de *Bacillus subtilis* apresentem um $D_{110^{\circ}\text{C}} = 1$ min. A cada minuto de tratamento a 110°C serão destruídas 90%

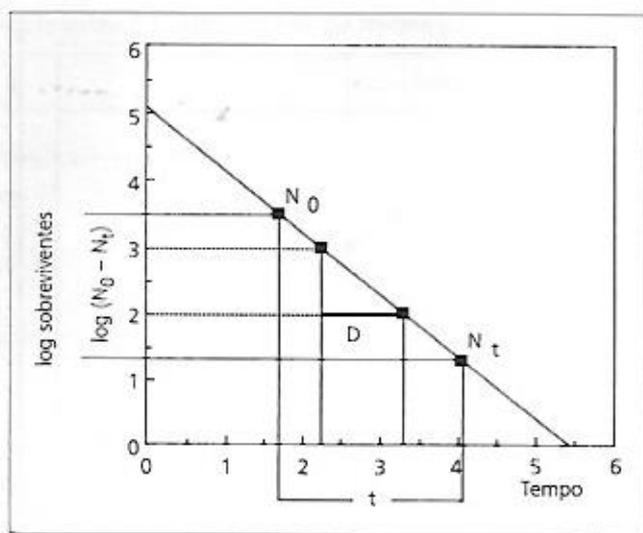


Figura 8.2 Gráfico de sobrevivência.

das células sobreviventes, obtendo-se reduções sucessivas de 90%, 99%, 99,9%, 99,99%, etc., isto é, os sobreviventes serão 10%, 1%, 0,1%, 0,01%, etc. Como não é possível obter a fração de microrganismo viável, em termos práticos, as reações sucessivas significam que haverá um esporo viável por determinada unidade de alimentos considerada (p. ex., por embalagem), 1 por embalagem, 1 para cada 10 embalagens, 1 para cada 100 embalagens, etc. Assim, o termo *esterilizado* não implica necessariamente que o produto esteja estéril em sentido microbiológico estrito e, por isso, é mais correto falar de *esterilidade comercial*, que costuma situar-se em valores de $1/10^4$ – $1/10^5$, isto é, o tratamento aplicado deve conseguir uma redução tal de microrganismos que o risco de alteração seja de 1 embalagem para cada 10.000 ou 100.000 fabricadas. Evidentemente, a intensidade do tratamento térmico poderia ser aumentada, conseguindo-se grau de esterilidade maior, mas essa possibilidade é limitada pelas mudanças químicas adversas que a aplicação de calor sempre acarreta, sobretudo no que se refere à qualidade organoléptica e ao valor nutritivo. O tecnólogo dos alimentos enfrenta, assim, o dilema entre diminuir o risco de alteração e elaborar um produto com mudanças mínimas na qualidade sensorial e nutritiva. É preciso chegar a um compromisso para aplicar o tratamento térmico mínimo, com o qual se pode conseguir a esterilidade comercial, mantendo o máximo de qualidade original.

A natureza logarítmica da morte dos microrganismos pelo calor indica também que obter a redução da carga microbiana até o nível desejado depende do número inicial de partida, o que implica, em termos práticos, a conveniência de processar alimentos com a menor contaminação possível.

A relação entre o coeficiente de letalidade térmica, k , e o valor D é deduzida da equação (8.2), que pode expressar-se, tomando logaritmos, como segue:

$$\log N_t = -kt \cdot \log e + \log N_0 \quad (8.5)$$

$$k = (\log N_0 - \log N_t) \cdot 2,303/t \quad (8.6)$$

quando $\log N_0 - \log N_t = 1$, obtém-se $t = D$, então:

$$k = 2,303/D \quad (8.7)$$

Para cada microrganismo, o valor D é específico da temperatura de tratamento. Por isso, precisa-se de um meio para relacionar os valores D a cada temperatura. Isso se faz pelo valor z , que é calculado a partir dos gráficos de termosterilização (Figura 8.3). Estes são construídos representando os logaritmos dos valores D em função da temperatura. O valor z é definido como o número de graus centígrados necessário para aumentar ou diminuir a temperatura a fim de que o valor D diminua ou aumente, respectivamente, 10 vezes. O valor z é definido pela seguinte expressão, deduzida do gráfico de termosterilização:

$$z = (T_2 - T_1)/(\log D_1 - \log D_2) \quad (8.8)$$

onde:

z = número de graus (°C)

T_1 e T_2 = temperaturas de tratamento (°C)

D_1 e D_2 = valores D às temperaturas anteriores

Os valores z para os esporos bacterianos costumam situar-se entre 7°C e 12°C e, para as bactérias não-esporuladas, entre 4°C e 6°C.

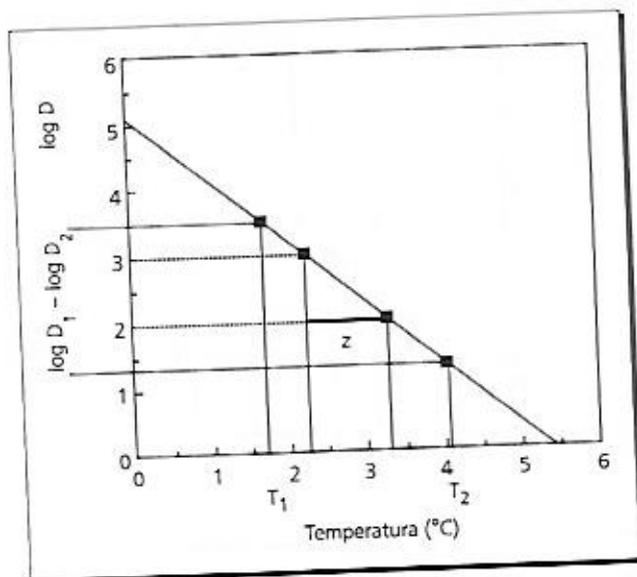


Figura 8.3 Gráfico de termodestruição.

TERMORRESISTÊNCIA DOS MICRORGANISMOS

A termorresistência microbiana depende de diversos fatores intrínsecos e extrínsecos. Os primeiros referem-se ao tipo de microrganismos e à forma como se encontram. Em geral, embora existam exceções, a termorresistência está relacionada com a temperatura ótima de crescimento. Os microrganismos psicrófilos e psicrotróficos são mais termolábeis que os mesófilos, e estes, mais que os termófilos. As bactérias esporuladas apresentam resistência maior ao calor do que as não formadoras de esporos, e, entre estas, as termófilas mais que as mesófilas. Com relação à morfologia e ao Gram, os cocos são, normalmente, mais termorresistentes que os bacilos, e as Gram positivas mais que as negativas. As leveduras e os mofos são bastante sensíveis à ação letal do calor; os ascósporos das leveduras, um pouco mais resistentes do que as formas vegetativas, e os esporos assexuais tendem a ser ligeiramente mais termorresistentes que o micélio.

Entre os fatores extrínsecos, vale citar o pH, a atividade de água e a composição (conteúdo de gordura, carboidratos, sais) do meio de aquecimento. No caso dos esporos, adquire relevância a composição do meio de esporulação e a temperatura a que a bactéria esporula. Todos esses fatores foram revisados por diversos autores, por exemplo, Frazier e Westhoff (1993) e Jay (1993 e 1996).

Na prática, o pH do alimento adquire grande importância. Por esse motivo, foi feita uma classificação dos alimentos referente a esse agente e à termorresistência de diferentes

microrganismos (Tabela 8.1). Nessa tabela, apresenta-se como exemplo a termorresistência típica de diferentes microrganismos esporulados. A separação entre alimentos pouco ácidos (pH maior que 4,5) e ácidos (pH entre 4 e 4,5) reside na termorresistência de *Clostridium botulinum*, já que os esporos dessa espécie não podem germinar em alimentos com um pH inferior a 4,5 e, portanto, não é necessário levar em conta o conceito 12D (ver mais adiante). Do mesmo modo, a separação dos alimentos ácidos e muito ácidos (pH menor que 4) deve-se ao fato de que nenhum esporo bacteriano pode germinar em pH inferiores a 4 e, portanto, pode-se diminuir bastante a intensidade do tratamento térmico para conseguir a estabilidade microbiológica.

A termorresistência aproximada dos microrganismos não-esporulados é apresentada na Tabela 8.2. Nesse caso, ganham importância as bactérias patogênicas não-esporuladas que precisam ser eliminadas na pasteurização.

VALOR F

É um parâmetro utilizado na indústria de conservas e pode ser definido como o tempo necessário, na temperatura definida, para reduzir a população microbiana presente no alimento até o nível desejado. Cada microrganismo existente no alimento tem seu próprio valor F, e o valor F aplicado ao alimento será o mais alto dos calculados. Quando o valor F refere-se a 121°C, é designado como F₀. O valor F é calculado supondo-se que o aquecimento e o resfriamento são instantâneos, a partir da expressão:

Tabela 8.1 Termorresistência aproximada de microrganismos esporulados

Microrganismo	$D_{121^{\circ}\text{C}}$ (min)	$D_{100^{\circ}\text{C}}$ (min)	$D_{65^{\circ}\text{C}}$ (min)
ALIMENTOS POUCO ÁCIDOS (pH maior que 4,5)			
1. Termófilos (esporos)			
1.1 Acidificantes <i>B. stearothermophilus</i>	4-5		
1.2 Alteração gasosa <i>Cl. thermosaccharolyticum</i>	3-4		
1.3. Produtores SH_2 <i>Cl. nigrificans</i>	2-3		
2. Mesófilos (esporos)			
2.1 Anaeróbios putrefativos <i>Cl. sporogenes</i> No 3679 <i>Cl. botulinum</i> (A e B)	0,1-1,5 0,1-0,2		
2.2 Aeróbios facultativos <i>B. subtilis</i>	0,1-0,3		
ALIMENTOS ÁCIDOS (pH de 4 a 4,5)			
1. Termófilos (esporos) <i>B. coagulans</i>	0,01-0,07		
2. Mesófilos (esporos) <i>B. macerans</i> e <i>B. polymixa</i> Anaeróbios butíricos		0,1-0,5 0,1-0,5	
ALIMENTOS MUITO ÁCIDOS (pH menor que 4,0)			
1. Em pH menor que 4 não crescem os esporos			
2. Mesófilos não-esporulados <i>Lactobacillus</i> spp., mofos, leveduras, etc.			0,5-1

$$F = D (\log N_0 - \log N_t) \quad (8.9)$$

onde:

F = tempo (min) requerido para atingir o grau de redução da população microbiana até o nível desejado

D = tempo de redução decimal à temperatura de tratamento

N_0 = número inicial de microrganismos

N_t = número a que se pretende chegar

O *Cl. botulinum* elabora uma potente neurotoxina quando se multiplica nos alimentos. Como se trata de bactéria anaeróbia e o meio é anóxico nas conservas, o *Cl. botulinum* pode crescer e produzir a toxina. Devido à necessidade de salvaguardar a saúde do consumidor, sempre se supõe, ao esterilizar um alimento de pH superior a 4,5, que existe um esporo de *Cl. botulinum* por embalagem, e é necessário reduzir seu número a um esporo viável para cada bilhão de emba-

lagens (10^{12}), isto é, o tratamento térmico deve provocar 12 reduções decimais; é o que se conhece como conceito 12D. Sabe-se que o valor F_0 mínimo para as conservas de alimentos de pH superior a 4,5 é 2,52; calculou-se a partir da equação (8.9):

$$F_0 = D (\log 1 - \log 10^{-12})$$

Considerando que o valor D_{121} dos esporos das cepas mais termorresistentes de *Cl. Botulinum* é 0,21 min, então,

$$F_0 = 0,21 (\log 1 - \log 10^{-12}) = 2,52 \text{ min}$$

Esse é o tempo mínimo necessário para a fabricação de alimentos esterilizados com pH superior a 4,5. Quando se esterilizam alimentos em outras temperaturas, é preciso calcular o F equivalente levando em conta o valor z do *Cl. botulinum*, a que se atribui um valor de 10°C . Em alimentos com pH inferior a 4,5, não é necessário aplicar o conceito 12D.

Tabela 8.2 Termorresistência aproximada de microrganismos não-esporulados

Microrganismo	$D_{65^{\circ}\text{C}}$ (min)	$D_{60^{\circ}\text{C}}$ (min)	$D_{55^{\circ}\text{C}}$ (min)
1. Termófilos			
<i>Streptococcus thermophilus</i>	10-20		
<i>Lactobacillus</i> spp.	10-20		
2. Mesófilos			
2.1 Termorresistência típica			
<i>Salmonella</i> spp.		1-3	
<i>Escherichia coli</i>		1-3	
<i>Lactobacillus</i> spp.		1-3	
2.2 Termorresistência atípica			
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>		10-20	
<i>Salmonella senftenberg</i>		10-20	
3. Psicrófilos			1-5
<i>Pseudomonas fragi</i>			1-5
<i>Pseudomonas fluorescens</i>			1-5
4. Psicrófilos			0,1
<i>Vibrio marinus</i>			0,1
<i>Serratia</i> spp.			0,1

O cálculo do valor F da conserva será exemplificado com um caso prático:

Pretende-se fabricar sardinhas em lata (pH 6) decoradas com louro e pimenta preta em embalagens de 100 g. As análises microbiológicas revelaram que os ingredientes, em seu conjunto, contêm um esporo de *B. stearothermophilus*/100 g e 100 esporos de *Cl. sporogenes*/100 g. Os valores D_{121} são, respectivamente, 4 min e 1,5 min, e a esterilidade comercial foi estabelecida em $1/10^4$. Calcule-se o F_0 .

É preciso aplicar o conceito $12D$ por ser o pH superior a 4,5.

Valor F_0 para *Cl. botulinum* = 2,52 min.

Valor F_0 para *B. stearothermophilus*.

$$F_0 = 4 (\log 1 - \log 1/10^4) = 16 \text{ min}$$

Valor F_0 para *Cl. sporogenes*

$$F_0 = 1,5 (\log 100 - \log 1/10^4) = 9,0 \text{ min}$$

O valor F_0 da conserva será de 16 min.

Todas as considerações feitas anteriormente são aplicáveis quando os aquecimentos e resfriamentos são instantâneos, o que, na prática, nem sempre é possível; somente os processos UHT aproximam-se dessa situação ideal. Nas conservas, processadas em autoclaves, isso é impossível; a tem-

peratura sobe lentamente, mais ainda quando a transferência de calor é baixa, até alcançar a temperatura programada. O mesmo pode-se dizer do resfriamento. Considerando que para qualquer microrganismo podem-se ter como letais todas as temperaturas superiores à máxima de crescimento, os efeitos do tratamento térmico começam quando se supera esse limite. Por isso, é preciso levar em conta também as diferentes temperaturas pelas quais passa o produto até alcançar a de trabalho e, igualmente, durante o resfriamento. No caso das bactérias esporuladas, considera-se que os efeitos letais manifestos começam quando se chega a temperaturas próximas de 90°C . É necessário, portanto, determinar o efeito letal do processo completo; os métodos mais frequentes baseiam-se na construção de curvas de aquecimento/resfriamento, obtidas representando as temperaturas pelas quais passa o centro térmico da embalagem ao longo do tempo e depois transformando-as em frações de tempo. Posteriormente, calcula-se o efeito letal para cada fração. O efeito letal do processo completo pode ser descoberto mediante métodos gráficos ou matemáticos. Visto que, na prática, pelas razões explicadas no próximo item, não se pode avaliar o valor F para cada partida, não é necessário estender-se mais neste aspecto. Contudo, remete-se o leitor a obras nas quais encontrará a descrição detalhada dos métodos mencionados (Stumbo, 1973; López, 1987; Toledo, 1991).

APLICAÇÃO PRÁTICA DE TRATAMENTOS TÉRMICOS

O caráter perecível dos alimentos não possibilita que, na prática, para cada produto (ou para cada partida), se realizem as análises adequadas a fim de determinar a carga microbiana, identificar os microrganismos presentes, isolá-los, propagá-los e determinar seus parâmetros termomicrobiológicos, para que depois se possa avaliar com precisão o valor F em cada caso. Todas essas determinações exigem tempo bastante longo, de tal forma que, quando se obtivessem os resultados, o alimento já estaria inevitavelmente alterado. Por isso, na prática, aplicam-se tratamentos térmicos normalizados que foram calculados previamente considerando a carga microbiana normal que os diversos produtos podem apresentar e a termorresistência de uma série de microrganismos que foram isolados, com muita frequência, em conservas alteradas.

Para os alimentos pouco ácidos (pH superior a 4,5), como carne, leite, peixe e algumas hortaliças, é necessário pensar na possível presença de *Cl. botulinum* e, portanto, aplicar o conceito 12D. Conseqüentemente, o valor F_0 mínimo é de 2,52 minutos. Contudo, visto que o alimento pode conter microrganismos esporulados mais termorresistentes que o *Cl. botulinum*, o tratamento térmico pode ser suficiente do ponto de vista da saúde pública, porém insuficiente para chegar à esterilidade comercial. Por isso, é necessário aumentar a intensidade do tratamento. Os valores F_0 que se aplicam são, portanto, superiores, na ordem de 10 a 12 minutos, com o que se conseguem reduções de 7 a 8D com relação às formas esporuladas do microrganismo (*Cl. sporogenes* PA-3769, $D_{121} = 1,5$ min) normalmente tomado como modelo, sempre que o produto processado tem como destino a comercialização em países de clima temperado, onde as temperaturas no verão não costumam ultrapassar a faixa de 30°C a 32°C. Se a comercialização do alimento esterilizado for feita em países ou zonas geográficas de climas quentes (temperaturas máximas superiores a 35°C ou 40°C), é necessário considerar a possível presença de bactérias esporuladas termófilas, cuja termorresistência é significativamente superior à de *Cl. sporogenes*, de *Cl. botulinum* e de outras bactérias mesófilas. É o caso de *Bacillus stearothermophilus* e *Thermoanaerobacterium* (*Clostridium*) *thermosaccharolyticum* ($D_{121} = 4$ a 5 min), que não se multiplicam abaixo de 33°C a 36°C. Nessas circunstâncias, aplicam-se valores F_0 de 14 a 20 min, que causam reduções de 4 a 5D dos esporos desses microrganismos tomados como modelos.

Em alimentos ácidos (pH 4 a 4,5), como concentrados de tomate, pimentões, alimentos com molho de tomate e outros, não há risco sanitário nenhum no que se refere à produção de toxina botulínica. Entretanto, as bactérias esporuladas que podem multiplicar-se a esses valores de pH são mais termolábeis do que as anteriores; por isso, os tratamentos térmicos utilizados são mais suaves e geralmente se ajustam para

reduzir a um nível aceitável o desenvolvimento de *Bacillus coagulans* (D_{121} aprox. 0,07), o que permite, ao mesmo tempo, evitar a alteração por outras bactérias esporuladas mesófilas (p. ex., *Bacillus macerans* ou *Clostridium butyricum*), que são mais termolábeis que a anterior. Nessas circunstâncias, é suficiente um valor F_0 de 0,7 min.

Os alimentos muito ácidos, com pH inferior a 4 (frutas em geral, alimentos em escabeche, etc.), não podem sofrer outras alterações a não ser aquelas decorrentes do crescimento de mofo e leveduras, uma vez que nenhuma bactéria esporulada nem a grande maioria das vegetativas podem multiplicar-se a esses valores de pH. Esse tipo de alimento não necessita de tratamentos térmicos superiores a 100°C; portanto, eles podem ser fabricados sem a necessidade de pressão. Para esses produtos, não é conveniente utilizar a temperatura de 121°C como referência; por isso, os valores D dos microrganismos e os F apresentam-se a temperaturas muito mais baixas (65°C a 85°C). Costumam-se aplicar tratamentos de F_{65} de 1 a 2 min. Contudo, quando se suspeita da presença de *Byssochlamys fulva*, deve-se aumentar a intensidade do tratamento para evitar a alteração por esse mofo, cujos ascósporos são muito termorresistentes; mostrou-se inclusive que, para a destruição desse mofo, faz-se necessário o valor $F_{80°C}$ de 2 min.

Os valores F_0 apresentados anteriormente servem como referência para conhecer os tratamentos térmicos necessários para conseguir a esterilização comercial nos diversos alimentos. Porém, na prática, nem sempre se adota a temperatura de 121°C. Para conseguir esse grau de esterilidade, as temperaturas oscilam entre 115°C e 150°C; as mais baixas são empregadas para a fabricação de alimentos apertizados (conservas), e as mais altas, para alimentos líquidos ou semi-líquidos em fluxo contínuo seguido de acondicionamento asséptico. A transformação do F_0 no valor F em outra temperatura é obtida mediante o valor z , aplicando a equação (8.8), na qual o valor D é substituído pelo F . O valor z das bactérias esporuladas costuma situar-se entre 7°C e 12°C. A maioria dos autores opina que, de forma geral, pode-se utilizar um $z = 10°C$.

TIPOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS

Os tipos de tratamentos térmicos aplicados atualmente aos alimentos correspondem a três modalidades: esterilização, pasteurização e termização.

Esterilização

Com a esterilização, pretende-se destruir os microrganismos mais termorresistentes para conseguir a esterilidade comercial. O objetivo desse tipo de tratamento são as

bactérias esporuladas. A esterilização preocupa-se muito menos com as enzimas autolíticas, já que estas são muito mais termolábeis que os esporos microbianos. Contudo, nos alimentos, pode haver certas enzimas de origem microbiana, aquelas produzidas por bactérias psicrotróficas, que são mais termorresistentes que os esporos e não se desativam totalmente nem sequer durante os processos UHT aplicados aos alimentos, especificamente ao leite e a certos produtos lácteos. É o aspecto do qual se tratará extensamente no capítulo dedicado ao processamento do leite (Volume II, Capítulo 3).

A esterilização pode ser feita de duas formas: em embalagens já preenchidas ou aquecendo o alimento sem embalar (UHT) e acondicionando-o, depois, assepticamente.

Esterilização de alimentos acondicionados

As embalagens utilizadas para a esterilização de alimentos mediante essa modalidade são latas, garrafas de vidro ou sacos de plástico termoestável. Qualquer que seja o tipo de embalagem utilizado, o tratamento térmico é precedido do preenchimento, da evacuação do ar e do fechamento. As embalagens são fornecidas comercialmente limpas, embora isso não garanta que possam ser utilizadas de imediato. Para tanto, é necessário assegurar sua limpeza antes de preenchê-las. As embalagens metálicas e de vidro são lavadas com duchas de água quente ou com escovas rotatórias; depois, são transportadas invertidas até a seção de preenchimento para evitar a entrada de microrganismos em seu interior.

As máquinas de enchimento variam se o produto for líquido, pastoso ou sólido. Em qualquer caso, elas devem assegurar um preenchimento preciso e ser versáteis para permitir a utilização de embalagens de diferentes tamanhos e a sua manutenção em condições higiênicas adequadas.

Quando a embalagem fechada é aquecida, seu conteúdo se expande, aumenta a pressão de vapor d'água, e os gases dissolvidos escapam do produto. Cria-se uma pressão interna que, em parte, se equilibra com a resistência da embalagem, mas que, se for excessiva, pode provocar o rompimento da embalagem ou a ocorrência de fugas. Para evitar isso, deixa-se uma parte da embalagem vazia sobre o alimento; é o espaço de cabeça. Esse espaço não apenas serve para a expansão de líquidos e gases, como também facilita a transmissão de calor durante a agitação do produto na autoclave. A pressão de vapor no espaço de cabeça é determinada pela temperatura que o produto atinge; contudo, também pode reduzir-se mediante a evacuação da embalagem, o que, além disso, provoca redução da tensão de oxigênio; assim, evitam-se a interação desse gás com as embalagens metálicas e as possíveis oxidações de componentes dos alimentos, como lipídeos insaturados e certas vitaminas.

Existem diversos métodos para realizar a evacuação da embalagem:

1. *Evacuação mecânica*: consiste em fechar a embalagem a frio, depois de cheia, sob vácuo produzido mecanicamente.
2. *Preenchimento a quente em temperaturas próximas do ponto de ebulição*: gera-se, assim, a pressão de vapor próxima a 100 kPa no espaço de cabeça, de forma que, se a embalagem é fechada rapidamente, produz-se o vácuo adequado ao esfriar. Esse método extrai eficazmente os gases retidos no alimento, proporcionando, além disso, um preaquecimento muito útil para abreviar o tempo de processamento.
3. *Evacuação a quente*: consiste em transportar as embalagens abertas por banho de água ou câmara de vapor onde se aquece o produto até 80°C a 90°C. As embalagens evacuadas são fechadas após a saída das câmaras quentes. Por esse método, o tempo de evacuação pode ser excessivamente longo no caso de alimentos aquecidos por condução.
4. *Fechamento por corrente de vapor*: passa-se um jato de vapor pela parte superior da embalagem já cheia. Depois, coloca-se automaticamente a tampa, também aquecida por vapor, e a embalagem é fechada. Uma vez que não se eliminam os gases retidos no produto, o fechamento deve ser precedido de aquecimento.

O fechamento das embalagens metálicas costuma ser feito com dupla costura, sendo que a primeira é obtida colocando-se a lata e o tapador, sobressaindo a borda que se ajusta com outro rolo. As embalagens de vidro são fechadas com tampa de rosca, coroa, quarto de volta, pressão, etc.

O método mais comum para o aquecimento de alimentos em embalagens fechadas é a aplicação de vapor d'água saturado. Visto que as temperaturas utilizadas para a esterilização dos alimentos pouco ácidos e ácidos são superiores a 100°C (de 110°C a 125°C), é necessário empregar sistemas a sobrepressão, fazendo uso de autoclaves. A aplicação do calor deve ser feita lentamente para evitar mudanças térmicas bruscas no alimento e deformações ou rompimentos das embalagens. Quando a temperatura do alimento se aproxima da temperatura da autoclave, a pressão interna da embalagem se equilibra parcialmente com a pressão do vapor que envolve as embalagens. Contudo, na fase de aquecimento, o alimento está com a pressão inferior à da autoclave; por isso, as embalagens estão sendo comprimidas, ocorrendo o contrário durante o resfriamento. Portanto, é necessário reduzir ao mínimo essas diferenças de pressões, o que se consegue regulando a velocidade de aquecimento e resfriamento e, também, aplicando ar à pressão que equilibra a pressão interna da em-

balagem durante o resfriamento. Para que o aquecimento do alimento seja homogêneo, as autoclaves podem ser providas de sistemas de agitação (giro, volteio ou vaivém), que facilitam o movimento do líquido de cobertura, criando-se correntes de convecção.

Os esterilizadores descontínuos são autoclaves verticais (carga pela parte superior) ou horizontais (carga frontal) que se carregam e descarregam cada vez que se processa um lote; podem receber número diferente de embalagens, dependendo do tamanho da autoclave. O consumo de água é elevado em comparação com o das autoclaves contínuas (hidrostáticas).

Na Figura 8.4, apresenta-se o esquema de uma autoclave descontínua vertical. Quando a carga se completa, fecha-se a tampa da autoclave, que depois é ajustada com fechos de rosca; em seguida, põe-se em funcionamento, se houver, o sistema de agitação, e começa-se a injetar vapor, que vai aquecendo o produto ao mesmo tempo em que se eliminam as bolhas de ar que pode haver no interior. Quando se considera que já não há mais essas bolhas, fecha-se a válvula de escape e começa o aquecimento acima de 100°C , com o conseqüente aumento da pressão até o valor programado (p. ex., até 75 kPa, equivalentes a $116,4^{\circ}\text{C}$); a válvula de controle é aberta ao se exceder a pressão estabelecida. Permanecem esses va-

lores enquanto perdura o tratamento e, ao ser concluído, começa o resfriamento, podendo-se reduzir a pressão lentamente com a ajuda da injeção de ar comprimido. Uma vez restituída a pressão atmosférica e tendo esfriado suficientemente, a autoclave é aberta e descarregada.

Entre os esterilizadores contínuos, o mais comum talvez seja o hidrostático (Figura 8.5). Consta, essencialmente, de uma zona central que se comunica com dois ramais laterais. Quando o sistema está parado, as colunas de água dos ramais laterais estão equilibradas, à mesma altura que aquela contida na zona central; ele é acionado por meio de injeção de vapor d'água na zona central, que vai empurrando para baixo a água contida nessa zona, com o conseqüente deslocamento para cima da água dos ramais laterais. Na zona central, a pressão e a temperatura vão aumentando até os valores programados, e, ao mesmo tempo, cria-se um gradiente de temperatura na água dos ramais. Por uma esteira rolante, com suportes adequados para acomodar as embalagens cheias e fechadas, transporta-se o produto do local de carga; ele vai sendo aquecido progressivamente pelo ramal da esquerda até entrar na zona central, onde se esteriliza; o tempo que demora para percorrer a zona de vapor é o tempo do processamento. Depois, as embalagens passam ao ramal da direita, onde sua temperatura vai diminuindo progressivamente, sofrendo

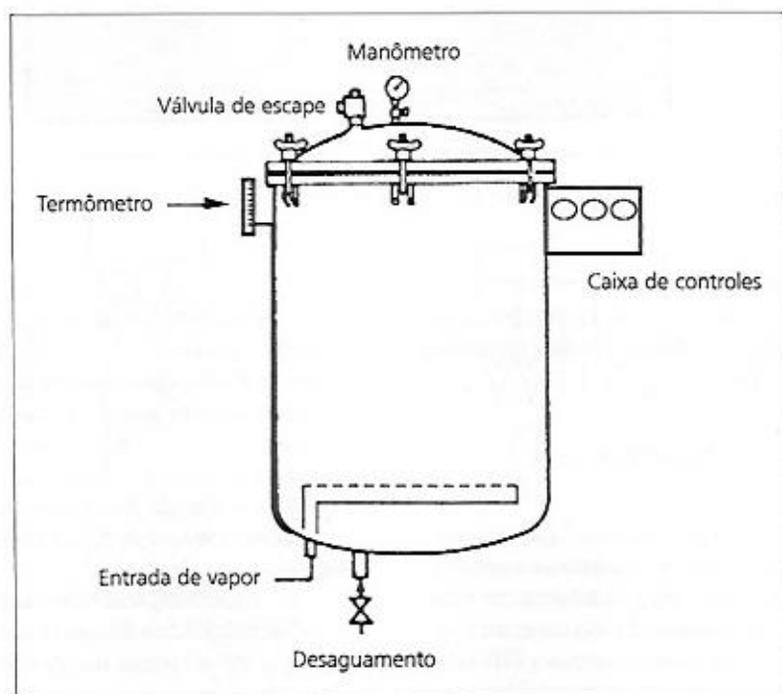


Figura 8.4 Esquema de uma autoclave descontínua vertical.

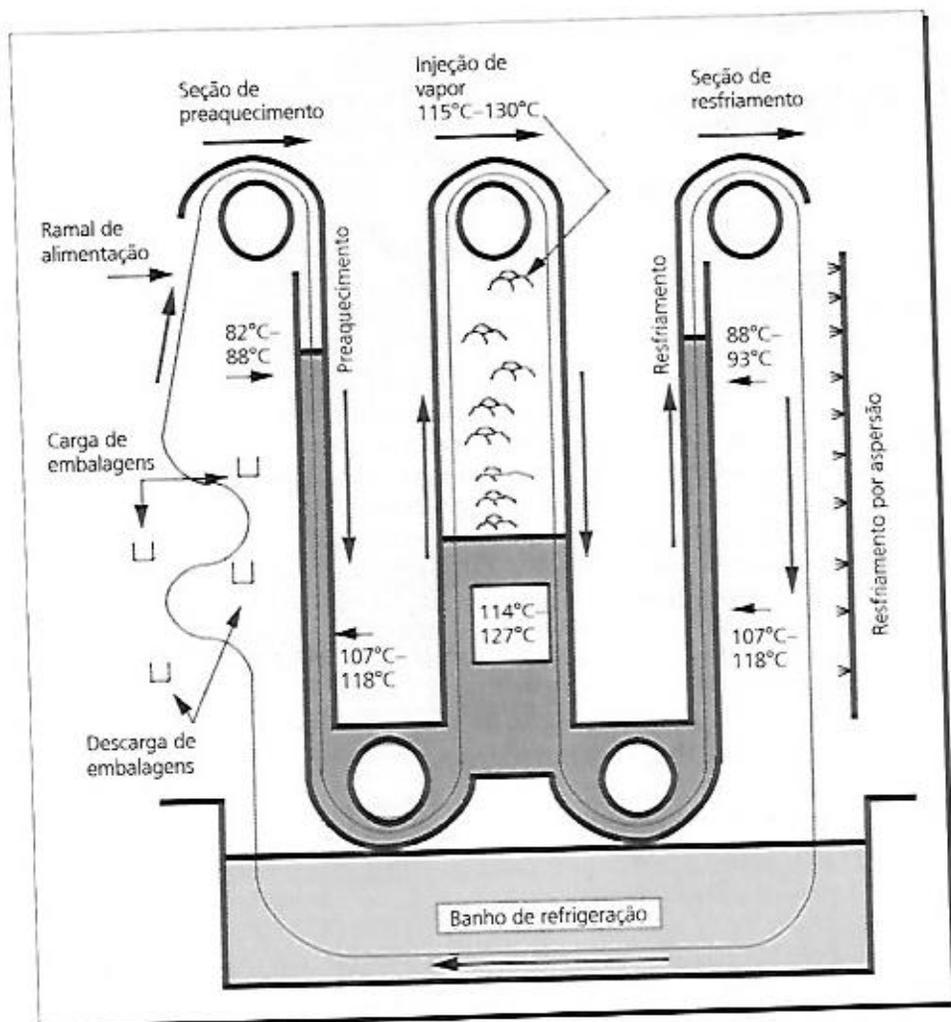


Figura 8.5 Esterilizador hidrostático.

resfriamento adicional mediante duchas e a passagem posterior pelo banho de água, até chegarem ao final do circuito, quando são descarregadas.

Esterilização de alimentos sem acondicionar

Esse método é utilizado para alimentos líquidos e semilíquidos (leite, sopas, nata, purês, etc.). Consiste no aquecimento muito rápido (quase instantâneo) até temperaturas muito altas (135°C a 150°C) que se mantêm durante um tempo muito curto (2 a 5 segundos). Denominam-se processos UHT (*ultra high temperature*) e apresentam-se em duas modalidades:

1. Processos indiretos, nos quais o aquecimento é feito mediante trocadores de calor (tubulares ou de placa); por-

tanto, não há contato entre o fluido calefator (vapor d'água) e o alimento.

2. Processos diretos, que consistem na injeção de vapor d'água no alimento (método de injeção) ou na injeção do alimento em vapor d'água (método de difusão). Nesse tipo de processo, há contato íntimo entre o agente calefator e o alimento, e o aquecimento é praticamente instantâneo, passando de 85°C a 140°C em décimos de segundos.

Por esse método, sempre se condensa uma porção do vapor, provocando a diluição do produto em cerca de 10%, que depois é preciso corrigir mediante a aplicação de vácuo.

Na Figura 8.6, mostra-se o diagrama simplificado do processo UHT indireto. O produto procedente do tanque de ar-

mazenamento (1) é impulsionado pela bomba (2) até a seção de regeneração (3), onde começa a ser aquecido mediante o trocador de calor com a energia que o produto processado ainda mantém. O aquecimento até 80°C a 85°C completa-se com o trocador (4) de baixa pressão e no trocador-regenerador (5), passando depois ao trocador (6) onde se produz a esterilização do produto. O sistema de aplicação de vapor que opera pneumáticamente a 300 a 400 kPa mantém a temperatura (135°C a 150°C) por um tempo curto (2 a 4 segundos). Se a temperatura cai abaixo do valor programado, a válvula de desvio de fluxo (T) conduz o produto ao tanque de armazenamento (1) antes do resfriamento no trocador (8). Se a temperatura do tratamento foi correta, o produto passa pelos trocadores-regeneradores (5 e 3) e, posteriormente, é levado à temperatura (10°C a 14°C) da embalagem asséptica mediante o trocador (7). Após o uso, a instalação é esterilizada automaticamente com vapor (ou água pressurizada a 145°C até 155°C).

Na Figura 8.7, mostra-se um diagrama de fluxo simplificado do processo UHT direto. O produto é impulsionado do tanque de armazenamento (1) pela bomba (2) até o trocador-regenerador (3), onde começa a ser aquecido; e depois é levado a 80°C ao trocador (4). Nesse ponto, é bombeado ao injetor de vapor (5) a uma pressão de 800 a 1000 kPa. O vapor transfere seu calor latente ao produto, atingindo de imediato a temperatura de esterilização (140°C a 150°C), na

qual permanece por um tempo curto (2 a 4 segundos) no tubo de manutenção. A temperatura é controlada pelo termômetro T-1, onde uma válvula de desvio de fluxo conduz o produto ao trocador (9) se ela é inferior à estabelecida. Se está correta, o produto resfria até 75°C por expansão na câmara de vácuo (6), onde se elimina também o vapor d'água que condensou. O vapor dessa câmara é utilizado para o trocador-regenerador (3), controlando-se sua temperatura no registro (T-2). Ao abandonar a seção (6), o produto é impulsionado pela bomba (7) até um trocador estéril (8), onde resfria até a temperatura da embalagem asséptica.

O curso térmico dos dois tratamentos está representado na Figura 8.8; pode-se considerar que o aquecimento de 80°C até a temperatura de tratamento é instantâneo, no caso do UHT direto, enquanto a transferência de calor mediante os trocadores (UHT indireto), embora rápida, não chega à do UHT direto. As vantagens e os inconvenientes de um e outro tratamento com relação à qualidade sensorial, à retenção de nutrientes e ao progresso de certas reações serão descritos detalhadamente para o leite UHT no capítulo correspondente (Volume II, Capítulo 3).

A esterilização de alimentos pelos processos UHT requer, obviamente, acondicionamento asséptico. Vários métodos (*tetrapack*, *supack*, *purePack*, *selfpack*, em garrafas, etc.) foram registrados, mas o mais difundido na Europa é o *tetrabrick* (Figura 8.9). O rolo (1) de papelão laminado

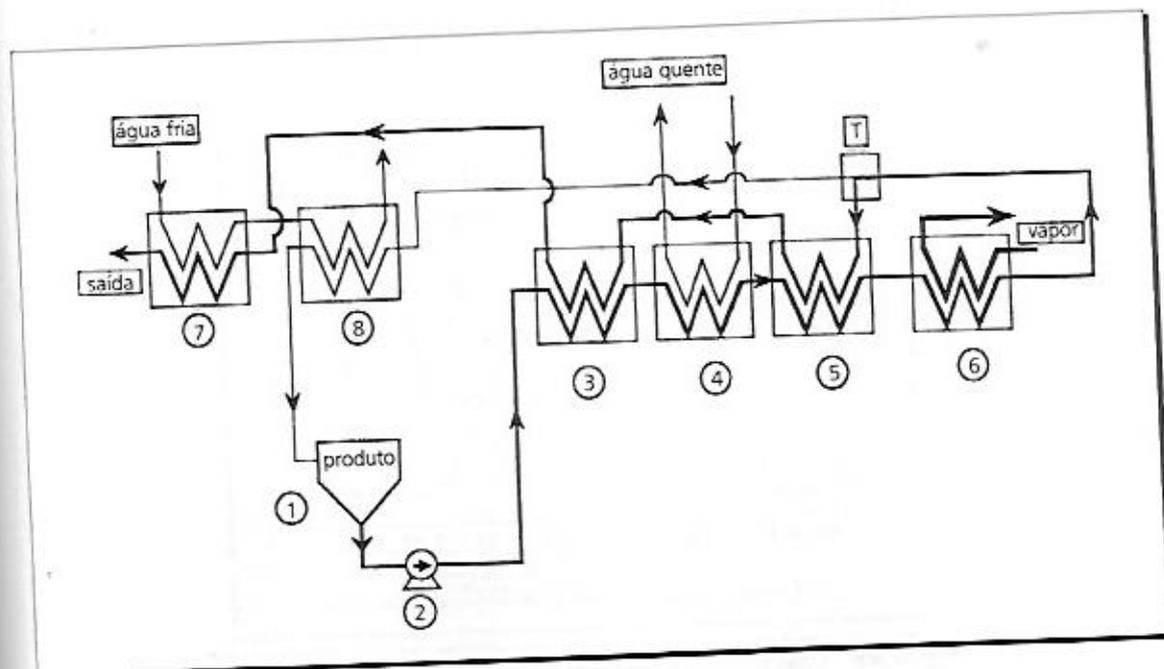


Figura 8.6 Diagrama de fluxo do processo UHT indireto.

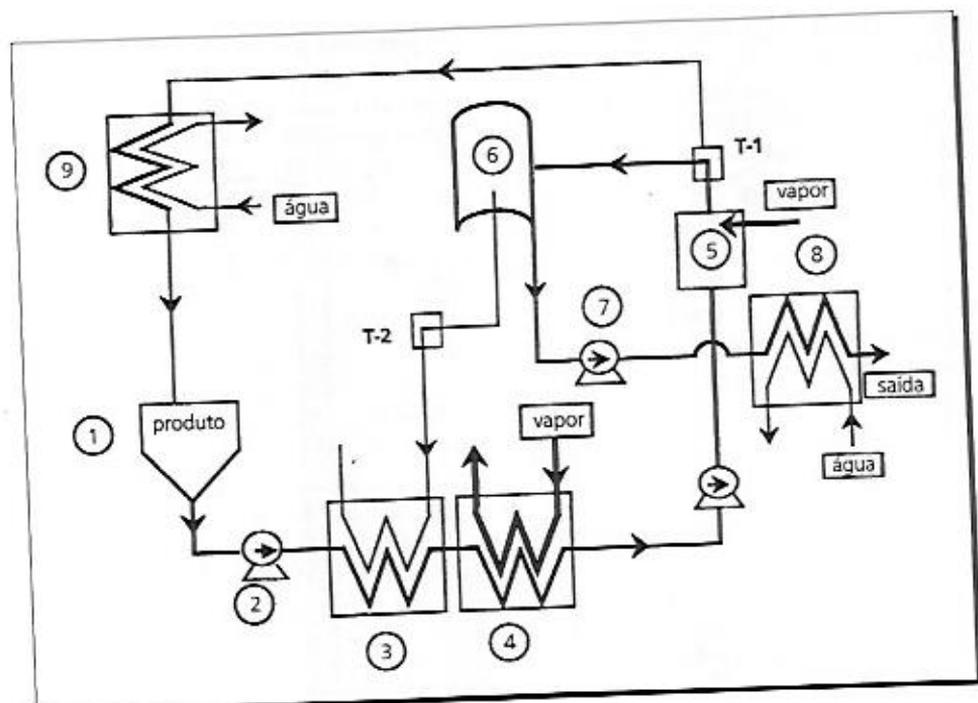


Figura 8.7 Diagrama de fluxo do processo UHT direto.

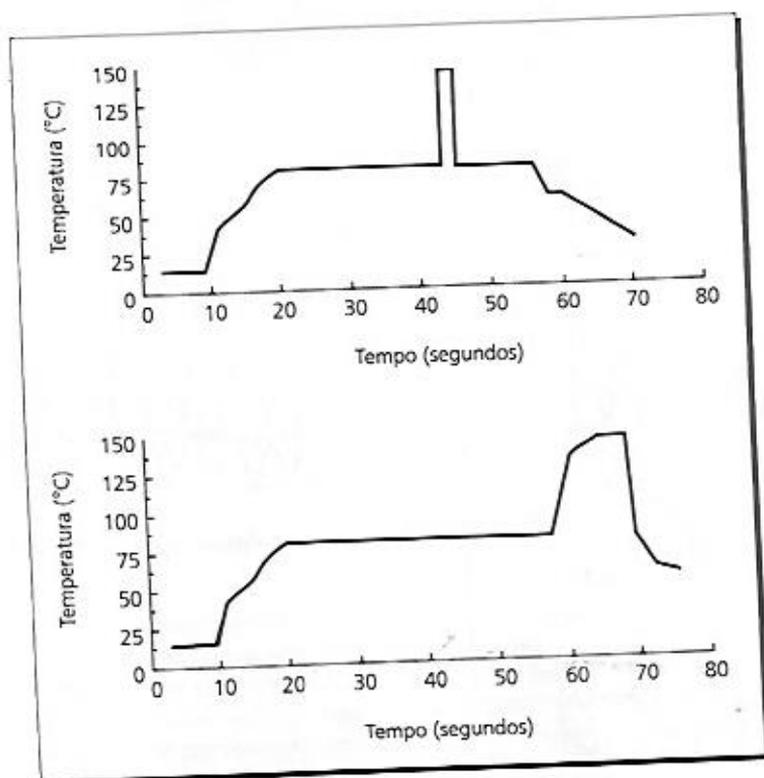


Figura 8.8 Curso térmico dos processos UHT direto (superior) e indireto (inferior).

(polietileno/papelão/polietileno/alumínio/polietileno) é esterilizado a 80°C pelo banho de peróxido de hidrogênio a 17% (2) durante 8 a 10 segundos, eliminando-se os restos do peróxido de hidrogênio com a corrente de ar estéril por filtração. Em seguida, o rolo entra na câmara asséptica, esterilizada com ar quente e filtração. A tubulação (4) procedente do esterilizador UHT chega a essa câmara, onde a embalagem é moldada, recebe o volume adequado de alimento, é fechada a quente e depois cortada com guilhotinas transversais (5).

Pasteurização

A pasteurização visa destruir os microrganismos patogênicos não-esporulados e reduzir significativamente a microbiota banal, de modo a oferecer ao consumidor um produto seguro, com vida útil aceitável, para ser consumido em pouco tempo. Às vezes, pode-se conseguir a estabilidade microbiológica do produto, como é o caso do vinagre, em que se pretende destruir a microbiota mais termorresistente (mofos e leveduras) capaz de desenvolver-se em pH tão baixo.

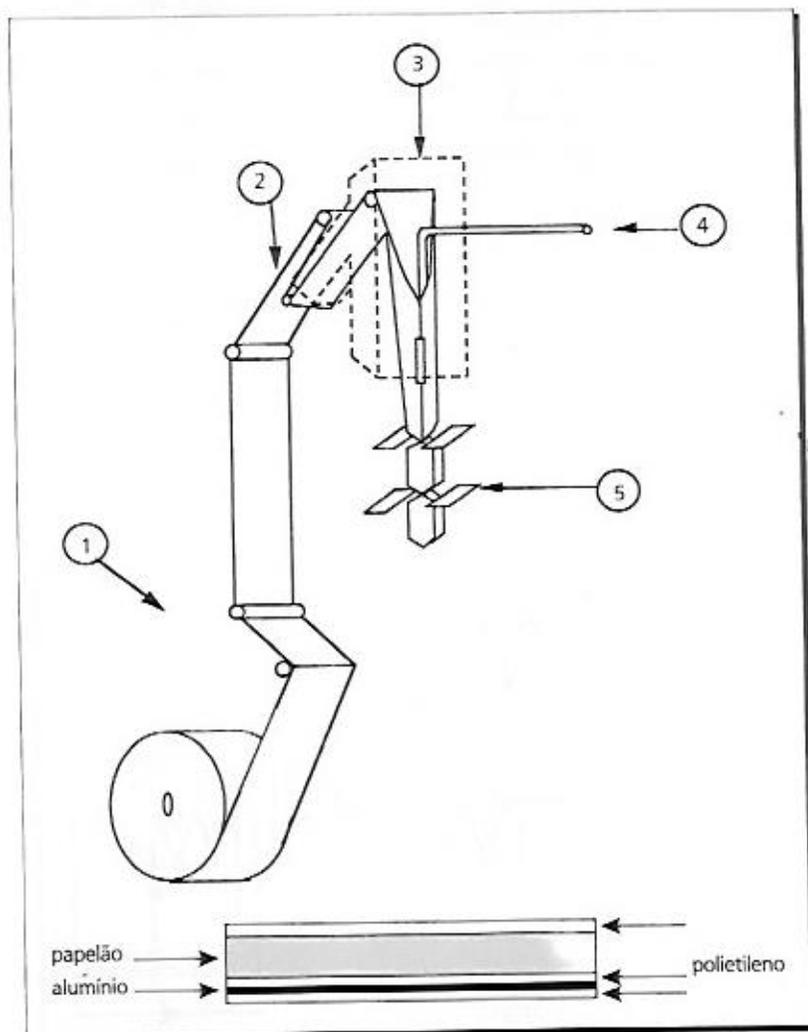


Figura 8.9 Esquema do sistema de acondicionamento asséptico e a estrutura típica da embalagem laminada.

Existem duas modalidades de pasteurização:

- LTH (*low temperature holding*) ou pasteurização baixa: é um sistema descontínuo, adequado quando se pretende pasteurizar volumes pequenos (p. ex., 100 a 500 litros). Empregam-se tempos longos (aproximadamente 30 minutos) e temperaturas baixas (62°C a 68°C); é realizada em tanques de parede dupla providos de agitador e de termômetro. Pela parede dupla circulam o fluido calefator e o refrigerador.
- HTST (*high temperature, short time*) ou pasteurização alta: esse método é realizado em sistemas de fluxo contínuo com trocadores de calor (tubulares ou de placas). Empregam-se temperaturas elevadas (72°C a 85°C) e tempos curtos (15 a 20 segundos). Na Figura 8.10, mostra-se um esquema simplificado desse método, que, como se pode observar, funciona de forma similar aos processos UHT indiretos. O produto é preaquecido no trocador-regenerador (1) e, em seguida, passa ao trocador (2) onde se pasteuriza; uma vez já processado, passa novamente pelo trocador (1) e chega ao trocador (3), onde se refrigera para depois ser acondicionado. A válvula de desvio de fluxo (não representada na figura) conduz o produto ao tanque de armazenamento se não tiver atingido a temperatura programada.

Tendo em vista que certo número de microrganismos sempre sobreviverá ao tratamento, não é necessária a embalagem asséptica, que somente encareceria o produto final;

basta que seja higiênica. As embalagens utilizadas podem ser garrafas de vidro ou plástico, sacos plásticos, papelão, etc.

Termização

Trata-se de processo em fluxo contínuo, similar à pasteurização HTST, mas difere no binômio tempo-temperatura; é um tratamento menos intenso (10 a 15 segundos; 60°C a 65°C). Aplica-se, atualmente, ao leite cru (Volume II, Capítulo 3), com o objetivo de manter baixa a taxa de bactérias psicotróficas, que são muito termolábeis. Não equivale à pasteurização do leite, pois não é suficiente para destruir todos os microrganismos patogênicos não-esporulados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FRAZIER, W. C. y WESTHOFF, D. C. (1993): *Microbiología de los alimentos*. 4ª ed. Acribia. Zaragoza.
- JAY, J. M. (1993): *Microbiología moderna de los alimentos*. 3ª ed. Acribia. Zaragoza.
- JAY, J. M. (1996): *Modern food microbiology*. 5th ed. Chapman & Hall. Nueva York.
- LÓPEZ, A. (1987): *A complete course in canning and related processes*. The canning trade Inc. Baltimore.
- STUMBO, C. R. (1973): *Thermobacteriology in food processing*. Academic Press. Londres.
- TOLEDO, R. T. (1991): *Fundamentals of food process engineering*. Van Nostrand Reinhold. Nueva York.

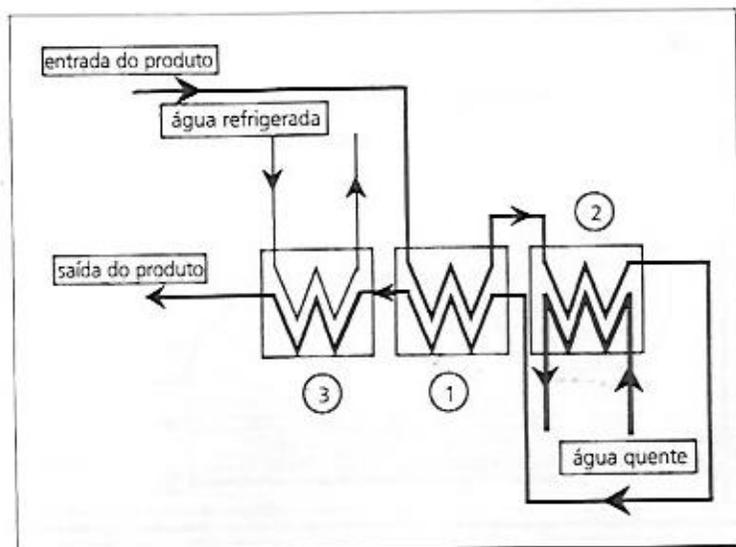


Figura 8.10 Diagrama de fluxo do pasteurizador.