

nt b

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DOS PARÂMETROS DE ESTERILIZAÇÃO
DE ALIMENTOS

Por ~~X~~ Fumio, Yokoya ^(St)

Tese apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Alimentos da Uni
versidade Estadual de Campinas
para obtenção do título de Li
vre Docente.

142339

Campinas, S.P. - Novembro de 1972

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

Aos meus pais

HISSASHI e KIKUE

AGRADECIMENTO

O autor agradece sinceramente ao Professor Dr. André Tosello pelo incentivo e colaboração na execução deste trabalho, tanto durante a sua permanência no Instituto de Tecnologia de Alimentos, como na Faculdade de Tecnologia de Alimentos. Também, agradece aos colegas Vanderlei Perez Canhos e Sérgio Roberto Dall'Oca pelo auxílio na execução dos trabalhos experimentais e programação de computador. Os agradecimentos especiais são dedicados a Toshie pela sua paciência e compreensão durante os trabalhos de laboratório e confecção deste manuscrito.

Parte dos trabalhos experimentais foram executados nas instalações do Instituto de Tecnologia de Alimentos da Secretaria da Agricultura do Estado de São Paulo e os cálculos em computador foram feitos no Instituto de Matemática, Estatística e Ciência de Computação da Universidade Estadual de Campinas. Foram utilizados, também, os equipamentos e materiais adquiridos pela Organização dos Estados Americanos - Programa Multinacional de Tecnologia de Alimentos.

ÍNDICE

Resumo.....	1
Summary	2
Introdução.....	3
Revisão de Literatura	
Resistência de Bactérias.....	9
Método Geral.....	14
Método Matemático	
a. Curva de Ascensão e Declínio de temperatura.....	18
b. Cálculo de Esterilização.....	35
c. Esterilização Média da Massa.....	50
Erro dos Parâmetros.....	61
Experimento.....	65
Resultados.....	68
Discussão Teórica.....	82
Aplicação da Teoria Proposta.....	105
Exemplo de Aplicação do Método Proposto.....	134
Discussão dos Resultados.....	137
Apêndice I - Símbolos e Definições.....	148
Apêndice II - Símbolos de Computação.....	156
Literatura Citada.....	158

RESUMO

Foi investigada a variação dos parâmetros de penetração de calor em produtos alimentícios de aquecimento por condução, colocados em latas cilíndricas. Os ensaios foram feitos com 4 lotes de 10 latas de suspensão de bentonita a 10% e 6 lotes de 15 latas de purê de ervilha.

Os resultados mostraram que a distribuição dos parâmetros (índice de declive e coeficiente de intersecção) era aproximadamente normal, tanto para a curva de aquecimento como para a de esfriamento. A análise da variância desses dados mostrou que o uso de ensaio com um lote apenas (de 6 a 8 recipientes ou mais) não fornecia informações suficientemente precisas para prever a esterilização desejada dos lotes comerciais, devido a grande variação dos valores de parâmetros existente entre os diferentes lotes. A aplicação dos parâmetros de maior índice de declive em ensaios com 2 a 3 latas de 4 a 6 lotes parece dar resultados bem mais consistentes do tempo de esterilização, mostrando ser mais seguro para prever o tempo de esterilização necessário na prática industrial.

Foi desenvolvido um método baseado na média e no desvio padrão dos parâmetros experimentais. Os resultados calculados por esse método forneceram, nas condições idênticas, os valores do tempo de esterilização de cerca de 2% mais curto e de 2 a 3 vezes mais consistente que o método baseado no maior valor do índice de declive. As vantagens deste método seriam, portanto, (i) de estar baseado em conceitos cientificamente superiores e (ii) de fornecer os resultados mais consistentes.

SUMMARY

The variation of heat penetration parameters was investigated on conductive foods placed in cylindrical cans. The experiments were carried out on 10% bentonite suspension (4 batches of 10 cans) and heavy pea puree (6 batches of 15 cans).

The results showed that the distribution of experimental parameters were close to normal distribution, both for heating and cooling curves. The analysis of variance of data showed that the experiment with 6 to 8 cans or jars in a single run is unsuitable for predicting proper commercial sterilization owing to the great variation of the results between different batches. The use of largest slope index value of heating curve obtained among the data from 4 to 6 batches with 2 to 3 cans each gives more consistent sterilizing time, showing that the result is more suitable to predict proper sterilization.

A method for calculating processing time was developed based on mean value and standard deviation of the heat penetration parameters. The process period calculated by the proposed method was about 2% shorter and 2 to 3 times more consistent than the method based on highest slope index. The advantages of the method are two folds: (i) to be based on scientifically superior concept and (ii) to give more precise results.

INTRODUÇÃO

A esterilização de alimentos enlatados pelo calor consiste na destruição de todos os microrganismos nesse alimento que possam causar a sua deterioração ou provocar a condição de perigo à saúde do consumidor durante o seu armazenamento e distribuição. Dessa forma, as bactérias, que não possam crescer nas condições normais de armazenamento do produto em questão, não precisam ser destruídas. Assim, por exemplo, os esporos de bactérias termófilas não são normalmente destruídos completamente durante a esterilização, uma vez que essas bactérias não crescem nas temperaturas normais de armazenamento e os seus esporos são altamente resistentes ao calor.

O tratamento de calor aplicado a esses alimentos deve ser o mínimo necessário para assegurar a esterilização, a fim de reter o máximo das qualidades nutritivas e sensoriais. Esse mínimo deve ser determinado com bastante precisão para poder assegurar a esterilização do produto e também a boa retenção das qualidades do alimento.

Para determinar o tempo e a temperatura necessários para a esterilização de um alimento enlatado (tempo de processamento) pode-se recorrer a um dos tres métodos seguintes:

(1) Produzir uma série de lotes de alimentos com diferente severidade de tratamento térmico, e incubá-los para determinar o nível de deterioração. É um processo caro, demorado e muito sujeito a erros, porque o lote experimental pode conter a contaminação bacteriana em nível inferior ao "normal".

(2) Fazer o mesmo tipo de ensaio, mas inoculando-se com a

quantidade conhecida de bactérias de importância a deterioração. Também, é um processo moroso e dispendioso.

(3) Conduzir um teste de penetração de calor no alimento para calcular o tempo de processamento e depois conduzir o teste com lotes inoculados para a confirmação final.

Atualmente usa-se apenas esse terceiro procedimento.

Para o cálculo do tempo de processamento, pode-se usar um dos seguintes métodos: (i) o método geral e (ii) o método matemático. O método geral é um método essencialmente gráfico e obtêm-se resultados bastante precisos, mesmo com alimentos que se aquecem com bastante irregularidade. Entretanto, é um método rígido, sendo o resultado válido apenas à processamento em condições idênticas de temperatura inicial, temperatura da autoclave, tempo de ascensão da autoclave ("come up time") e tamanho e forma do recipiente.

O método matemático, raramente é tão preciso quanto o método geral. Entretanto, por ser um método em que utiliza os modelos matemáticos para descrever a ascensão e o declínio da temperatura do produto durante o processamento, pode-se utilizar as informações coletadas nos experimentos conduzidos a uma dada condição, para avaliar o valor de esterilização no processamento conduzido em outras condições. Essa flexibilidade faz com que o método seja bastante útil e prático, comparado com o método geral.

Qualquer que seja o método empregado, o resultado obtido não pode ser mais preciso que a precisão dos parâmetros empregados para o cálculo. Existem aqui, dois grupos de parâmetros: (i) concernente a resistência térmica dos microrganismos (geralmente referente aos esporos bacterianos) e das qualidades químicas e sensoriais dos alimentos; e (ii) concernentes às propriedades térmicas do produto.

Os parâmetros concernentes a resistência térmica dos microrganismos e das propriedades dos alimentos são F (ou D) e z . Esses parâmetros influem nos resultados, qualquer que seja o método empregado para calcular o processamento. Os parâmetros referentes às propriedades térmicas são específicas ao método matemático

tico do cálculo de processamento e são: f , j (ou g) e I_0 . As definições desses símbolos, assim como dos demais utilizados daqui para frente estão apresentados no Apêndice I.

Infelizmente, muito pouco tem-se feito com relação aos erros ocasionados na determinação desses parâmetros. Por essa razão, aplica-se, no processamento térmico, um "fator de segurança" arbitrária cuja a escolha é feita "tradicional" ou "convencionalmente".

Em alguns outros campos da ciência e da tecnologia, já se usa um conceito mais objetivo - o limite de confiança - obtido por cálculos estatísticos. Isso somente é aplicável quando os conhecimentos da natureza e da causa de variação são suficientes para assegurar a confiança pelas estimativas válidas. Uma tentativa no sentido de aplicar os conceitos estatísticos no cálculo de processamento foi feito recentemente por Herndon (1971).

O presente trabalho descreve os resultados dos ensaios conduzidos para avaliar o efeito dos erros experimentais na determinação dos parâmetros concernentes às propriedades térmicas na esterilização de alimento. Como no trabalho de Herndon, a esterilização do alimento foi medida em termos de probabilidade de sobreviventes no final do processamento. Esse estudo resume-se apenas aos alimentos que se aquecem essencialmente por condução.

A revisão de literatura foi feita de uma maneira ampla abrangendo (i) os aspectos microbiológicos, (ii) os métodos de cálculo de processamento e (iii) os erros na determinação dos parâmetros. Nos primeiros dois assuntos, a revisão foi conduzida apenas para apresentar os conceitos e as técnicas atualmente empregados, não se preocupando com a descrição dos resultados e das conclusões obtidas por diferentes investigadores. Portanto, a revisão foi bastante sucinta e as citações foram bem incompletas. Além disso, por causa do espaço, preocupou-se apenas na apresentação dos conceitos e bases para cada método empregado no cálculo de esterilização, deixando a sua aplicação para outra oportunidade.

Como existem poucos trabalhos relacionados à avaliação do erro na determinação dos parâmetros e sua influência no cálculo

de processamento, a sua revisão tornou-se bastante curta, embora tenha-se procurado ser o mais completo possível.

O efeito da variação do índice de declive (f_h) foi estudado com algum detalhe, tendo sido desenvolvido um método para corrigir o valor de esterilização média da massa (F_s) super-avaliada pela variação da distribuição do f_h em torno de sua média. Para esse estudo, o valor de f_c foi sempre considerado igual ao de f_h , como no estudo de Stumbo (1965).

REVISÃO DE LITERATURA

Serão feitas, inicialmente, considerações sobre os parâmetros que definem a resistência de microrganismos ao calor, a fim de permitir a familiarização com os símbolos mais comumente usados na medida da sua resistência. A seguir, serão feitas as revisões sucintas sobre os métodos utilizados para o cálculo de processamento, começando com o método geral e depois o método matemático. Finalmente, será feito um estudo mais completo sobre a literatura disponível concernente aos métodos de avaliação dos erros no cálculo de processamento.

Em coerência com o Sistema Internacional de Medidas e o Sistema Metrológico Brasileiro, todas as temperaturas são apresentadas em graus centígrados. É importante lembrar que a maioria dos trabalhos publicados nesse campo usa as medidas no sistema inglês.

Não foi feita nenhuma referência aos produtos que apresentam as curvas quebradas de aquecimento durante a esterilização. Esse fenômeno, que ocorre principalmente quando há uma mudança de estado físico do alimento durante o aquecimento ou esfriamento, vem dificultar bastante o cálculo de esterilização pelo método matemático. Também, pouca atenção foi dada a esterilização dos produtos que se aquecem por convecção, uma vez que este trabalho resume-se aos alimentos termicamente condutivos.

Resistência das Bactérias.

Viljoen (1926) verificou a exponencialidade da morte das

bactérias em função do tempo, quando submetidas a uma dada temperatura letal e constante. Assim, traçando-se o logarítmo do número de sobreviventes contra o tempo, obteve-se uma linha reta denominada curva de velocidade de morte térmica, ou curva de sobreviventes (Ball e Olson, 1957). O declive dessa linha é definida como sendo $1/D$.

Matematicamente

$$\log \frac{n}{n_0} = - \frac{t}{D} \quad (1)$$

Onde: n .. número de bactérias sobreviventes após o tempo de tratamento.

n_0 .. número inicial de bactérias.

t .. tempo de tratamento de calor.

D .. tempo de redução decimal = tempo (em minutos) para destruir 90% de bactérias.

Assim, a constante D define a resistência da bactéria a uma dada temperatura. Para os alimentos de baixa acidez, $pH \geq 4,5$, em que a esterilização é feita na autoclave, a temperatura de referência para comparar os valores D dos esporos das diferentes bactérias é $121,19^\circ C$ ($250^\circ F$). Esse valor D é frequentemente designado de D_{250} ou D_r (Stumbo, 1965).

Para os alimentos ácidos, pH entre 4,0 e 4,5, as bactérias envolvidas na deterioração são de resistência menor e, portanto, usa-se a temperatura de referência de $100^\circ C$ ($212^\circ F$). Para a pasteurização, onde o objetivo é apenas a destruição das formas vegetativas de microrganismos, a temperatura de referência empregada é $65,6^\circ C$ ($150^\circ F$). Os valores D de algumas bactérias (esporos e formas vegetativas) foram apresentados por Stumbo (1965). Hugo (1971) apresentou uma série de tabelas bastante extensas dos valores D de diversas espécies de bactérias.

Além das condições intrínsecas dos esporos (ou células vegetativas) controladas por fatores hereditários, portanto, dependente da espécie ou mesmo da linhagem, o valor D de uma bactéria depende das condições de cultivo e formação dos esporos,

do meio de aquecimento e do meio empregado para a contagem dos sobreviventes (Rahn, 1945; Hansen e Riemann, 1963; Yokoya e York, 1965; Stumbo, 1965; Vas, 1970). Numerosos são esses fatores extrínsecos e difíceis de serem previstos. Portanto, ainda hoje, há necessidade de determinar a resistência de esporos bacterianos para cada novo produto alimentício a ser estudado, si se deseja saber a condição de esterilização com relativa precisão.

A observação de Viljoen (1926) nem sempre é verdadeira na prática. Tem-se verificado que a curva de sobreviventes frequentemente não é linear em toda a sua extensão. Um desvio mais comum é observado na fase inicial do tratamento térmico. No caso de esporos bacterianos, o desvio nessa fase é frequentemente devido a necessidade de ativação dos esporos por calor para desencadear a germinação. Por essa razão, Hayakawa (comunicação pessoal) sugeriu que seja adicionado um fator de correção, R' , na equação 1, ficando

$$\log \frac{n}{R' \cdot n_0} = - \frac{t}{D} \quad (2)$$

A expressão exponencial representando a curva de sobreviventes de microrganismos submetidos a uma dada temperatura letal e constante é apresentada na maioria dos trabalhos e livros sobre o assunto (Rahn, 1945; Ball e Olson, 1957; Stumbo, 1965). A esterilidade do produto é obtida extrapolando-se essa curva até o valor de sobrevivência admissível (por exemplo: 10^{-12}). Tal extrapolação apresenta o risco de erro considerável, pois (i) um número cada vez maior de dados vem sendo obtidos mostrando a discrepância entre os dados experimentais e a curva teórica; e (ii) o mecanismo monomolecular não explica satisfatoriamente essas curvas experimentais. A aplicação da cinética de reações químicas bi-, tri-, ou multimoleculares também não é satisfatória.

Outra maneira de representar a curva de sobreviventes de microrganismos consiste em admitir como resultante da variabilidade na resistência das células (ou dos esporos) individuais que constituem a suspensão. Essa variação apresenta uma distribuição

de frequência entre os membros da população (Vas, 1970).

Vas e Proszt (1957) mostraram que a curva de sobreviventes pode ser representada quase sempre por uma distribuição log normal. Essa distribuição pode ser efetuada a diferentes temperaturas usando a equação que relaciona a probabilidade de sobrevivência (P) com o logaritmo do tempo de aquecimento aplicado ($\log t$) e a temperatura (T) (Fenelius *et al.*, 1958).

$$P = a - b \log t - cT \quad (3)$$

Onde: a , b , e c são constantes que dependem da temperatura aplicada e da suspensão de esporos envolvidos.

O tempo de inativação a qualquer temperatura pode ser obtida pela equação seguinte:

$$\log t = \frac{a - P - cT}{b} \quad (4)$$

Entretanto, para se obter o tempo de inativação a valores extremos (por exemplo, 99,999%) apresentam-se problemas de ordem técnica na contagem de sobreviventes a concentrações tão baixas e do peso relativamente baixo que se deve dar a valores extremos na análise de probabilidade. Além disso, existem casos que a velocidade da morte não pode ser representada adequadamente por nenhuma das curvas aqui expostas (exponencial ou log-normal). A única maneira de obter uma resposta satisfatória seria obter o número de sobreviventes nas condições extremas (10^{-8} ou 10^{-12}), o que é atualmente impraticável.

Um outro ponto importante a se lembrar é o fato de existir esporos vivos em produtos esterilizados comercialmente. Frequentemente consegue-se recuperar desses alimentos "esterilizados" 1 a 3 ou mais esporos bacterianos capazes de causar a deterioração quando for re-inoculado ao produto com células ou esporos cultivados em laboratório (Vas, 1970). Isto pode ser devido aos esporos terem-se transformados pelo calor em um estado fisiologicamente diferente daquele obtido no laboratório. Esse as-

pecto foi bastante estudado em relação a estabilidade dos alimentos semi-preservados, como presunto e carnes em conserva (Duncan, 1970). Nesses alimentos, a estabilidade do produto é em parte assegurada pelo aumento da sensibilidade ao efeito inibitório do sal sobre os esporos. Esse fenômeno da injúria causada pelo calor foi, também, demonstrado em células vegetativas de bactérias (Stiles e Witter, 1965; Dabban *et al.*, 1969).

Não se deve esquecer que, em alguns alimentos, principalmente aqueles com grande teor de gordura, os esporos ou células podem estar envolvidos por uma camada de gordura (Herson e Hurland, 1968), quando se encontram na fase gordurosa do produto. Com isso, há a redução na atividade da água e dificuldade na transmissão de calor naquele micro-ambiente, com o consequente aumento da resistência aparente das bactérias.

Além disso, a distribuição dos esporos no produto pode não ser uniforme por toda a sua extensão. No caso de blocos de carne, os esporos estão localizados quase que completamente na superfície. Praticamente não há possibilidade de haver bactérias anaeróbias putrefativas na profundidade superior a 0,5 centímetros (Schack *et al.*, 1958).

Antes do conhecimento sobre a ordem da morte de bactérias, Bigelow e Esty (1920) admitiram que um organismo contido em um alimento poderia ser completamente destruído após um certo período de tratamento térmico. Os autores designaram esse ponto de "ponto de morte térmica", TDP, definido como sendo a temperatura que um organismo é destruído em um dado período de tempo sob uma determinada condição específica (Ball e Olson, 1957). Posteriormente, Bigelow (1921) considerou o tempo de morte térmica, TDT, definido como sendo o tempo, a uma dada temperatura, em que os organismos de uma suspensão são destruídos sob determinada condição específica.

Essa "determinada condição específica", usada em ambos os casos, necessita caracterizar os seguintes pontos: (1) número de organismos; (2) concentração de organismos; (3) meio de suspensão; (4) idade da cultura; (5) meio em que o organismo é cultivado; (6) meio de subcultura após o aquecimento; (7) modo de

aquecimento; (8) recipiente de aquecimento; e (9) meio onde os organismos são aquecidos (Ball e Olson, 1957).

Se o logarítmo dos valores TDT for locado contra a temperatura correspondente, obtém-se uma linha reta, pelo menos no intervalo de temperatura de importância a esterilização de alimentos, denominada curva TDT. Townsend *et al.* (1938) sugeriram que essa linha deveria ser traçada atendendo aos seguintes requisitos:

(1) Um ponto (na relação temperatura/tempo) de "sobrevivente" é considerado "positivo" e a linha deve passar acima desse ponto, ou seja, à temperatura mais elevada e/ou ao tempo mais longo.

(2) Um ponto de "destruição" é apenas o indicativo e não o afirmativo do TDT, por causa do "skip" (*). Entretanto, a curva TDT deve passar na parte inferior do maior número de pontos de "destruição".

(3) O declive da curva TDT deve ser paralelo à tendência geral dos pontos de destruição e de sobrevivente.

Esse método não permite avaliar a precisão nos ensaios com repetição ou com maior número de pontos considerados. Para sobrepujar essa dificuldade, Ball e Olson (1957) sugeriram o seguinte critério:

(1) Obter a média do logarítmo para cada par dos pontos de sobrevivente e destruição e converter esse valor em minutos.

(2) Localizar esses pontos médios em um papel semilogarítmico.

(3) Traçar a linha reta sobre esses pontos preferivelmente pelo método dos quadrados mínimos. Tem-se, assim, a "curva TDT primária".

(4) Achar o valor F e z da curva primária.

(5) Para achar o "valor prático" de F e z , calcula-se o fator de segurança. Um dos métodos é deslocar a curva primária para o ponto superior a todos os pontos primários, mantendo-se a

(*) "Skip" é a ausência do crescimento em um experimento de tratamento térmico a uma dada temperatura e tempo com a presença de sobreviventes a mesma temperatura e tempo mais longo.

mesma inclinação. Outro método, estatisticamente mais adequado, consiste em calcular o desvio padrão dos pontos, e deslocar a curva primária para cima na razão de duas a três vezes o desvio padrão.

A equação da curva TDT é sumamente importante no cálculo da esterilização de alimentos. A sua dedução é feita de modo semelhante a curva de sobreviventes, obtendo-se:

$$\log \frac{\tau}{F} = - \frac{T - 121,1}{z} \quad (5)$$

Onde: τ .. o valor de TDT a uma dada temperatura T .

F .. o valor de TDT a 121,1°C.

z .. recíproca da declividade da curva TDT, definida como sendo o incremento na temperatura, em °C, necessário para reduzir 90% no valor de TDT.

Na prática, há uma série de dificuldade na interpretação da curva TDT em virtude da "determinada condição específica" já mencionada. Prefere-se, portanto, o uso do método baseado nas curvas de sobreviventes a diferentes temperaturas (Stumbo, 1965). Para isso, o logaritmo dos valores D , determinados a diferentes temperaturas são locados contra as temperaturas correspondentes. Essa curva é conhecida pelo nome de curva "fantasma" de destruição (Lamanna e Mallette, 1959) ou curva de destruição térmica (Stumbo, 1965). Tem-se, assim:

$$\log \frac{D_2}{D_1} = - \frac{1}{z} (T_2 - T_1) \quad (6)$$

Onde: D_1 .. valor de D correspondente a temperatura T_1 °C.

D_2 .. valor de D correspondente a temperatura T_2 °C.

z .. conforme definido na equação 5.

Assumindo que a temperatura $T_1 = 121,1$ °C, o valor D_1 fica igual a D_p , portanto, a expressão 6 fica 7, seguinte:

$$\log \frac{D_2}{D_p} = - \frac{T_2 - 121,1}{z} \quad (7)$$

Da equação 6, pode-se determinar o valor z . Entretanto, resta determinar o tempo de tratamento necessário a uma dada temperatura para que um alimento possa ser considerado "esterilizado". O assunto foi amplamente discutido por Stumbo (1965). Para os esporos de *Clostridium botulinum*, o produto é considerado esterilizado quando o tratamento térmico permite reduzir o número inicial de 10^{12} para 1 (conceito $12D$). Essa conclusão é baseada no estudo extensivo de Esty e Meyer (1922). Para as bactérias anaeróbias mesófilas, foi considerado satisfatório, se o processamento térmico reduzir o número inicial de esporos de 10^5 para 1. Em termos de F , isso corresponde a um valor ao redor de 2,52 minutos para *C. botulinum* e 5,0 minutos para os esporos de bactérias anaeróbias mesófilas. Não há uma estimativa adequada do valor F para os esporos de bactérias termófilas, devendo ser determinado para cada produto em estudo.

Para que o processo de esterilização seja satisfatório, o valor de F_p deve ser numericamente igual a F , sendo F_p o total de calor fornecido durante o processamento em termos de sua capacidade de esterilização.

Método Geral

Bigelow *et al.* (1920) apresentaram um método para o cálculo de esterilização de alimentos enlatados, F_p , que era essencialmente gráfico. Construíram, inicialmente, um gráfico, em coordenadas cartesianas, da curva de ascensão e declínio da temperatura (penetração de calor) no ponto de mais lento aquecimento (ponto crítico) do produto durante a esterilização. A resistência térmica das bactérias foi representada pela curva de tempo de destruição térmica (curva TDT) obtida locando-se o tempo requerido para destruir uma alta porcentagem de esporos de uma dada população contra a temperatura de esterilização. Da curva TDT

foram calculados os valores de velocidade letal para cada tempo da curva de penetração de calor. Esse valor da velocidade letal é a recíproca do valor de TDT na temperatura correspondente, ou seja:

$$L = 1/TDT \quad (8)$$

Colocando , em gráfico, o tempo obtido da curva de penetração de calor (na abscissa) contra o correspondente valor da velocidade letal (na ordenada), obtiveram a curva da letalidade. Quando a área delimitada por essa curva e a abscissa for igual a uma unidade, o total do organismo considerado deveria estar destruído.

Schultz e Olson (1940) desenvolveram um método geral para calcular F_p , traçando um gráfico com escala especial, conhecido por papel de velocidade letal. Esse papel foi construído baseando-se na contribuição de Ball (1928) em que considerou uma curva hipotética de TDT passando por um minuto a 121,1°C. Para qualquer outra temperatura, seria a velocidade letal comparada com 1 minuto a 121,1°C, dada pela equação

$$L = \log^{-1} \left(\frac{T - 121,1}{z} \right) \quad (9)$$

Assim, o espaço entre as duas linhas horizontais, uma $L = 1$ e a outra $L = 0$, foi dividido proporcionalmente ao valor da velocidade letal da respectiva temperatura. A curva foi traçada, demarcando-se a temperatura nesse gráfico a cada instante do aquecimento e esfriamento. A área sob a curva representa o valor da letalidade e é comparada com a unidade de letalidade para obter a resposta desejada.

Uma desvantagem desse procedimento é que para cada valor de z é necessário traçar um gráfico diferente, pois as escalas se diferem. Hayakawa (comunicação pessoal) observou que poderia ser usado um único gráfico para diferentes valores de z se a seguinte modificação for introduzida no valor da temperatura:

$$L = 10^{\frac{T-121,1}{z_a}} = 10^{\frac{(T-121,1)/K_s}{z_b}} \quad (10)$$

$$\text{Onde: } K_s = z_a/z_b \quad (11)$$

Considerando,

$$\frac{T - 121,1}{K_s} = T_m - 121,1$$

Onde: T_m .. temperatura equivalente a T .

$$T_m = \frac{T + K_s \cdot 121,1 - 121,1}{K_s}$$

$$T_m = \frac{T}{K_s} + \frac{(K_s - 1) \cdot 121,1}{K_s} \quad (12)$$

O valor da temperatura T_m , obtida pela equação 12 permite locar a curva da letalidade com diferentes valores de z , sabendo-se a relação K_s .

A letalidade é obtida integrando-se graficamente a curva pelo uso de planímetro, pela pesagem do papel recortado e pela pesagem dos quadrados, quando traçado em papel quadriculado.

A letalidade pode ser determinada, ainda, pela regra de Simpson (Charm, 1963), pelo uso da fórmula quadrática de Gauss (Hayakawa, 1968) ou pelo método de Patashnik (1953).

Para a aplicação da regra de Simpson, o tempo de processamento é dividido em número par de intervalos regulares de tempo, Δt , e a seguinte fórmula é aplicada:

$$F_p = \int_{t_0}^{t_{2n}} L(t) dt \approx \frac{\Delta t}{3} (L_0 + 4L_1 + 2L_2 + 4L_3 + 2L_4 + \dots + 4L_{2n-1} + L_{2n}) \quad (13)$$

Onde: $L_0, L_1, L_2, L_3 \dots$ etc. são as velocidades letais nos tem
pos 0, 1, 2, 3, ... etc.

A fórmula quadrática de Gauss é aplicavel quando a veloci
dade letal da porção inicial ou final de processamento considera
do for desprezível. Essa condição é conseguida na maioria dos ca
sos de esterilização de alimentos, quer na fase de aquecimento ,
quer na fase de esfriamento do alimento.

Nestas condições,

$$\int_{-1}^{+1} f(x)dx \approx \sum_{k=1}^n A_k \cdot f(x_k) \quad (14)$$

Onde: A_k .. fator de ponderação.

x_k .. valores de x em que os valores numéricos de $f(x)$ são
calculados.

n . número de valores de $f(x)$ considerados para calcular
essa integral.

Os valores de A_k e x_k são dados em tabelas matemáticas
(Abramowitz e Stegun, 1964). Para a aplicação dessa fórmula, os
limites da integração são transformados entre -1 e +1, tanto pa-
ra a fase de aquecimento como para a fase de esfriamento. A cons-
trução de uma régua de guia facilitaria essa transformação.

Patashnik (1953) propoz um método que consiste na soma-
tória dos valores letais a diferentes tempos de processamento.

$$F_p = \int_{t_0}^{t_a} L(t)dt \approx \sum_{t=0}^n L_t \quad (15)$$

Esse método é menos preciso que o método usando a regra
de Simpson ou a fórmula de Gauss (Hayakawa, 1968). O método foi
recentemente adaptado para o cálculo usando a medida de tempera-
tura em graus centígrados em vez de graus Fahrenheit (Shapton et

al., 1971).

Método Matemático.

Ball (1923) foi o primeiro a introduzir o método matemático na avaliação da esterilização de alimentos enlatados. Esse método foi revisto por Ball e Olson em 1957, apresentando algumas modificações. O trabalho original de Ball foi revisto, também por Cheftel e Thomas (1963).

Por ser o método de Ball, base para a maioria dos métodos matemáticos atualmente existentes na literatura, ele será aqui apresentado com bastante pormenor. Os símbolos empregados serão modificados de acordo com os adotados neste trabalho. Em seguida, serão apresentadas as alterações que foram sugeridas por outros autores.

O método de Ball, proposto em 1923, aplica o valor de esterilização do ponto crítico. Para os alimentos de aquecimento por condução, esse ponto se localiza, geralmente, no centro geométrico do recipiente. Para os alimentos de aquecimento por convecção, esse ponto localiza-se a 0,5-1,0 cm da face inferior do recipiente.

a. Curva de Ascensão e Declínio da Temperatura.

Baseando-se na fórmula de Williams e Adams, e de Thompson (cit. Ball, 1923), verificou-se que a curva da ascensão da temperatura do ponto crítico do recipiente (curva de penetração de calor), exceto na porção inicial da curva, a relação entre a diferença da temperatura do produto no ponto crítico, T_c , e a temperatura de operação da autoclave, T_o , era uma função exponencial do tempo de aquecimento, t_h , para os produtos que se aquecem quase que exclusivamente por condução.

Nessas condições, a equação da ascensão de temperatura durante o aquecimento é a seguinte (*):

(*) Ver Apêndice I para as definições dos símbolos.

$$\log \frac{I_0}{I_h} = \frac{t_h}{f_h} \quad (16)$$

Onde: f_h .. índice de declive.

Para que a equação 16 possa ser aplicada a todos os casos de alimento que se aquecem por condução, há a necessidade de introduzir o coeficiente de intersecção, j_h , que irá compensar ao desvio inicial da curva de aquecimento. Esse coeficiente é dado pela equação:

$$j_h = \frac{I_{p0}}{I_0} \quad (17)$$

Assim, o símbolo I_0 pode ser substituído pela expressão $j_h \cdot I_0$, ficando:

$$\log \frac{j_h \cdot I_0}{I_h} = \frac{t_h}{f_h} \quad (18)$$

A equação 18 está ilustrada graficamente na figura 1.

Considerando T_g , a temperatura do ponto crítico do produto no momento em que o vapor é desligado, o tempo de processamento, t_b , é dado pela equação

$$t_b = f_h \cdot \log \frac{j_h \cdot I_0}{I_g} \quad (19)$$

Essa equação é deduzida da equação 18. O tempo de esterilização, t_b , é definida como sendo o intervalo de tempo decorrido entre o tempo inicial corrigido para o período de ascensão da temperatura da autoclave e o tempo que o vapor é desligado.

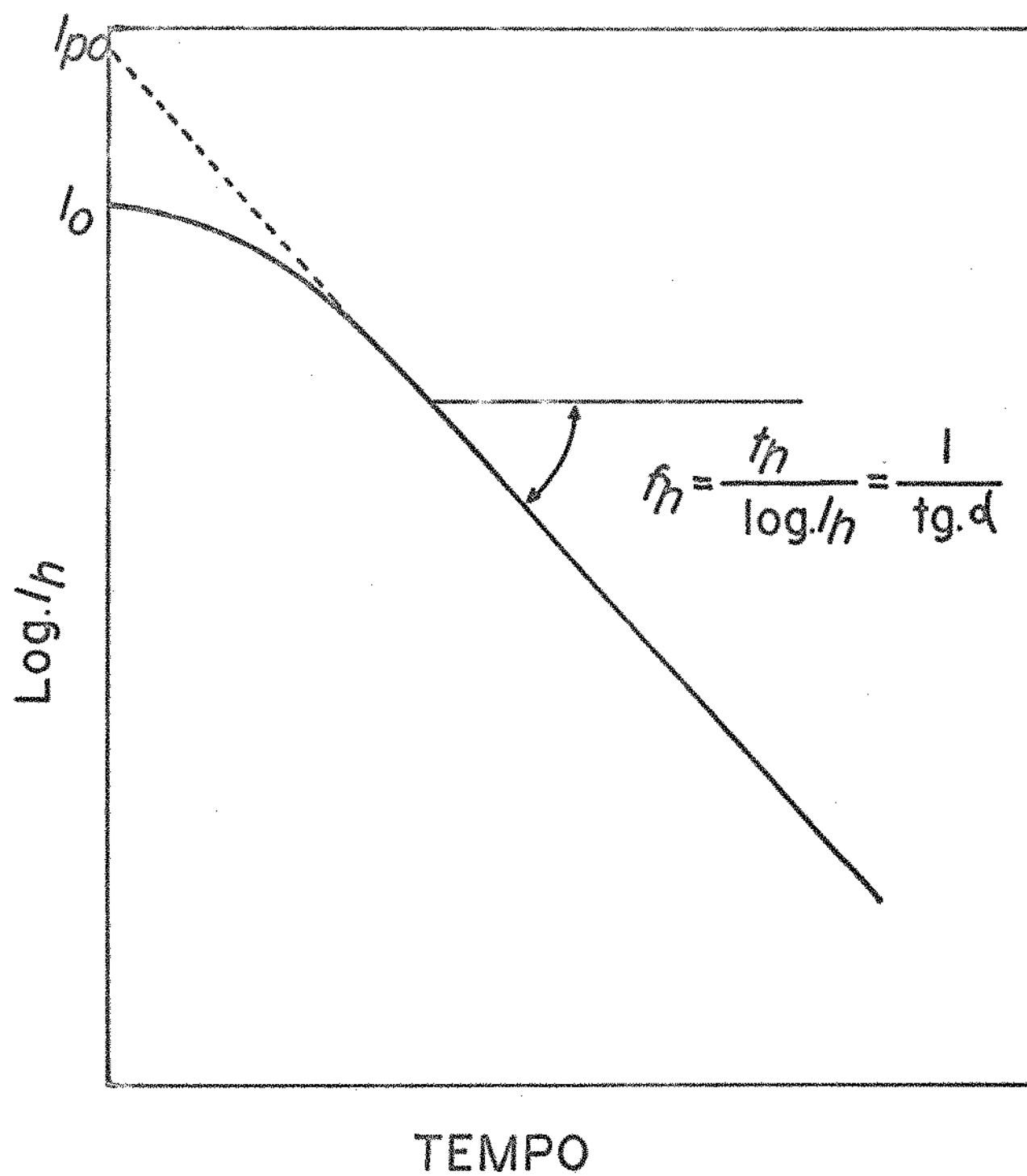


Figura 1: Curva de aquecimento do produto.

O tempo inicial corrigido, t_0 , é obtido pela equação seguinte (Ball, 1923):

$$t_0 = t_{op} + 0,42 t_1 \quad (20)$$

Onde: t_{op} .. o intervalo entre o tempo em que a autoclave atinge a temperatura de operação e o tempo do desligamento do vapor.

t_1 .. tempo que leva para a autoclave atingir a temperatura de operação, após o início da introdução do vapor.

A letalidade correspondente a diferença da curva exponencial com a curva real de aquecimento na fase inicial de processamento é muito pequena, uma vez que a temperatura nesse ponto é relativamente baixa. A não ser que a temperatura inicial do produto seja bastante elevada e/ou o valor z do fator termicamente vulnerável considerado (bactérias e propriedades químicas e sensoriais do alimento) seja bastante elevado, o erro causado pela não consideração dessa diferença é desprezível.

Por outro lado, no esfriamento do produto, a fase inicial, que também apresenta um desvio da exponencialidade dada pela equação 21, tem grande influência sobre o valor da letalidade. Ball (1923) verificou que a fase inicial de esfriamento poderia ser representada pela equação da hipérbole seguinte (ver também a figura 2):

$$\frac{y^2}{a^2} - \frac{x^2}{b^2} = 1 \quad (21)$$

Onde: a .. o número de unidade de temperatura entre T_g e a origem da hipérbole, O ; $a = 0,3I_w$.

b .. uma constante arbitrária; $b = \sqrt{c^2 - a^2}$; onde, c é o número de unidades de temperatura entre T_c e Φ , (foco da hipérbole).

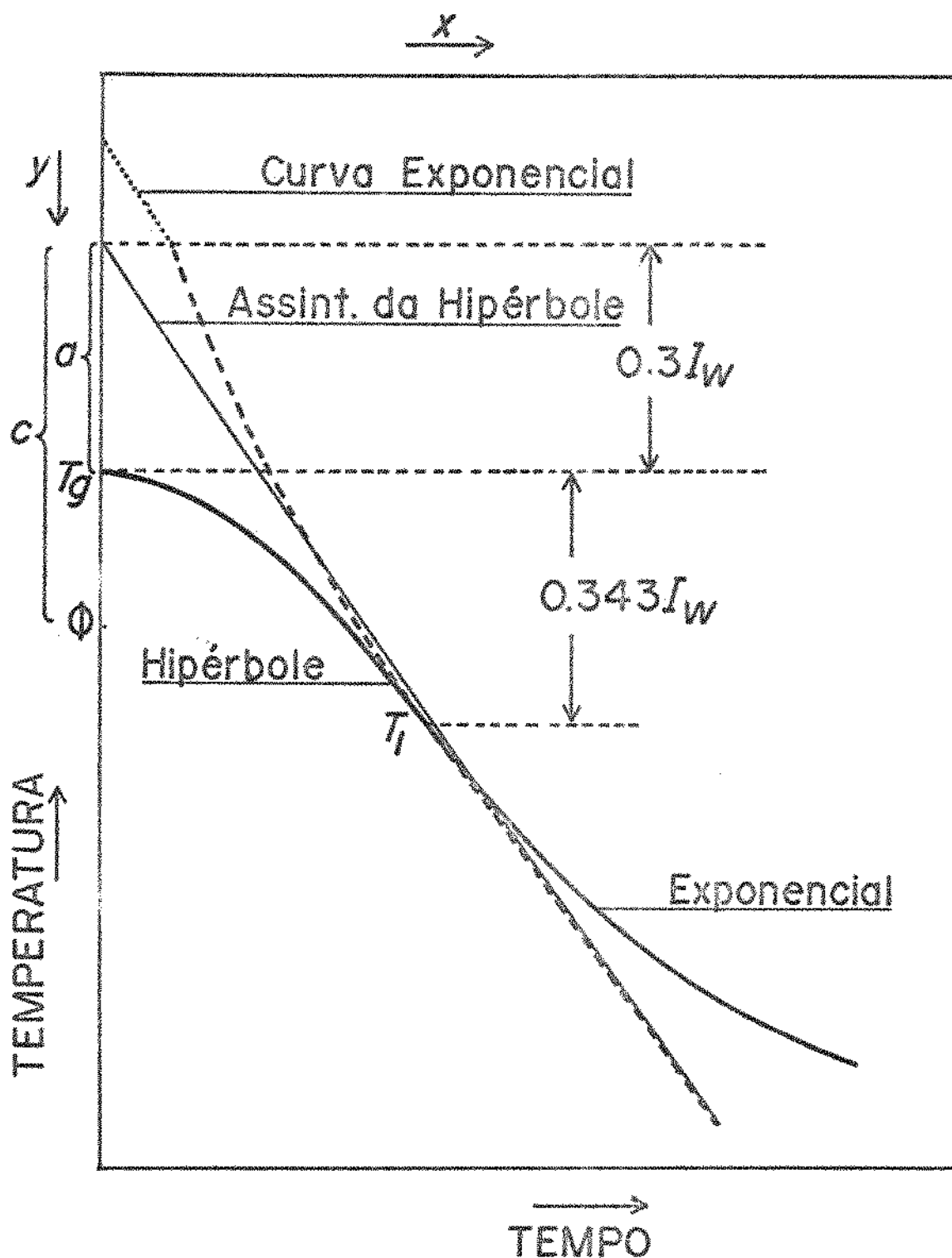


Figura 2: Fase inicial de esfriamento, segundo a dedução de Ball (1923).

O ponto O fica no eixo das ordenadas a $0,3 I_w$ graus acima do T_g . O y é o número de unidades de temperatura medido de O para Φ ; e x , o tempo, em minutos, decorrido do início do esfriamento.

A hipérbole intercepta a curva exponencial de esfriamento no ponto T_I , situado a $0,343I_w$ graus abaixo do T_g .

A equação exponencial da curva de esfriamento considerada foi semelhante a de aquecimento, ou seja:

$$\log \frac{j_c \cdot I_w}{I_c} = \frac{t_c}{f_c} \quad (22)$$

Onde: j_c é dada pela equação

$$j_c = \frac{I_{pg}}{I_w} \quad (23)$$

A curva de esfriamento está ilustrada na figura 2.

Na prática, o índice de declive, f_h , e o coeficiente de intersecção, j_h , da curva de aquecimento são obtidos pela reta que melhor adapte aos pontos retilíneos da curva, ou seja, a tangente desses pontos. Pode-se obter, também, da tangente em um da do ponto da curva de aquecimento experimental. A relação entre esses parâmetros e as dimensões das latas foram obtidas usando a assíntota da curva de aquecimento (Ball e Olson, 1957). Hayakawa e Ball (1968), calculando a curva teórica para vários fatores de forma, m , do recipiente cilíndrico, analisaram as características de convergência dessas curvas com a assíntota, empregando o método de quadrados mínimos para a porção linear dessas curvas.

Para obter a temperatura adimensional, u , no centro da lata, foi utilizada a equação 24, que é a solução da equação diferencial parcial de condução térmica.

$$u_h(B_h) = \frac{8}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{J_1(p_k)} \cdot \frac{1}{(2n-1)p_k} \cdot (-1)^{n+1} e^{-A \cdot B_h} \quad (24)$$

Onde: k e n são índices. Os demais símbolos estão definidos no Apêndice I.

Para a dedução da equação 24, a seguinte condição foi imposta: (i) a temperatura da autoclave eleva-se instantaneamente a temperatura de operação no tempo zero de processamento; (ii) a difusividade térmica do alimento é constante durante o processamento; e (iii) o coeficiente de transferência de calor da superfície é infinita. O fator de forma, m analisada foi de $0,1 \leq m \leq 2,0$, englobando quase todos os recipientes cilíndricos empregados no comércio. Para valor bem elevado de B , as fórmulas seguintes foram aplicadas para determinação dos parâmetros da assíntota.

$$f_A = \frac{2,30259}{5,78321/m^2 + 9,86959} \quad (25)$$

$$j_A = \log^{-1} \left(\frac{8}{\pi} \cdot \frac{1}{J_1(p_1)} \cdot \frac{1}{p_1} \right) = 2,03970 \quad (26)$$

Essas fórmulas foram obtidas do primeiro termo da série de somatórias. Concluíram-se que: (i) a curva teórica do recipiente de $m \approx 0,6$ converge a sua assíntota mais rapidamente com o passar do tempo; (ii) o valor de f_h adimensional pode ser aproximado a valor f_A quando $u \leq 0,1$ e quando se permite um erro de 5%; (iii) quando se permite um erro de 5% no j_h , o seu valor para $0,3 \leq m \leq 1,3$ pode ser aproximado pela assíntota quando $u \leq 0,1$ e j_h para $0,2 \leq m \leq 1,8$, pela assíntota, quando $u \leq 0,01$. O valor de u para maioria do processamento comercial está no intervalo $1,0 \leq m \leq 0,01$.

Hayakawa e Ball (1969) analisaram, também, a curva teórica de esfriamento. Essa análise foi feita empregando-se as fórmulas para a variação de temperatura de um cilindro finito, já empregado por diversos autores (Board *et al.*, 1960; Charm, 1961; Gillespy, 1951; e Hicks, 1951).

A equação para avaliar a temperatura de um alimento de aquecimento por condução durante a fase de esfriamento do processamento de calor é a seguinte:

$$\theta_c = \frac{8}{\pi} \cdot \frac{T_r - T_w}{I_0} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(p_k \rho)}{J_1(p_k) p_k} \cdot \frac{1}{2n-1} \cdot e^{-AB_c} \cdot \text{sen}(2n-1)\pi\zeta - \frac{8}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(p_k \rho)}{J_1(p_k) p_k} \cdot \frac{1}{2n-1} \cdot e^{-A(B_c + B_b)} \cdot \text{sen}(2n-1)\pi\zeta \quad (27)$$

Onde k e n são índices. Os demais símbolos estão definidos no Apêndice I.

Comparando com a equação da curva de aquecimento, observa-se que, qualquer temperatura da fase de esfriamento pode ser avaliada pela curva da fase de aquecimento. Assim, a equação 27 fica:

$$\theta_c(B_c) = \frac{T_r - T_w}{I_0} \cdot \theta(B_c) = \theta(B_c + B_b) \quad (28)$$

Onde: $\theta(\dots)$ é representada pela fórmula

$$\theta(B) = \frac{8}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(p_k \rho)}{J_1(p_k) \cdot p_k} \cdot \frac{1}{2n-1} \cdot e^{-AB_h} \cdot \sin(2n-1)\pi\zeta \quad (29)$$

O índice de declive, f_c , e o coeficiente de intersecção, j_c , da assíntota são obtidos da equação 27, considerando os valores elevados de t_c e B_c . Desta forma, o membro direito da equação 27 aproxima-se ao primeiro termo da série de somatória. Obtem-se, assim

$$f_c = \frac{2,30259}{(5,78321/\alpha^2 + 9,8696/l^2)\alpha} \quad (30)$$

Onde: α .. raio interno do recipiente.
 l .. altura interna do recipiente.

$$j_c = \gamma/I_0 \quad (31)$$

Onde: $\gamma = 2,03969 \cdot J_0(2,40483\rho) \cdot \sin \pi\zeta \{ (T_r - T_w) - I_0 \cdot$

$$\exp. - (5,7832/\pi^2 + 9,8696)\alpha t_b/l^2 \} \quad (32)$$

Quando a equação 30 é comparada com a fórmula da assíntota da curva de aquecimento, observa-se que f_c é idêntica a f_h .
 Lembre-se que

$$f_{Be} = \alpha f_c / l^2 \quad (33)$$

Onde: f_{Be} .. índice de declive da assíntota para a curva de esfriamento adimensional.

Experimentalmente, entretanto, verificou-se que na maio-

ria dos casos, o f_c era consideravelmente maior que f_h . Isso pode ser devido a (i) o coeficiente de transferência de calor da superfície menor no esfriamento que no aquecimento; (ii) a curva de esfriamento ser traçada baseando-se nos pontos da curva que não atingiu a porção retilínea (Gillespy, 1951).

Quando a temperatura do alimento no início do esfriamento T_g , é próxima a temperatura da autoclave, T_p , e quando o tempo de aquecimento, t_b , é bastante longo, a equação 31 fica

$$j_c = 2,03969 \cdot J_0(2,40483\rho) \cdot \text{sen } \pi\zeta \quad (34)$$

Na maioria dos casos, o resultado obtido pela equação 34 não difere mais que 5% daquele obtido por equação 31.

A fórmula da curva de esfriamento no centro da lata pode ser obtido considerando $\rho = 0$ e $\zeta = 1/2$ nas equações 28 e 29.

$$u_c(B_c) = \frac{T_r - T_w}{I_0} \cdot u_h(B_c) - u_h(B_b + B_c) \quad (35)$$

$$u_h(B_h) = \frac{8}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{J_1(p_k)p_k} \cdot \frac{1}{2n-1} \cdot (-1)^{n+1} \cdot e^{-AB_h} \quad (36)$$

A equação 36 representa a temperatura adimensional no centro geométrico do recipiente durante o aquecimento. A equação 35 indica que qualquer temperatura central durante a fase de esfriamento pode ser calculada de duas temperaturas centrais apropriadas da fase de aquecimento.

A porção inicial da curva de esfriamento foi calculada pela fórmula

$$u_c(B_c) = \frac{T_r - T_w}{I_0} \cdot 10^{-\frac{d_b B_c^2}{4}} - j_i \cdot 10^{-\frac{(B_b + B_c) \cdot f_{Bi}}{4}} \quad (37)$$

Essa é a porção mais importante com respeito a esterilização de alimentos. A porção restante foi obtida pela expressão

$$u_c(B_c) = j_n \frac{T_r - T_w}{I_0} \cdot 10^{-B_c/fBn} - j_i \cdot 10^{-(B_b+B_c)/fBi} \quad (38)$$

Sendo que $n = i$ ou $n \neq i$.

As equações 37 e 38 devem possuir os valores adequados de B_b e B_c , e devem possuir as combinações próprias de subscrições i e n . Esses são obtidos de B_c , B_b e T_g .

Hayakawa (1969b) apresentou os gráficos de resposta de temperatura para as latas cilíndricas durante as fases iniciais de aquecimento. Esses gráficos relacionam a função $u(B)$, que representa a equação adimensional da temperatura, com o B (número de Fourier). Os fatores de forma da lata, m , considerados foram $0,1 \leq m \leq 2,0$.

Para o desenvolvimento desses gráficos, considerou a equação da temperatura adimensional do cilindro finito durante a fase de esfriamento.

$$\frac{T_c - T_w}{I_0} = \frac{T_r - T_w}{I_0} \cdot u(B_c) - u(B_c - B_b) \quad (39)$$

Onde:

$$u(B) = \frac{8}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{J_1(p_k)p_k} \cdot \frac{1}{2n-1} \cdot (-1)^{n+1} \cdot \exp(-AB) \quad (40)$$

Os grupos adimensionais, $u(B)$, e B , podem ser transformados em seus respectivos valores dimensionais pelas seguintes equações:

$$T_r - T = u(B) \cdot I_0 \quad (41)$$

$$t = B.l^2/\alpha \quad (42)$$

Por outro lado, Hayakawa (1970b) desenvolveu uma série de equações experimentais para representar a variação de temperatura durante todo o período de esterilização, tanto para os alimentos que se aquecem por condução, como também, para aqueles por convecção. Como no método de Ball (1923), a curva de aquecimento foi obtido locando-se o $\log(T_r - T)$ contra o tempo, t_h , e a curva de esfriamento, $\log(T_c - T_w)$ contra o tempo t_c . Para a porção inicial da curva de esfriamento, que geralmente não é exponencial, foram desenvolvidas as equações que melhor adaptassem aos dados experimentais. As seguintes funções circulares foram selecionadas:

1. Para $0,4 \leq j < 1$.

$$T_c - T_w = I_w \cot(\beta t + \pi/4) \quad (43)$$

$$\text{para } 0 \leq t_c \leq t_l$$

Onde:

$$\beta = \frac{1}{t_l} \left\{ \text{arc.tang} \left(\frac{\log(T_g - T_w)}{\log\{j_c(T_g - T_w)\} - t_l/f_c} \right) - \frac{\pi}{4} \right\} \quad (44)$$

2. Para $j_c = 1$.

$$T_c - T_w = 0 \quad (45)$$

3. Para $1 < j_c \leq 3,0$.

$$T_c - T_w = I_w \cos \beta t \quad (46)$$

para $0 \leq t_c \leq t_L$.

Onde:

$$\beta = \frac{1}{t_L} \arccos \left(\frac{\log\{j_c(T_g - T_w)\} - t_L/f_c}{\log(T_g - T_w)} \right) \quad (47)$$

$$t_L = 0,7 f_h (j_h - 1) \quad (48)$$

Alles e Cowell (1971) desenvolveram uma relação entre a tangente e a assíntota da curva de penetração de calor em latas retangulares (paralelepípedos). Considerando um bloco de dimensão $2a \times 2b \times 2c$, sendo $a \geq b \geq c$, e assumindo as mesmas condições de Hayakawa e Ball (1968), usaram a equação 49 para calcular a temperatura no centro do recipiente, T_h , no tempo t_h , de aquecimento.

$$\frac{T_r - T_h}{I_0} = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{lmn} \cdot \exp(-C_{lmn} \cdot \theta) \quad (49)$$

Onde:

$$A_{lmn} = \frac{(-1)^{(l+m+n)}}{(2l+1)(2m+1)(2n+1)} \cdot \frac{64}{\pi^3} \quad (50)$$

$$C_{lmn} = \frac{\pi^2}{4} \left\{ \frac{(2l+1)^2}{\beta_1} + \frac{(2m+1)^2}{\beta_2} + (2n+1)^2 \right\} \quad (51)$$

$$\theta = \alpha t_h / c^2 ; \beta_1 = a/c ; \beta_2 = b/c.$$

O valor θ é a expressão do tempo adimensional (número de Fourier); β_1 e β_2 expressam a forma do bloco; e l, m, n são integradores positivos de zero a infinito.

Sendo p' definida como

$$p' = -\log \frac{T_r - T_h}{T_0}$$

, j_h definida como coeficiente de intersecção da tangente no ponto θ , p' e Δf a diferença percentual (em base da assíntota) entre o índice de declive da tangente nesse ponto (θ , p') e a assíntota, tem-se:

$$p' = -\log \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{lmn} \cdot \exp(-A_{lmn} \cdot \theta) \quad (52)$$

$$\log j_h = \frac{0.2,303 \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{lmn} \cdot C_{lmn} \cdot \exp(-C_{lmn} \cdot \theta)}{\sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{lmn} \cdot C_{lmn} \cdot \exp(-C_{lmn} \cdot \theta)} - p' \quad (53)$$

$$\Delta f = 100 \frac{C_{000} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{lmn} \cdot \exp(-C_{lmn} \cdot \theta)}{\sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{lmn} \cdot C_{lmn} \cdot \exp(-C_{lmn} \cdot \theta)} - 1 \quad (54)$$

Nessas condições, as assíntotas são:

Forma	j
Paralelepípedo retangular	2,064
Placa infinita uniforme	1,273
Bastão infinito retangular	1,621

Quando β_1 e β_2 são pequenos, o valor de j_h aproxima-se da

j da assíntota de paralelepípedo quando p' fica $\leq 2,5$ (na prática, isso corresponde ao valor g de $\geq 0,390$). Quando β_1 é muito maior que β_2 , o valor de j_h aproxima-se do valor j de bastão retangular infinito e quando β_1 e β_2 são valores grandes, o valor j_h aproxima-se da placa infinita, nos valores de $p' \leq 2,5$. Quando p' torna-se bastante elevado, os valores de j_h para quaisquer valores de β_1 e β_2 aproximam-se a 2,064.

Griffin *et al.* (1971) desenvolveram as equações para a fase não exponencial da curva de esfriamento, considerando como sendo a diferença $d = \pm I_d - I_c$ ($d = I_d - I_c$, quando $j_c > 1$ e $d = I_c - I_d$, quando $j_c < 1$) uma função exponencial do tempo, t_c .

Portanto:

$$\log d = \log d_0 - t_c/s \quad (55)$$

Ou seja,

$$d = \log^{-1} \{ \log d_0 - (t_c/s) \} \quad (56)$$

Onde: s é um índice de declive da reta, relacionado com o f_c pelas equações 63 e 64.

Para $j_c > 1$:

$$d = I_d - I_c \text{ ou } I_c = I_d - d \quad (57)$$

$$\text{E, } d_0 = j_c I_{c0} - I_{c0} \quad (58)$$

Portanto,

$$d = \log^{-1} \{ \log(j_c I_{c0} - I_{c0}) - (t_c/s) \} \quad (59)$$

Para $j_c < 1$:

$$d = I_c - I_d \text{ ou } I_c = I_d + d \quad (60)$$

$$E, \quad d_0 = j_c I_{c0} - I_{c0} \quad (61)$$

Portanto,

$$d = \log^{-1} \{ \log(I_{c0} - j_c I_{c0}) - (t_c/s) \} \quad (62)$$

Para $j_c = 1$;

$$d = 0 \text{ e } d_0 = 0.$$

Por método de tentativa e erro, concluíram que s está relacionado com f_c da seguinte forma:

$$\text{Quando } j_c > 1; \quad s = f_c \{1 - (1/j_c)\} \quad (63)$$

$$\text{Quando } j_c < 1; \quad s = f_c (1 - j_c) \quad (64)$$

Substituindo a equação 63 na 59 e 64 na 62, tem-se:

Quando $j_c > 1$;

$$d = \log^{-1} \{ \log(j_c I_{c0} - I_{c0}) - \frac{t_c \cdot j_c}{f_c (j_c - 1)} \} \quad (65)$$

Quando $j_c < 1$;

$$d = \log^{-1} \{ \log(I_{c0} - j_c I_{c0}) - \frac{t_c}{f_c (1 - j_c)} \} \quad (66)$$

Sendo,

$$t_c = f_c \cdot \log \{ j_c (I_{c0}/I_d) \} \quad (67)$$

, a equação geral da curva de esfriamento, e tirando-se o valor de I_d , tem-se a equação 68 seguinte:

$$I_d = \log^{-1} \{ \log(j_c I_{c0}) - (t_c/f_c) \} \quad (68)$$

Substituindo as equações 65 e 67 na 57, e 66 e 68 na 60,

tem-se:

Quando $j_e > 1$:

$$I_c = \log^{-1} \left\{ \log(j_e I_{c0}) - \frac{t_c}{f_c} \right\} - \log^{-1} \left\{ \log I_{c0} + \log(j_e - 1) - \frac{t_c \cdot j_e}{f_c(j_e - 1)} \right\} \quad (69)$$

Quando $j_e < 1$:

$$I_c = \log^{-1} \left\{ \log(j_e I_{c0}) - \frac{t_c}{f_c} \right\} + \log^{-1} \left\{ \log I_{c0} + \log(1 - j_e) - \frac{t_c}{f_c(1 - j_e)} \right\} \quad (70)$$

Os primeiros termos do membro direito das equações 69 e 70 representam o valor da ordenada do segmento retilíneo extrapolado da curva de esfriamento para o período compreendido pela porção curvilínea. O segundo termo representa a diferença entre a reta e o valor do segmento curvilíneo correspondente.

Também, foram desenvolvidos alguns trabalhos para locação da curva de aquecimento e esfriamento durante o processamento utilizando um computador digital, a fim de facilitar a tarefa de obtenção dos parâmetros. Hayakawa (1970a) descreveu um método para locar em gráfico, pelo uso de computador digital, as temperaturas obtidas experimentalmente em função do tempo. Nesse processo, o logaritmo da temperatura adimensional, $u(B) = (T_r - T)/I_0$, foi colocado em função do B . Dall'Oca et al. (1972) apresentaram um programa de computação para obter o gráfico $T_r - T_h$ versus t_h ou $T_c - T_w$ versus t_c , sendo a escala de temperatura em logaritmo. O programa fornece, também, os valores dos parâmetros f_h , f_c , j_h e j_c .

b. *Cálculo de Esterilização.*

O efeito de esterilização de um determinado processamento térmico é dado pela expressão

$$F_p = \int_{t_1}^{t_2} (L) dt = \int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{T-121,1}{z}} \cdot dt \quad (71)$$

Fazendo-se $F_p = F_{ph}$, tem-se o valor da esterilização da fase de aquecimento. Essa integral é uma função da temperatura T e do tempo t . Para poder integrar, é necessário transformar em uma função exclusiva do tempo ou da temperatura. Ball e Olson (1957) fizeram a transformação para a função exclusiva de temperatura.

$$t_b = f_h \cdot \log j_h + f_h \cdot \log I_0 - f_h \cdot \log (T_r - T_h) \quad (72)$$

A diferencial dessa equação é

$$dt_b = \frac{f_h}{2,303} \cdot \frac{dT_h}{(T_r - T_h)} \quad (73)$$

Substituindo na equação 71, tem-se

$$F_{ph} = \int_{t=t_1}^{t=t_2} \frac{f_h}{2,303} \cdot \frac{10^{\frac{T-121,1}{z}}}{(T_r - T_h)} \cdot dT_h \quad (74)$$

Fazendo algumas transformações algébricas, resulta:

$$F_{ph} = \int_{t=t_1}^{t=t_2} - \frac{f_h}{2,303} \cdot \frac{10^{\frac{T_r - T_h}{z}} \cdot \frac{T_r - 121,1}{z}}{(T_r - T_h)} \cdot d(T_r - T_h)$$

$$F_{ph} = - \frac{f_h \cdot 10^{\frac{T_r - 121,1}{z}}}{2,303} \cdot \int_{t=t_1}^{t=t_2} \frac{10^{-\frac{T_r - T_h}{z}}}{(T_r - T_h)} \cdot d(T_r - T_h) \quad (75)$$

Fazendo $x' = T_r - T_h$

$$F_{ph} = - \frac{f_h \cdot 10^{\frac{T_r - 121,1}{z}}}{2,303} \cdot \int_{t=t_1}^{t=t_2} \frac{10^{-\frac{x'}{z}}}{x'} \cdot dx' \quad (76)$$

Quando $t=t_1$; $x' = T_r - T_h = T_r - T_1$; e

quando $t=t_2$; $x' = T_r - T_h = T_r - T_2$.

Dai

$$F_{ph} = - \frac{f_h \cdot 10^{\frac{T_r - 121,1}{z}}}{2,303} \cdot \int_{T_r - T_1}^{T_r - T_2} \frac{10^{-\frac{x'}{z}}}{x'} \cdot dx' \quad (77)$$

Fazendo $-(2,303/z)x' = x$, e transformando a exponencial decimal em neperiano, resulta:

$$F_{ph} = - \frac{f_h \cdot 10 \frac{T_r - 121,1}{z}}{2,303} \cdot \int \frac{-\frac{2,303}{z}(T_r - T_2)}{-\frac{2,303}{z}(T_r - T_1)} \frac{e^{+x}}{x} dx \quad (78)$$

Ou, ainda

$$F_{ph} = \frac{f_h \cdot 10 \frac{T_r - 121,1}{z}}{2,303} \cdot \int \frac{-\frac{2,303}{z}(T_r - T_1)}{-\frac{2,303}{z}(T_r - T_2)} \frac{e^{+x}}{x} dx \quad (79)$$

A integral da equação 79 é resolvida com muita dificuldade. Felizmente, encontra-se os valores tabulados para a integral da expressão do tipo $\int \frac{e^{-x}}{x} dx$, para $0 < x < \infty$, em alguns livros especializados (por exemplo, Hořgaman *et al.* 1961-62).

A seguinte transformação é possível:

$$\int_{-\infty}^{-x} \frac{e^{-t}}{t} dt = \int_x^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt = -E_i(-x) \quad (80)$$

para $0 < x < \infty$

Onde: t .. uma variável independente.

x .. um limite.

Para aplicar a equação 80 na 79, deve-se lembrar que

$$\int_c^d \frac{e^{-t}}{t} dt = \int_{-\infty}^{-d} \frac{e^{-t}}{t} dt - \int_{-\infty}^{-c} \frac{e^{-t}}{t} dt \quad (81)$$

$$\int_c^d \frac{e^{-t}}{t} dt = -E_i(-d) + E_i(-c) \quad (82)$$

Onde: c e d são limites da integração.

Portanto,

$$\begin{aligned} \int \frac{-\frac{2,303}{z}(T_r - T_1)}{x} \frac{e^{+x}}{x} dx = -E_i\left\{-\frac{2,303}{z}(T_r - T_1)\right\} + \\ -\frac{2,303}{z}(T_r - T_2) \\ + E_i\left\{-\frac{2,303}{z}(T_r - T_2)\right\} \end{aligned} \quad (83)$$

$$T_r - T_2 = I_g \text{ e } T_r - T_1 = I_0$$

Portanto, a equação 83 fica:

$$\begin{aligned} \int \frac{-\frac{2,303}{z}I_0}{x} \frac{e^{+x}}{x} dx = -E_i\left(-\frac{2,303}{z} \cdot f_h I_0\right) + E_i\left(-\frac{2,303}{z} \cdot I_g\right) \\ -\frac{2,303}{z}I_g \end{aligned} \quad (84)$$

Assim, o efeito da esterilização F_{ph} é obtida pela equação

$$F_{ph} = \frac{f_h \cdot 10^{\frac{T_r - 121,1}{z}}}{2,303} \left\{ -E_i\left(-\frac{2,303}{z} \cdot f_h I_0\right) + E_i\left(-\frac{2,303}{z} \cdot I_g\right) \right\} \quad (85)$$

Na prática, o primeiro termo do colchete,

$-E_1(-\frac{2,303}{z} \cdot j_h I_0)$, frequentemente resulta em um valor desprezível.

Isso indica que a temperatura inicial do alimento, T_0 , o valor da letalidade é extremamente baixo.

Hayakawa (comunicação pessoal) sugeriu que, em vez da equação 80, poder-se-ia usar a seguinte expressão para a integração da exponencial:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt = E_1(x) \quad (86)$$

Os valores de $E_1(x)$ são, também, tabulados em livros de expressões matemáticas. Obtem-se, então, em vez da expressão 85 a seguinte:

$$F_{ph} = \frac{f_h \cdot 10^{\frac{T_r - 121,1}{z}}}{2,303} \cdot \left\{ -E_1\left(2,303 \cdot \frac{j_h \cdot I_0}{z}\right) + E_1\left(2,303 \cdot \frac{I_g}{z}\right) \right\} \quad (87)$$

No esfriamento, deve-se considerar duas fases: A primeira a curvilínea e a segunda a exponencial. Para a fase curvilínea, Ball (1923) sugeriu a equação 21, que tirando o valor de x , tem-se:

$$x = b \sqrt{\frac{y^2}{a^2} - 1} \quad (88)$$

Diferenciando, obtem-se

$$dx = \frac{b}{a^2} \cdot \frac{y \cdot dy}{\sqrt{\frac{y^2}{a^2} - 1}} \quad (89)$$

O efeito da esterilização da fase curvilínea de esfriamento, F_{pec} , é dado pela equação 71, fazendo $F_p = F_{pec}$.

$$F_{pec} = \int_{T_g}^{T_I} 10^{\frac{T-121,1}{z}} . dt \quad (90)$$

Pela figura 2 observa-se que

$$T_g - T_c = y - 0,3I_w \quad \text{ou}$$

$$T_c + y = T_g + 0,3I_w \quad (91)$$

Ou, seja,

$$T_c = -y + T_g + 0,3I_w$$

$$T_c = -y + T_g + a \quad (92)$$

Substituindo os termos dt e T da equação 90 pelas equações 89 e 92, resulta

$$F_{pec} = \frac{b}{a^2} \int_{T_g}^{T_I} 10^{\frac{1}{z}(-y+T_g+a-121,1)} \cdot \frac{y dy}{\sqrt{\frac{y^2}{a^2} - 1}} \quad (93)$$

A integral da equação 93 é um tanto difícil. Ball (1923) resolveu-a por processo gráfico, após as transformações algébricas seguintes:

$$\text{No ponto } T_g, y = a \text{ e no ponto } T_I, y = a + 0,343I_w.$$

Portanto,

$$F_{pec} = \frac{b}{a^2} \cdot 10^{\frac{T_g - 121,1}{z}} \int_a^{a+0,343I_w} \frac{y \cdot 10^{\frac{-y-a}{z}} \cdot dy}{\sqrt{\frac{y^2}{a^2} - 1}} \quad (94)$$

Note-se que a integral da expressão 94 é imprópria, pois o termo fica igual a infinito quando $y = a$. Entretanto, a integral converge no valor próximo de $y = a$.

$$0 < y \cdot 10^{\frac{-y-a}{z}} \leq M \quad (95)$$

Onde, M é um certo número fixo. Portanto,

$$\begin{aligned} 0 < \int_a^{a+0,343I_w} \frac{y \cdot 10^{\frac{-y-a}{z}} \cdot dy}{\sqrt{\frac{y^2}{a^2} - 1}} &\leq M \int_a^{a+0,343I_w} \frac{dy}{\sqrt{\frac{y^2}{a^2} - 1}} = \\ &= aM \log(y + \sqrt{y^2 - a^2}) \Big|_a^{a+0,343I_w} \end{aligned} \quad (96)$$

Desde que $a = 0,3 I_w$: $0,343I_w = 1,14a$.

Fazendo $y = a\chi$

$$F_{pec} = \frac{b \cdot 10^{\frac{T_g - 121,1}{z}}}{a^2} \cdot \int_1^{2,14} \frac{\chi \cdot 10^{\frac{-a}{z}(\chi-1)} \cdot a d\chi}{\sqrt{\chi^2 - 1}} \quad (97)$$

$$F_{pcc} = b \cdot 10^{\frac{T - 121,1}{s}} \cdot 10^n \cdot \int_1^{2,14} \frac{x \cdot 10^{-nx} dx}{\sqrt{x^2 - 1}} \quad (98)$$

Onde: $n = a/s$

A peculiaridade em $x = 1$ no denominador da integral torna o mais complexo. Essa dificuldade foi sobrepujada empregando-se a integração por partes.

$$\int u dv = uv - \int v du \quad (99)$$

No presente caso, tem-se

$$u = 10^{-nx}$$

$$du = -2,303n \cdot 10^{-nx} dx$$

$$v = \sqrt{x^2 - 1}$$

$$dv = \frac{x dx}{\sqrt{x^2 - 1}}$$

Portanto,

$$\begin{aligned} \int_1^{2,14} \frac{x \cdot 10^{-nx} dx}{\sqrt{x^2 - 1}} &= 10^{-nx} \cdot \sqrt{x^2 - 1} \Big|_1^{2,14} + \\ &+ \int_1^{2,14} 2,303n \cdot 10^{-nx} \sqrt{x^2 - 1} \cdot dx \end{aligned}$$

$$\int_1^{2,14} \frac{x \cdot 10^{-nx}}{\sqrt{x^2 - 1}} dx = 1,89 \cdot 10^{-2,14n} + 2,303n \int_1^{2,14} 10^{-nx} \sqrt{x^2 - 1} dx \quad (100)$$

A integral da equação 100 foi resolvida por Ball (1923), avaliando-se a integral para vários valores de n pelo método gráfico, obtendo-se

$$E = \int_{a/z_e}^{(a+0,343I_w)/z_e} \frac{e^{-u}}{\sqrt{u^2 - (a/z_e)^2}} du \quad (101)$$

Onde, z_e é o valor de z quando se usa o logaritmo Neperiano.

Substituindo I_w por $a/0,3$; z por $2,303z_e$; e u por $(a/z_e)x$, a equação 101 fica:

$$E = \frac{2,303^2 \cdot a^2}{z^2} \int_1^{2,14} \frac{e^{-(2,303a/z)x}}{\sqrt{x^2 - 1}} dx \quad (102)$$

Ou, ainda

$$\frac{E}{2,303^2 \cdot n^2} = \int_1^{2,14} \frac{e^{-nx}}{\sqrt{x^2 - 1}} dx \quad (103)$$

Substituindo a expressão 103 em 100 e 100 em 98, e estabelecendo que $b = c \cdot f_c$, obtém-se

$$E_{pec} = c \cdot f_c \cdot 10^{\frac{E-121,1}{g}} \cdot 10^n (1,89 \cdot 10^{-2,14n} + 2,303n \frac{E}{2,303^2 n^2})$$

$$F_{pcc} = c.f_c \cdot 10^{\frac{T_g - 121,1}{z}} (1,89 \cdot 10^{-1,14n} + \frac{E}{2,303 \cdot n} 10^n) \quad (104)$$

Onde c é uma constante que depende de j_c .

Substituindo n por $0,3I_w/z$, tem-se

$$F_{pcc} = c.f_c \cdot 10^{\frac{T_w - 121,1}{z}} (1,89 \cdot 10^{-0,342I_w/z} + 1,447z \frac{E}{I_w} 10^{0,3I_w/z}) \quad (105)$$

Para $j_c = 1,41$ e se as temperaturas forem medidas em graus Fahrenheit, o valor de $c = 0,0759$ (Ball, 1923).

A porção logarítmica da curva de esfriamento vai do ponto T_I , que é $0,343 I_w$ graus centígrados inferior a T_g , até a temperatura cujo o efeito letal é desprezível. Ball (1923) considerou que a temperatura inferior a $44,4^\circ\text{C}$ (80°F) abaixo da temperatura de operação da autoclave não iria contribuir com valor considerável no F_p . Portanto, os limites dessa integração foram estabelecidas de $T_g - 0,343I_w$ a $T_p - 44,4^\circ\text{C}$.

Portanto;

$$F_{pcl} = \frac{f_c}{2,303} 10^{\frac{T_w - 121,1}{z}} \{ E_z \left| \frac{2,303}{z} (T_g - 0,343I_w - T_w) \right| - E_z \left| \frac{2,303}{z} (T_p - 44,4 - T_w) \right| \} \quad (106)$$

Entretanto,

$$T_g = 0,343I_w - T_w = 0,657I_w ; e$$

$$T_p = 44,4 - T_w = I_w + I_g = 44,4$$

$$F_{pel} = \frac{f_c}{2,303} 10^{\frac{T_w - 121,1}{z}} \{ E_z \left| \frac{2,303}{z} (0,657 I_w) \right| - \\ - E_z \left| \frac{2,303}{z} (I_w + I_g - 44,4) \right| \} \quad (107)$$

Durante a operação completa de esterilização, o total de efeito letal, F_p , é dada pela soma

$$F_p = F_{ph} + F_{pcc} + F_{pel} \quad (108)$$

Uma outra contribuição importante de Ball (1923) foi a descrição da relação entre f_h/U com o valor I_g . Foi demonstrado que, qualquer que seja o valor de f_h ou de U , o valor de I_g seria constante (para cada valor de $I_w + I_g$) se a relação f_h/U for constante. O valor U é definido como sendo o valor de esterilização, em minutos, a temperatura de operação, T_p .

Matematicamente é obtida pela equação

$$U = F_p \cdot 10^{\frac{121,1 - T_p}{z}} = F_p \cdot F_z \quad (109)$$

Uma desvantagem do método de Ball é no fato de considerar o valor de $j_c = 1,41$. Tem-se observado, experimentalmente, desvios bastante grandes dessa constante.

Stumbo e Longley (1966) desenvolveram uma tabela bastante extensa relacionando f_h/U com I_g para os valores de j_c de 0,4 a 2,0 e valores de z de 6,7 a 13,3°C. Isso nos permite calcular o

tempo de processamento, t_b , para um dado valor de esterilização, F_p , e vice-versa, para os produtos cujo os valores de j_c são diferentes de 1,41. Esse procedimento, entretanto, considera o índice de declive de aquecimento, f_h , igual ao de esfriamento, f_c . Por esse motivo, o método é aplicável com precisão suficiente, apenas a esterilização de alimentos enlatados, não sendo possível aplicar com precisão para prever a retenção de nutrientes no produto. Yen *et al.* (1971) apresentaram tabelas que complementam as tabelas de Stumbo e Longley (1966), possibilitando a sua aplicação para prever a retenção das propriedades do alimento. Hicks (1958) preparou uma série de tabelas, relacionando um termo, H , que é uma função da I_g e z com os parâmetros f_h , U_h , f_c , U_c e a relação U_c/U_h . Essa função H , que é dada pela equação

$$H = \frac{100U_h}{f_h} = \frac{1}{U_c/U_h} \cdot \frac{100U_c}{f_c} \quad (110)$$

é muito semelhante a função f_h/U de Ball. A diferença fundamental está no fato de que a função de Ball relaciona os efeitos letais do aquecimento e do esfriamento, ao passo que o U_h relaciona apenas o efeito letal de aquecimento. O efeito letal do esfriamento é relacionado pelo U_c .

Pflug (1968) desenvolveu as tabelas U_c/U_h , usando os dados para esfriamento do método melhorado de Ball (Ball e Olson, 1957). Isso possibilitou o uso da tabela de Hicks para o cálculo de esterilização de alimentos.

Herndon *et al.* (1968) apresentaram uma tabela derivada da curva do tempo de destruição térmica (equação 111) e da porção retilínea da curva de aquecimento durante a esterilização do alimento (equação 112).

$$\frac{1}{L} = \frac{t}{F} = \log \frac{-1 \ T_h - 121,1}{z} \quad (111)$$

$$t = f_h \cdot \log(j_h \frac{I_0}{I_h}) \quad (112)$$

Tomando-se os intervalos pequenos de tempo, Δt , da equação 112, multiplicando-se pelo valor L da equação 111, obteve-se o incremento de esterilização do processamento ΔF_p . A esterilização total, F_p , foi obtida pela soma de todos os ΔF_p , com auxílio de computador digital.

A tabela foi construída assumindo-se as seguintes condições hipotéticas de processamento: $f_h = 1,000$; $j_h = 1,000$; $I_0 = 100,000$; $t_l = 0$; e $T_r = 121,1^\circ\text{C}$ ($I_r = 0$). Obtiveram-se assim os valores de F' , t' e I : onde F' , t' são valores de esterilização e tempo acumulado de processamento.

Uma outra tabela, substituindo o valor de I_r , $I_r = T_h - 121,1$ da equação 111, relacionou o fator de correção de L para a situação em que a temperatura da autoclave, T_r , não seja igual a temperatura de referência, $121,1^\circ\text{C}$. Foi desenvolvida, ainda, a equação para corrigir a diferentes valores de f_h , j_h , I_0 e t_l , a fim de que a tabela seja aplicável às condições gerais de processamento. A equação resultante é

$$t_{op} = f_h(t' + \log j_h + \log I_0 - 2) - 0,42t_l \quad (113)$$

A equação para corrigir os dados de esterilização para a temperatura da autoclave diferente daquela de referência foi deduzida baseando-se na equação da letalidade. A equação final é

$$F_{ph} = F'_p \cdot f_h \cdot L \quad (114)$$

O método de Herndon *et al.* (1968) é aplicável com preci-

são, somente aos casos em que o produto se aquece por convecção, onde, a contribuição da fase de esfriamento na esterilização de alimento é desprezível. Griffin *et al.* (1971) desenvolveram uma série de tabelas que relaciona o valor da esterilização da fase de esfriamento, F_{pc} , com os diferentes valores de T_g , f_c , I_g , j_c . As tabelas foram construídas assumindo-se os seguintes valores para esses parâmetros: $T_g = 121,19^\circ\text{C}$; $f_c = 1,000$; $0,5 \leq j_c \leq 2,0$; $27,8 \leq I_g \leq 111,1$. Os valores considerados foram 5,6; 8,9; 10; e 12,2. Os fatores de correção para os diferentes valores de f_c e I_g foram calculados usando a equação

$$F_{pc} = f_c \cdot L \cdot F'_{pc} \quad (115)$$

Os valores de L foram obtidos em tabelas de Herndon *et al.* (1968), substituindo $IL_c = 121,1 - T_g$ por $IL = 121,1 - T_r$.

Hayakawa (1970b), empregando as fórmulas experimentais, desenvolveu o seguinte método para o cálculo da esterilização. Inicialmente, foram adotados os seguintes teoremas:

Teorema A - O valor do parâmetro de processamento, U , para qualquer valor de z , z_b , pode ser avaliado de um valor U para um valor z de referência, z_a , aplicando-se as equações seguintes:

$$z_a/z_b = K_s \quad (116)$$

$$U = \int_0^{t_f} 10^{\frac{T-T_r}{z_b}} dt = \int_0^{t_f} 10^{\frac{(T-T_r)/K_s}{z_a}} dt \quad (117)$$

Teorema B - O valor de U para a fase de esfriamento, U_c , pode ser avaliado pela seguinte equação:

$$U_c = \int_0^{t_e} 10^{\frac{T-T_r}{z_b}} . dt_c$$

$$= 10^{\frac{-I_g \cdot K_s}{z_a}} \cdot \int_0^{t_e} 10^{\frac{(T-T_g)/K_s}{z_a}} . dt_c$$

$$U_c \cdot 10^{\frac{I_g \cdot K_s}{z_a}} = U_{gc} = \int_0^{t_e} 10^{\frac{(T-T_g)/K_s}{z_a}} . dt_c \quad (118)$$

Foram construídas as tabelas para U_h/f_h e para U_{gc}/f_c , aplicando-se as fórmulas 116, 117 e 118. Essas relações são inversas daquelas apresentadas por Ball e Olson (1957) e por Stumbo (1965).

As tabelas de U_h/f_h e U_{gc}/f_c foram construídas, assumindo os seguintes valores para os parâmetros: $f_h = f_c = 30$ minutos; $j_h = 1,00$; $T_r - T_0 = 83,39^\circ\text{C}$; e $z = 11,19^\circ\text{C}$. Os valores de esterilização podem ser calculados sem nenhuma restrição usando as tabelas assim apresentadas, uma vez que essas relações adimensionais são independentes de f_h e f_c , e o valor de esterilização da parte curvilínea do aquecimento devido a j_h é desprezível.

Hayakawa (1970) comparou os valores de esterilização, F_p , obtidos por método geral, método de Ball e Olson (1957), método de Pflug (1968) e método de Hayakawa (1970). Os resultados obtidos com sopas enlatados e alimentos proteinados engarrafados mostraram que o método de Hayakawa era o que mais se aproximava do método geral. Qualquer que seja o método empregado, o valor de esterilização da fase de aquecimento, F_{ph} , era bastante concordante. Entretanto, o valor de esterilização da fase de esfria

mento, F_{pc} , era por demais super-avaliado quando se usava o método de Ball e Olson ou de Pflug. Essa discrepância era observada tanto para a esterilização do produto como também para a retenção de nutrientes do alimento.

c. Esterilização Média da Massa.

Até o momento, discutiu-se apenas com referência a determinação do valor de esterilização no ponto crítico do alimento enlatado. É interessante saber, principalmente com relação a retenção de propriedades nutritivas e sensoriais do alimento, o valor médio de tratamento térmico, designado nesse trabalho como valor de esterilização média da massa, F_s .

Stumbo (1948) descreveu a distribuição da temperatura em um dado momento da esterilização de uma lata cilíndrica que se aquece por condução, assumindo as superfícies isotérmicas como sendo cilíndricas de tamanho cada vez menor a medida que for aprofundando da superfície para o centro geométrico do recipiente. Essa hipótese é errônea, uma vez que a superfície isotérmica é aproximadamente cilíndrica na região próxima a superfície da lata, mas aproxima-se a forma elipsoidal ou esférica a medida que se aproxima do centro.

Mesmo assim, Stumbo (1948) demonstrou que na lata 603 x 700 (155 x 177,8 mm) o número de sobreviventes para cada volume elementar após um tratamento de calor era mais elevado no plano que cruza o raio do cilindro a um quarto de distância do centro.

Teixeira *et al.* (1969), utilizando o método baseado na difusão térmica dos sólidos após a divisão do recipiente em seções, chegaram ao resultado semelhante a de Stumbo com relação a distribuição de sobreviventes. Eles demonstraram, ainda, que a posição desse plano de máximo de sobreviventes por volume elementar muda um pouco com o formato da lata e com as condições de processamento. Observando a distribuição vertical de sobreviventes por volume elementar, verificaram que as latas 603 x 700 (155 x 177,8 mm) e 307 x 409 (83,8 x 116 mm) apresentavam o máximo de sobreviventes no plano central. Entretanto, na lata 211 x 109

(68,2 x 39,5mm), notaram que o máximo de sobreviventes por volume elementar localizava a um quarto de distância do centro às tampas. Em qualquer tipo de latas, o máximo de sobreviventes por unidade de volume localizava-se no centro geométrico da lata.

Stumbo (1949), considerando o conceito acima, apresentou um método para determinar o valor de esterilização média da massa, F_g . Gillespy (1951), também, apresentou um método para determinar F_g , considerando as superfícies de valores equivalentes de esterilização, superfície iso- F . Hicks (1951) considerou valores de F e a relação de sobreviventes (a/b) em vários pontos da lata de alimento e procedeu a integração gráfica. Hicks (1953) comparou os resultados obtidos por esses tres autores, e verificou que eram praticamente os mesmos.

Stumbo (1953) considerou as superfícies iso- F durante a esterilização das latas cilíndricas, cuja forma variava de cilindro a elipsoidal ou esférica a medida que aprofundava da superfície para o centro geométrico do recipiente. Toda a superfície iso- F é, também, uma superfície iso- j , o que pode ser visto pela equação usada para determinar o tempo de processamento

$$t_b = f_h \cdot \log \frac{j_h \cdot I_0}{I_g} \quad (19)$$

Sendo t_b , f_h e I_0 invariáveis para um dado processamento, o valor F_p das diferentes partes da lata depende do valor F_g alcançado naquele ponto da lata e, portanto, do j_h .

Essas regiões iso- j foram descritas empregando-se a equação desenvolvida por Olson e Jackson (1942), seguinte:

$$j_\lambda = j_e \cdot j_0 \left(R \frac{r}{a} \right) \cdot \cos \frac{\pi y}{2b} \quad (119)$$

Onde: j_λ .. j no ponto desejado do recipiente.

j_e .. j no centro geométrico do recipiente.

$J_0(x)$.. ordem zero da função x de Bessel, obtido da seguinte forma:

Sendo,

$$J_n(x) = \frac{x^n}{2^n} \sum_{\mu=0}^{\infty} \frac{(-1)^\mu x^{2\mu}}{4^\mu \mu! \Gamma(n + \mu + 1)}$$

a função de Bessel; e assumindo-se $x = 0$, tem-se:

$$\begin{aligned} J_0(x) &= \sum_{\mu=0}^{\infty} \frac{(-1)^\mu x^{2\mu}}{4^\mu \mu! \Gamma(\mu + 1)} \\ &= \frac{1}{\Gamma(1)} - \frac{x^2}{4 \Gamma(2)} + \frac{x^4}{4^2 2 \Gamma(3)} - \frac{x^6}{4^3 3! \Gamma(4)} + \dots \\ &= 1 - \frac{x^2}{8} + \frac{x^4}{4^3} - \frac{x^6}{4^3 (3!)^2} + \frac{x^8}{4^4 (4!)^2} - \\ &\quad - \frac{x^{10}}{4^5 (5!)^2} + \dots \end{aligned}$$

Em que: $\Gamma(1) = 1$

$\Gamma(n) = (n - 1)$

Os valores da função de Bessel para diferentes valores de x são tabulados em livros de expressões matemáticas.

R_1 .. primeira raiz positiva de $J_0(x) = 0$

r .. distancia do ponto medido no raio do recipiente a partir do eixo vertical do recipiente.

$2b$.. altura do recipiente.

a .. raio do recipiente.

Aplicando-se essa equação, determinou-se várias curvas iso- j do centro para a parede do recipiente cilíndrico de tamanho 603 x 700 (155 x 177,8 mm). O volume de cada região iso- j foi determinado pelo método de cálculo do volume de um sólido de revolução.

O valor de F_p que caracteriza o tratamento de calor recebido em qualquer ponto iso- j , F_λ , pode ser obtido aplicando-se a equação do efeito letal no único ponto. Verificou-se, experimentalmente, que a relação $F_\lambda - F_e$ e o volume envolvido pela região iso- j era virtualmente linear, pelo menos até o volume fracional de 0,4.

Admitindo essa relação, e considerando a exponencialidade na destruição de bactérias submetidas a temperatura letal e constante, a equação para calcular o valor de esterilização média da massa, F_s , foi deduzida, obtendo-se:

$$F_s = F_e - D_r \{ \log D_r + \log V - [\log 2,303 + \log (F_\lambda - F_e)] \} \quad (120)$$

Relacionando-se j_λ/j_e com o volume fracional, V , observou-se que a volume $V = 0,19$; $j_\lambda/j_e = 0,5$, e consequentemente $g_\lambda/g_e = 0,5$. Então, a equação 120 fica

$$F_s = F_e + D_r (1,084 + \log \frac{F_\lambda - F_e}{D_r}) \quad (121)$$

quando $g_\lambda = 0,5g_e$ e $j_\lambda = 0,5j_e$

Ball e Olosn (1957), adotando um critério semelhante da distribuição de temperatura durante a esterilização, desenvolveram um método para determinar o valor de esterilização média da massa, F_s . Nesse método, o recipiente foi dividido em regiões iso- j (= iso- F , = isoterma) denominadas regiões pseudo-isotermas de valores fracionários de espessuras iguais. Foram determinadas a relação volumétrica para cada região pseudo-isoterma, e a distribuição de temperatura durante o aquecimento e esfriamento. Com isso calculou-se o valor F_p para cada uma dessas regiões pseudo-isotermas e a relação de sobreviventes do fator termicamente vulnerável de cada região pseudo-isoterma comparadas com o ponto crítico.

A seguir, determinou-se a relação de sobreviventes médios da massa e finalmente o valor médio de esterilização, F_p . A relação de sobreviventes médios da massa foi obtida somando-se o produto da relação volumétrica de cada região pseudo-isoterma com a respectiva relação de sobreviventes do fator termicamente vulnerável. O valor F_s foi obtida aplicando-se a equação da velocidade letal relativa dos microrganismos a relação de sobreviventes médios da massa.

Teixeira *et al.* (1969a) desenvolveram um método para calcular o valor de F_s , dividindo o recipiente em seções verticais e horizontais, cada seção formando um volume elementar em forma de disco ou anel. Para cada volume elementar, foi aplicada a equação geral de velocidade de inativação da bactéria seguinte, que é a diferencial da equação 1.

$$-\frac{dn}{dt} = \frac{1}{D} \cdot n \quad (122)$$

Ou, integrando a pequeno intervalo de tempo, Δt , tem-se

$$n^{(t+\Delta t)} = n^{(t)} \cdot \exp\left(\frac{-\Delta t}{D}\right) \quad (123)$$

A resistência relativa da bactéria pode ser dada pela expressão seguinte, que é diferencial da equação 6:

$$-\frac{dD}{dt} = \frac{1}{z} \cdot D \quad (124)$$

Ou, integrando a equação 124 no intervalo $T_0 - T$, tem-se

$$D = D_p \cdot \exp \frac{(T_0 - T)}{z} \quad (125)$$

Para fazer os cálculos por meio de computador digital, a temperatura média no intervalo de tempo foi fornecida pela temperatura do centro da área elementar. Isso foi usado para calcular a velocidade letal dentro do intervalo de tempo, Δt , usando a equação 125. Daí, a concentração de sobreviventes foi obtida aplicando a equação 123.

Também, aplicou-se a equação da distribuição de temperatura em um cilindro finito que se aquece por condução, seguinte:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (126)$$

Onde: T .. temperatura.
 r .. distancia radial da linha central da lata.
 y .. distancia vertical medida do plano central.
 α .. difusividade térmica do material.
 t .. tempo.

Para o uso no computador, a equação 126 foi transformada em forma de diferença finita, seguinte:

$$\begin{aligned}
T_{(i,j)}^{(t+\Delta t)} = & T_{(i,j)}^{(t)} + \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} \{ T_{(i-1,j)}^{(t)} - 2T_{(i,j)}^{(t)} + T_{(i+1,j)}^{(t)} \} + \\
& + \frac{\alpha \Delta}{2r \Delta r} \{ T_{(i-1,j)}^{(t)} - T_{(i+1,j)}^{(t)} \} + \\
& + \frac{\alpha \Delta}{\Delta y^2} \{ T_{(i,j-1)}^{(t)} - 2T_{(i,j)}^{(t)} + T_{(i,j+1)}^{(t)} \} \quad (127)
\end{aligned}$$

Onde, as subscrições i e j significam a sequência de elementos volumétricos radiais e verticais, respectivamente.

Para o cálculo, foi considerado no início de esterilização, a distribuição uniforme de temperatura no produto e a temperatura externa igual a temperatura de operação da autoclave. Em seguida, aplicando a equação 127 foi determinada a distribuição da temperatura no centro de cada segmento elementar após um tempo Δt . Considerando-se essa segunda série de temperatura como a temperatura inicial para o segundo intervalo de tempo Δt , calculou-se uma distribuição de temperatura após o tempo Δt , e assim sucessivamente, obtendo-se a distribuição de temperatura elementar durante toda a fase de aquecimento. Para a fase de esfriamento, empregou-se o mesmo sistema de cálculo, mudando-se a temperatura da autoclave pela temperatura da água de esfriamento.

A difusividade térmica, α , foi obtida aplicando-se a equação de Olson e Jackson (1942), seguinte:

$$\alpha = \frac{0,398}{\left(\frac{1}{r^2} + \frac{0,427}{h^2} \right) \cdot f_h} \quad (128)$$

Onde: r .. raio do cilindro finito.
 h .. meia distancia do cilindro finito.
 f_h .. índice de declive.

Baseando-se nesses dois procedimentos, foi desenvolvido um programa de computação para o cálculo de F_g , para alimentos que se aquecem por condução.

Os resultados indicaram que o intervalo de tempo de 1/8 minutos e volume elementar de 1/10 do raio por 1/10 da meia distância vertical forneceram a precisão semelhante a aquele usando um intervalo menor de tempo e/ou de volume menor.

Usando os mesmos exemplos citados por Stumbo (1965), os autores mostraram que os resultados eram comparáveis aos obtidos pelo método de Stumbo (1953). Isso indica que o método de Teixeira *et al.* (1969a) pode ser aplicado para determinar a esterilização. Não há, entretanto, na literatura, trabalhos de avaliação comparativa desse método aplicado à retenção de nutrientes do alimento.

Timbers e Hayakawa (1967) compararam os resultados obtidos por dois outros métodos para o cálculo de F_g , o de Ball e Olson (1957) e de Stumbo (1953) com o resultado experimental. Uma concordância boa foi notada pelos tres resultados quando os valores de D_r e z eram da magnitude de destruição dos microrganismos. Entretanto, uma discrepância maior foi observado quando os parâmetros, D_r e z eram da grandeza de retenção de nutrientes.

Uma técnica semelhante a de Teixeira *et al.* (1969a) acima descrita, foi empregada por Manson *et al.* (1970) para determinar o valor de esterilização média da massa, F_g , das latas retangulares (paralelepípedos). Nesse caso assumiu-se que o recipiente era simétrico para os tres planos centrais. Aplicaram a equação de Fourier seguinte:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (129)$$

Onde: x, y, z são as distancias medidas nos eixos dos x, y, z ,
respectivamente.

T .. temperatura.

α .. difusividade térmica.

t .. tempo.

Considerando a difusividade térmica como relacionada a f_h pela equação

$$\alpha = \frac{0,933}{4\{(1/l)^2 + (1/v)^2 + (1/w)^2\}f_h} \quad (130)$$

foi determinada a distribuição de temperatura atravez do recipiente durante o aquecimento e esfriamento do alimento. Para calcular a equação diferencial 129 por meio de computador digital, essa foi transformada em forma de diferença finita, seguinte:

$$\begin{aligned} \Delta^2 x(T_{i,j,k,n}) + \Delta^2 y(T_{i,j,k,n}) + \Delta^2 z(T_{i,j,k,n}) = \\ = \frac{(T_{i,j,k,n+1}) - (T_{i,j,k,n})}{\alpha \Delta t} \end{aligned} \quad (131)$$

Onde:

$$(T_{i,j,k,n}) = \frac{(T_{i-1,j,k,n}) - (2T_{i,j,k,n}) - (T_{i+1,j,k,n})}{\Delta x^2}$$

i, j, k, n .. são índices.

A destruição de bactérias e de nutrientes do alimento foi considerada da mesma forma que para as latas cilíndricas, apresentadas por Teixeira *et al.* (1969a).

Hayakawa (1969b) desenvolveu um método matemático para calcular o valor de F_g destinado especialmente para verificar a re-

tenção de propriedades do alimento. Nesse método, seis grupos adimensionais seguintes foram selecionados após um estudo com auxílio de computador digital.

$$C_b = (0,5 \cdot t_b/D_r) \cdot 10^{(T_r - 121,1)/z} \quad (132)$$

$$F_k = F_s / (D_r \cdot C_b) \quad (133)$$

$$m = u/l \quad (134)$$

$$u_g = I_g/I_0 \quad (135)$$

$$T_x = (T_r - T_w)/z \quad (136)$$

$$T_z = I_0/z \quad (137)$$

O valor de F_k foi calculado pela característica do tempo de destruição térmica de nutriente e pelos dados da condição de processamento térmico. O valor de F_s é obtido facilmente quando se conhece o valor de F_k . As tabelas foram preparadas para esses parametros adimensionais, aplicados a inativação dos nutrientes. Por meio dessas tabelas, pode-se determinar o valor F_k através dos valores de C_b , m , T_x , T_z , u_g . Exceto u_g , todos os parâmetros podem ser facilmente calculados. O valor de u_g pode ser calculado pela equação 138 seguinte, se f_h e j_h forem conhecidos.

$$u_g = j_h \cdot 10^{-t_b/f_h} \quad (138)$$

Para o desenvolvimento da fórmula, foi considerado que a distribuição da temperatura de um recipiente cilíndrico de alimento termicamente condutivo é simétrica com relação ao eixo central. A relação do sobrevivente médio da massa do fator termicamente vulnerável é dada pela expressão seguinte:

$$\bar{n}/n_0 R = 2 \int_0^1 \rho d\rho \int_0^1 d\zeta \cdot 10^{-(F_{ph} + F_{pc})/D_r} \quad (139)$$

Onde:

$$F_{ph} = \frac{t^2}{\alpha} \cdot 10^{\frac{T_r - 121,1}{z}} \int_0^{B_h} dB_h \cdot \exp\left\{-2,30259 \frac{I_0}{z} (B_h, \rho, \zeta)\right\} \quad (140)$$

E,

$$F_{pc} = \frac{t^2}{\alpha} \cdot 10^{\frac{T_r - 121,1}{z}} \int_0^{B_f} dB_c \cdot \exp\left\{2,30259 \frac{T_r - T_w}{z} \theta(B_c, \rho, \zeta) - 2,30259 \frac{I_0}{z} \theta(B_c + B_h, \rho, \zeta)\right\} \quad (141)$$

As equações 140 e 141 são obtidas pelo produto da equação da velocidade letal (equação 9) com a equação adimensional da curva de aquecimento (equação 24) e de esfriamento (equação 28), respectivamente.

A expressão $\theta(B)$ é obtida pela equação 29 seguinte:

$$\theta(B, \rho, \zeta) = \frac{8}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(p_k, \rho)}{J_1(p_k) p_k} \frac{e^{-AB}}{2n-1} \cdot \text{sen}(2n-1)\pi\zeta \quad (29)$$

Por tentativa e erro foi determinado o valor de B_w que re

apresenta o intervalo da fase de esfriamento.

$$1,0 - u_g \leq 10 \{ \theta(B_w, 0, 0,5) - \theta(B_w + B_h, 0, 0,5) \} \quad (142)$$

O expoente da equação 141 foi transformado da seguinte forma:

$$(F_{ph} + F_{pc})/D_r = C_b (CINT + HINT)$$

Onde:

$$HINT = \frac{2}{B_h} \int_0^{B_h} 10^{-T_z \theta(B_h, \rho, \zeta)} dB \quad (143)$$

$$CINT = \frac{2}{B_h} \int_0^{B_w} 10^{T_x \theta(B_w, \rho, \zeta) - T_z \theta(B_w - B_b, \rho, \zeta)} dB_w \quad (144)$$

As integrações de CINT e HINT foram feitas aplicando-se as fórmulas de Simpson e de Lobatto (Michels, 1963). A equação 139 foi calculada utilizando-se a fórmula de 12 pontos de Hammer e Strout (1958) para obter os valores da integração dupla. Para aplicar na fórmula, os valores de ρ e ζ foram transformados para

$$\rho = 0,5\rho' + 0,5 \quad \text{e} \quad \zeta = 0,75\zeta' + 0,75$$

Os valores de F_g foram calculados da equação 139 pela seguinte:

$$F_g = D_r \cdot \log(n_0 R / \bar{n}) \quad (145)$$

Esse método tem uma maior precisão do que os métodos até então discutidos (Ball e Olson, 1957; Gillespy, 1951; e Stumbo, 1953) porque considera-se não apenas o primeiro termo na série de somatórias para avaliar a distribuição da temperatura transitória, mas de todos os termos não desprezíveis dessa série.

Timbers e Kayakawa (1967) desenvolveram os programas para cálculo de F_g usando o computador digital pelos métodos de Ball e Olson (1957) e de Stumbo (1953). Manson e Zahardnik (1967) apresentaram os programas de computação para determinar o tempo de processamento, t_b , para um dado F_g , e o número de sobreviventes esperados para um dado processamento. O método empregado para o cálculo foi o de Stumbo (1953) ampliado para atender a diferentes valores de j_c (Stumbo e Longley, 1966).

Erros dos Parâmetros

Surpreendentemente poucos trabalhos tem-se publicados com relação aos possíveis erros na determinação dos parâmetros de esterilização de alimentos e a sua influência no fator de segurança do produto. Hicks (1961) apresentou uma revisão sobre os diversos fatores que afetam na determinação experimental dos parâmetros e a extensão que o mesmo pode influir na esterilidade do produto calculado. Por conveniência, essa discussão foi dividida em dois itens: (1) Erros oriundos dos dados bacteriológicos; (2) erros oriundos da medida de temperatura. Além desses erros causados pela falta de precisão nos métodos de medidas, há, também, os erros sistemáticos que podem aparecer do método de cálculo usado e das simplificações introduzidas na dedução das equações.

a. Erros oriundos dos dados bacteriológicos.

Esses erros são devidos as variações da determinação do valor F (ou D) e z das bactérias. São causados pelos erros experimentais motivados pela imperfeição nas técnicas de determinação da resistência de bactérias ao calor e pela variação real nas propriedades dos esporos bacterianos e do alimento.

Stumbo *et al.* (1950), trabalhando com a bactéria PA 3679, encontraram, num ensaio cuidadosamente conduzido, um coeficiente de variação para o valor z inferior a 2%. Pflug e Esselen (1953) também apresentaram os resultados cujo valor do coeficiente de variação era da ordem de 2%. Entretanto, Kaplan *et al.* (1954) observaram um coeficiente de variação da ordem de 9% para o valor z da bactéria PA 3679. Yokoya e York (1955) observaram um coeficiente de variação de 21% no valor D de *Bacillus coagulans* 43P, determinados em diferentes condições de meio de suspensão e de subcultura.

b. Erros oriundos da medida de temperatura.

Os parâmetros aqui considerados são f_h , f_c e g (ou j), cujos erros resultam do erro experimental e da variação real nas propriedades térmicas de cada lata de alimento. Hurwicz e Tischer (1956) acharam um coeficiente de variação de 6,46% no valor experimental da difusividade térmica de carne enlatada. A difusividade térmica é relacionada inversamente ao valor f_h ou f_c . Quashou *et al.* (1970) encontraram um desvio da média de até 12,3% nos diferentes ensaios de determinação da condutividade térmica da carne bovina moída e em pedaços. Não houve relação entre o teor de gordura ou da água no produto com a diferença da condutividade térmica.

Esselen *et al.* (1951) observaram coeficientes de variações maiores que 15% para os casos de alimentos heterogêneos. Hicks (1961) observou que um coeficiente de variação de 5 a 10%

era comum nos produtos enlatados.

Os valores de g (ou j) são mais afetados pelas variáveis de processamento que f_h ou f_c , de modo que, há menor evidência na precisão do valor avaliado. Hicks (1961) observou que o coeficiente de variação do valor g era da ordem de 2,5%. Um estudo sobre os principais fatores que afetam a variação do valor j de produtos que se aquecem por condução foi apresentado por Evans (1958). Além das variações de processamento, como o tempo de ascensão da temperatura da autoclave e do tempo entre desligamento do vapor e entrada da água de esfriamento, a distribuição da temperatura da lata no início do processo de aquecimento ou esfriamento, os fatores seguintes são responsáveis pelo valor de j inferior a aquele esperado teoricamente:

(a) Variação da propriedade térmica do alimento com a mudança de temperatura.

(b) Resistência ao fluxo de calor do espaço livre.

(c) Aproximação lenta a assíntota da curva devido a diferente velocidade de aquecimento através das paredes laterais e tampas.

No aquecimento da lata 301 x 411 (93,5 x 118 mm), o valor j teórico de 2,04 é aumentado de 7% pelo fator (a); diminuído de 4,5% pelo fator (b) e 10% pelo fator (c), obtendo-se uma redução global de 7,5% ($j = 1,90$). No esfriamento, o valor de j teórico de 2,04 é decrescido de 10% pelo fator (a), 4,5% pelo fator (b) e mais 10% pelo fator (c), obtendo-se a redução total de 25% ($j = 1,53$).

Além dos erros experimentais e das variações para cada lata, pode haver, também, erro sistemático na determinação dos dados de temperatura. Esses são devido a condução de calor através do termelétrico (Ecklund, 1956; Cowell *et al*, 1960). Ecklund (1956) observou que as latas menores eram mais sujeitas a erros e apresentou os fatores de correção nos valores de j para diferentes diâmetros de latas comercialmente encontradas.

Board *et al*. (1960) observaram que a fase de esfriamento era mais importante e podia ser afetada por vários fatores, inclusive o tipo de alimento, vácuo da lata, pressão da autoclave

e o tempo decorrido entre o fechamento do vapor e a entrada da água de esfriamento.

Tradicionalmente, o método usado para o cálculo de esterilização é feito empregando o maior valor de f_h obtido experimentalmente, ou seja, os dados de mais lento aquecimento. Powers *et al.* (1962) compararam os diversos métodos estatísticos aplicados a valores de F_p . Verificaram que os valores de F_p não obedecia a nenhuma distribuição de frequência conhecida. Além disso, essas distribuições mudavam com o tempo de processamento.

Herndon (1971) aplicou os princípios de estatística na curva de aquecimento, assumindo a distribuição normal do índice de declive, f_h . Essa distribuição foi separada em segmentos, cada um tendo um certo valor f_g . Daí, foi calculado o valor F_p e o número de amostras deterioradas para cada segmento, assumindo um certo tempo de processamento. Finalmente, o número total de latas deterioradas foi avaliado, somando-se o número de amostras deterioradas. Observou-se que os dados obtidos com lotes inoculados aproximavam-se mais aos resultados obtidos por esse método do que aqueles usando a média do índice de declive ou o valor máximo de declive.

EXPERIMENTO

O ensaio de penetração de calor foi conduzido em autoclave vertical pequeno (50 cm de diâmetro x 100 cm de altura) Dixie modelo RDSW-3 da Dixie Cannery Equipment Co., Athens, Georgia, U.S.A. A temperatura de operação de 121°C era atingida em 2 a 3 minutos após o início da introdução do vapor (tempo de ascensão) e o período entre o desligamento do vapor e a introdução da água de esfriamento, também, era da ordem de 3 minutos (ver figura 3).

O registro da temperatura da autoclave e do alimento no seu ponto crítico foi conduzido por intermédio de um registrador potenciométrico automático Honeywell, Modelo 15 da Honeywell, Wayne and Windrin Avenue, Philadelphia, Pennsylvania 19144, U.S.A. Para acoplar ao potenciômetro acima, foi usado o termelétrico de cobre-constantan tipo T da O. F. Ecklund Custom Thermocouples, Box 279, Cape Coral, Florida 33904, U.S.A. Esses termelétricos fabricados conforme as especificações da Ecklund (1949) permitem uma fácil adaptação e retirada das latas.

O purê de ervilha foi produzido a partir da ervilha desidratada da seguinte forma: (i) Inicialmente a ervilha foi re-hidratada deixando-a embebida em água a temperatura ambiente por 12 horas. (ii) Essa ervilha foi autoclavada por 40 minutos a 121°C adicionando-se água na proporção de 1,5 vezes o peso drenado. (iii) Esse conjunto foi, em seguida, homogeneizado em um moinho coloidal Gifford, Modelo GW da Gifford-Wood Inc., Hudson, New York, U.S.A., até obter uma massa homogênea. (iv) Finalmente, a massa foi autoclavada a 121°C por 30 minutos a fim de expulsar o ar englobado.

O purê foi colocado em latas na temperatura de 70-75°C, recravadas, e deixadas em banho a 55°C até que a diferença da temperatura do banho e do produto seja inferior a 2°C.

A suspensão de bentonita foi obtida dissolvendo-se a ben-

tonita 325 Mesh da E. H. Sargent and Co., na proporção de 10 gramas por 100 ml de água. A colocação da suspensão na lata e a obtenção do equilíbrio da temperatura foi conduzida da mesma forma que no caso do purê. O recipiente usado para os ensaios de penetração de calor foi a lata de 1/2 quilo (73,3 x 111 mm). A curva de aquecimento e esfriamento foi traçada, deixando a temperatura do produto atingir até que a diferença entre a temperatura do produto e do meio exterior (autoclave ou água de esfriamento) se torne inferior a 5°C.

A temperatura do produto foi registrada cada 2 minutos durante todo o período do ensaio. Para cada ensaio, foram utilizados 18 latas de produto, sendo sempre deixados pelo menos dois termelétricos para a medida de temperatura da autoclave.

Para a determinação dos parâmetros conforme o método proposto por Dall'Oca *et al.* (1972) e para os cálculos de processamento e do número de sobreviventes foi utilizado o computador IBM Modelo 1130, acoplado a um "plotter". Os estudos teóricos e desenvolvimento de fórmulas matemáticas foram feitos com o auxílio do mesmo computador e do computador IBM Modelo 360.

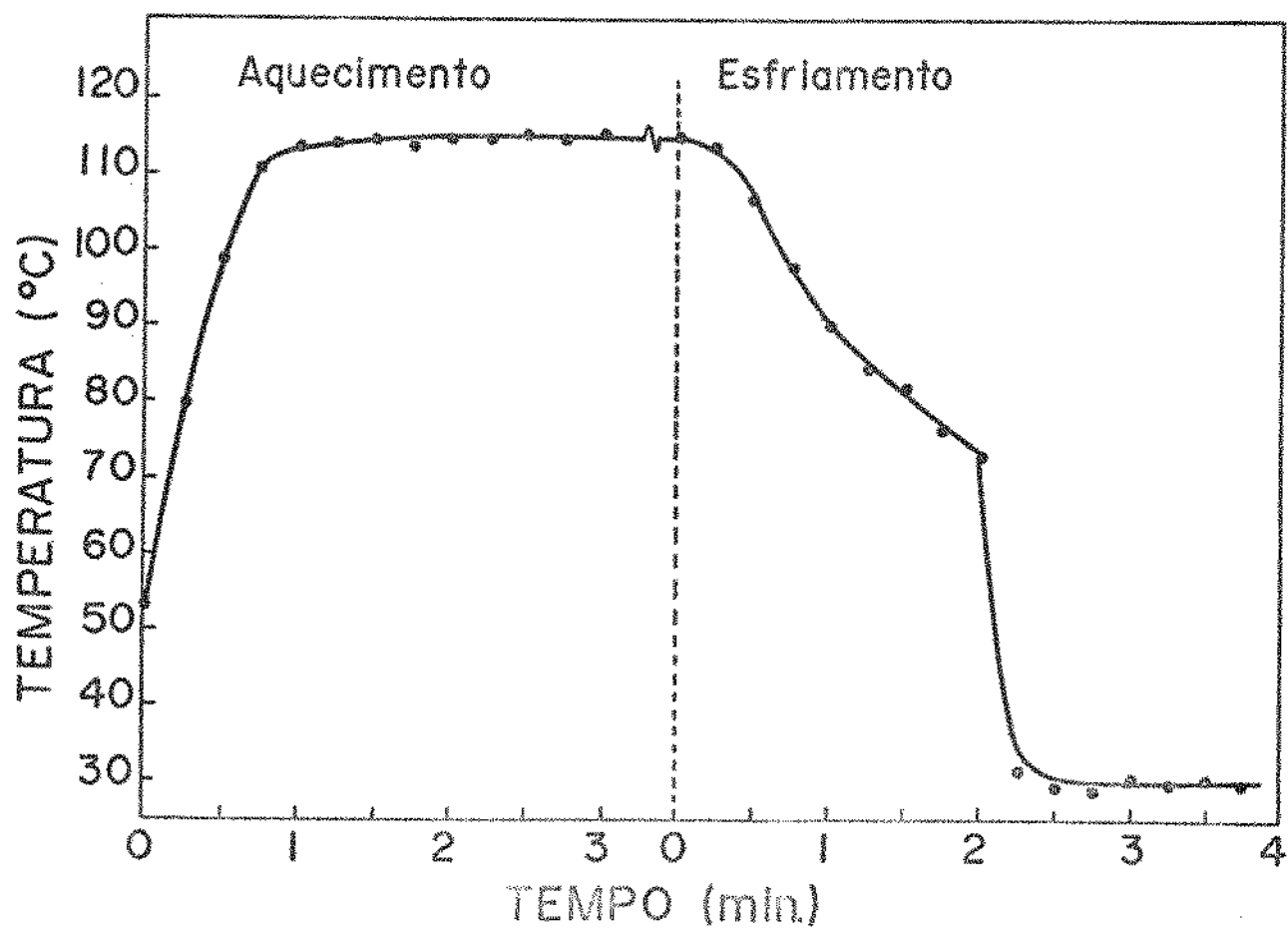


Figura 3: Curva de ascensão e declínio da temperatura da autoclave.

RESULTADOS

Os valores dos parâmetros obtidos pelos ensaios conduzidos com a suspensão de bentonita a 10% estão apresentados no quadro 1. Esses foram calculados considerando cerca de 60 medições de temperaturas sucessivas no centro da lata (30 para o aquecimento e 30 para o esfriamento), registrados cada dois minutos durante o aquecimento e esfriamento. Cada ensaio (lote) foi conduzido com 10 latas e repetidos 4 vezes. Como pode ser observado, o valor de índice de declive da curva de esfriamento (f_c) foi cerca de 13% maior que o de aquecimento (f_h), sendo, em média, 40,6 minutos para f_h e 47,3 minutos para f_c . O valor do coeficiente de intersecção da curva de aquecimento (j_h) foi de aproximadamente 1,7 e o de esfriamento (j_c) de 1,9.

A distribuição da frequência desses parâmetros está apresentada nas figuras 4 e 5. Como pode ser observado, ela é bastante próxima a distribuição normal. Nas figuras, a curva normal foi traçada considerando os valores médios de f_h , f_c , j_h e j_c seguintes: 40,6 min., 47,3 min., 1,68 e 1,90, respectivamente, e os desvios padrões de 0,918; 1,467; 0,111 e 0,127, respectivamente.

A análise da variância dos dados do quadro 1 estão apresentados no quadro 2. Os valores de F mostram que há uma diferença estatística altamente significativa nos valores de f_h e f_c , entre as diferentes latas do mesmo lote. Uma diferença menos significativa foi observada nos valores de j_h e j_c . Um valor extremamente elevado de F foi observado quando se comparou os parâmetros obtidos pelas latas de diferentes lotes, principalmente para aqueles referentes a curva de aquecimento.

Foi feita a análise de correlação entre os valores de f_h

e f_c ; f_h e j_h ; f_c e j_c ; j_h e j_c . Os resultados (ver quadro 3) mostraram que somente os valores de f_h e j_h e, f_c e j_c estavam correlacionados. A correlação observada foi a inversa, ou seja, quanto maior o valor de f_h menor o valor de j_h e vice-versa. O mesmo aconteceu com os parâmetros da curva de esfriamento. Não apresentou correlação significativa entre os parâmetros de aquecimento com os de esfriamento.

Os valores dos parâmetros obtidos pelos ensaios conduzidos com o purê de ervilha estão apresentados no quadro 4. Esses foram feitos com 15 latas cada lote e repetidos 6 vezes. Os resultados mostraram, como no caso anterior, um valor mais elevado de índice de declive na curva de esfriamento que na de aquecimento (cerca de 20%). Os valores médios de f_h e f_c foram respectivamente de 45,8 e 55,2 minutos. Os valores de j_h médio foi de 1,7 e de j_c de 1,5.

A distribuição da frequência dos dados obtidos está apresentada nas figuras 6 e 7. Essas figuras mostram que as distribuições de frequências dos parâmetros obedecem aproximadamente a curva normal. A curva teórica das figuras foi traçada considerando a média dos parâmetros seguintes: $f_h = 45,8$ min., $f_c = 55,2$ min., $j_h = 1,68$ e $j_c = 1,53$, e os respectivos desvios padrões: 1,09; 2,16; 0,081 e 0,112.

A análise da variância dos dados do quadro 4 estão apresentados no quadro 5. Em contraste com o ensaio com a bentonita, a variação entre as latas do mesmo lote foi muito pequena (diferença estatisticamente não significativa). Porém, como no caso anterior, a variação entre os diferentes lotes foi estatisticamente significativo ao nível superior a 1:1000, para todos os parâmetros considerados (f_h , f_c , j_h , j_c).

A análise de correlação dos dados dos parâmetros apresentados mostraram que há uma correlação inversa entre os parâmetros f_h e j_h ; e f_c e j_c (quadro 6). Esses resultados estão concordantes com aqueles do ensaio com a bentonita.

Quadro 1: Parâmetros das curvas de aquecimento e de esfriamento das latas com suspensão de bentonita 10%.

a. Índice de declive da curva de aquecimento (f_h).

Nº das latas	Nº de lotes			
	I	II	III	IV
1	39,604	40,973	41,325	40,010
2	39,214	40,448	40,559	49,286
3	39,506	40,023	41,416	41,573
4	38,803	41,113	41,010	41,674
5	39,515	40,737	40,830	41,374
6	39,660	41,659	41,999	40,624
7	38,819	40,366	40,885	40,276
8	40,405	41,798	41,587	41,261
9	40,134	40,966	41,626	41,494
10	38,456	40,367	41,156	41,049

b. Índice de declive da curva de esfriamento (f_c).

Nº de latas	Nº de lotes			
	I	II	III	IV
1	49,350	48,057	48,808	48,411
2	46,112	47,098	45,014	47,707
3	48,208	49,575	45,745	46,709
4	47,001	44,860	45,686	47,892
5	46,048	49,624	46,436	44,686
6	45,722	49,315	45,850	47,314
7	48,009	48,510	46,143	45,721
8	46,591	48,755	46,283	46,638
9	46,967	48,140	46,320	47,984
10	49,910	50,161	47,664	48,047

(continua)

Quadro 1: (Continuação)

c. Coeficiente de intersecção da curva de aquecimento
(j_h).

Nº de latas	Nº de lotes			
	I	II	III	IV
1	1,531	1,721	1,774	1,667
2	1,518	1,763	1,837	1,783
3	1,511	1,768	1,772	1,610
4	1,596	1,696	1,778	1,604
5	1,541	1,739	1,814	1,714
6	1,505	1,696	1,730	1,657
7	1,520	1,871	1,784	1,707
8	1,474	1,670	1,738	1,728
9	1,515	1,733	1,773	1,636
10	1,495	1,810	1,805	1,643

d. Coeficiente de intersecção da curva de esfriamento
(j_c).

Nº de Latas	Nº de Lotes			
	I	II	III	IV
1	1,820	1,807	1,795	1,808
2	1,948	1,920	2,169	1,934
3	1,849	1,746	1,949	1,999
4	1,893	2,186	1,987	1,891
5	1,979	1,715	1,927	2,215
6	1,974	1,773	1,971	1,912
7	1,787	1,849	1,934	2,100
8	1,897	1,854	1,929	1,975
9	1,861	1,766	1,934	1,890
10	1,560	1,778	1,823	1,871

Quadro 2: Análise da variância dos resultados de ensaios com a suspensão de bentonita, 10% (dados do quadro 1).

a. Índice de declive da curva de aquecimento (f_h).

Causa de Variação		G. Lib.	Quad. Médio	F	Coef. Var.(%)
Latas	9		0,5677	2,704	
Lotes	3		7,0218	33,444	
Resíduo	27		0,2099		1,13

b. Índice de declive da curva de esfriamento (f_o).

Causa de Variação		G. Lib.	Quad. Médio	F	Coef. Var.(%)
Latas	9		3,0017	2,265	
Lotes	3		7,0478	5,319	
Resíduo	27		1,3251		2,43

c. Coeficiente de intersecção da curva de aquecimento (j_h)

Causa de Variação		G. Lib.	Quad. Médio	F	Coef. Var.(%)
Latas	9		0,0030246	1,545	
Lotes	3		0,13336	68,122	
Resíduo	27		0,0019577		2,63

d. Coeficiente de intersecção da curva de esfriamento (j_o)

Causa de Variação		G. Lib.	Quad. Médio	F	Coef. Var.(%)
Latas	9		0,022671	1,933	
Lotes	3		0,036193	3,087	
Resíduo	27		0,011725		5,70

Quadro 3: Coeficiente de correlação entre os resultados dos en
saios com suspensão de bentonita, 10% (dados do quadro
1).

Correlação entre:	Lote 1	Lote 2	Lote 3	Lote 4
$f_h \times f_c$	-0,455	-0,176	0,160	-0,0724
$f_h \times j_h$	-0,404	-0,792	-0,884	-0,187
$f_c \times j_c$	-0,885	-0,917	-0,881	-0,984
$j_h \times j_c$	0,242	-0,218	0,318	0,364

Quadro 4: Parâmetros das curvas de aquecimento e de esfriamento das latas com purê de ervilha.

a. Índice de declive da curva de aquecimento (f_h).

Nº de Latas	Nº de Lotes					
	I	II	III	IV	V	VI
1	44,297	46,807	45,913	47,119	45,091	46,383
2	43,398	48,015	46,129	46,184	46,638	45,582
3	43,173	46,885	46,813	45,098	45,076	46,690
4	43,398	46,560	45,225	46,185	45,428	46,068
5	45,420	47,048	45,499	46,743	45,576	45,726
6	43,534	47,882	44,735	45,791	45,756	44,954
7	45,053	47,381	44,969	46,605	46,137	46,778
8	45,188	46,828	45,719	46,261	46,708	44,824
9	43,836	47,172	44,841	45,969	45,079	45,050
10	44,016	47,037	45,423	45,259	47,071	46,068
11	44,570	46,141	46,118	46,413	43,970	45,464
12	44,379	47,357	45,965	46,048	46,033	45,940
13	43,908	47,756	45,201	46,376	43,989	45,906
14	44,122	46,118	44,333	46,651	46,284	46,448
15	44,990	47,631	46,347	46,357	45,925	45,809

b. Índice d declive da curva de esfriamento (f_e).

Nº de Latas	Nº de Lotes					
	I	II	III	IV	V	VI
1	55,075	55,186	55,521	55,892	56,966	51,006
2	53,830	56,090	55,647	58,211	56,458	50,254
3	55,507	56,297	55,339	55,518	56,812	52,650
4	54,684	57,852	56,341	55,081	56,902	52,448
5	55,303	56,094	55,631	55,972	57,097	49,139
6	56,229	55,824	55,862	60,656	61,695	50,178
7	54,696	56,234	55,330	54,881	55,673	58,068
8	57,552	53,486	54,720	54,451	56,098	51,699
9	54,745	55,529	54,819	56,070	55,855	51,091
10	55,202	56,359	55,177	55,640	56,574	53,995
11	55,733	55,794	54,846	55,312	56,770	53,034
12	54,527	55,771	55,773	60,118	55,893	51,301
13	56,601	53,850	55,294	53,465	56,157	51,197
14	55,038	56,210	56,458	55,024	59,273	51,304
15	54,913	56,284	55,067	54,191	56,057	50,798

(Continua)

Quadro 4: (Continuação).

c. Coeficiente de intersecção da curva de aquecimento (j_h).

Nº de Latas	Nº de Lotes					
	I	II	III	IV	V	VI
1	1,732	1,689	1,680	1,493	1,743	1,560
2	1,731	1,629	1,685	1,465	1,635	1,604
3	1,766	1,731	1,633	1,637	1,738	1,563
4	1,764	1,736	1,683	1,597	1,715	1,606
5	1,729	1,721	1,705	1,589	1,726	1,588
6	1,750	1,663	1,755	1,594	1,696	1,627
7	1,683	1,657	1,697	1,534	1,666	1,549
8	1,704	1,679	1,685	1,579	1,656	1,706
9	1,729	1,696	1,733	1,623	1,773	1,617
10	1,705	1,684	1,715	1,605	1,685	1,836
11	1,778	1,731	1,667	1,568	1,957	1,855
12	1,735	1,686	1,676	1,547	1,672	1,680
13	1,834	1,642	1,673	1,598	1,799	1,711
14	1,746	1,772	1,739	1,526	1,730	1,646
15	1,696	1,690	1,680	1,608	1,705	1,796

b. Coeficiente de intersecção da curva de esfriamento (j_o).

Nº de Latas	Nº de Lotes					
	I	II	III	IV	V	VI
1	1,394	1,577	1,611	1,545	1,493	1,670
2	1,425	1,642	1,644	1,500	1,484	1,643
3	1,429	1,529	1,614	1,527	1,438	1,599
4	1,413	1,506	1,593	1,552	1,393	1,658
5	1,426	1,584	1,588	1,548	1,400	1,773
6	1,425	1,555	1,600	1,305	1,185	1,702
7	1,428	1,511	1,573	1,539	1,461	1,234
8	1,394	1,654	1,634	1,568	1,509	1,582
9	1,395	1,581	1,575	1,491	1,413	1,653
10	1,400	1,522	1,625	1,534	1,465	1,556
11	1,426	1,567	1,577	1,552	1,450	1,592
12	1,468	1,537	1,601	1,253	1,428	1,675
13	1,389	1,653	1,631	1,622	1,483	1,649
14	1,428	1,542	1,590	1,596	1,285	1,694
15	1,396	1,596	1,640	1,609	1,539	1,690

Quadro 5: Análise da variância dos resultados de ensaios com o purê de ervilha (dados do quadro 4)

a. Índice de declive da curva de aquecimento (f_h).

Causa de Variação	G. Lib.	Quad. Médio	F	Coef. Var.(%)
Latas	14	0,54833	1,264	
Lotes	5	13,580	31,313	
Resíduo	70	0,43369		1,44

b. Índice de declive da curva de esfriamento (f_e).

Causa de Variação	G. Lib.	Quad. Médio	F	Coef. Var.(%)
Latas	14	2,2603	1,0279	
Lotes	5	45,995	20,916	
Resíduo	70	2,1991		2,68

c. Coeficiente de intersecção da curva de aquecimento (j_h).

Causa de Variação	G. Lib.	Quad. Médio	F	Coef. Var.(%)
Latas	14	0,0066128	2,1297	
Lotes	5	0,054847	17,664	
Resíduo	70	0,0031050		3,31

d. Coeficiente de intersecção da curva de esfriamento (j_e).

Causa de Variação	G. Lib.	Quad. Médio	F	Coef. Var.(%)
Latas	14	0,0077609	1,3332	
Lotes	5	0,12008	20,630	
Resíduo	70	0,0058210		4,997

Quadro 6: Coeficiente de correlação entre os resultados dos en
saios com purê de ervilha (dados do quadro 4)

<u>Correlação entre</u>	<u>Lote-1</u>	<u>Lote-2</u>	<u>Lote-3</u>	<u>Lote-4</u>	<u>Lote-5</u>	<u>Lote-6</u>
$f_h \times f_c$	0,230	-0,175	-0,381	-0,237	0,0564	0,497
$f_h \times j_h$	-0,487	-0,855	-0,832	-0,570	-0,836	-0,303
$f_c \times j_c$	-0,381	-0,754	-0,163	-0,938	-0,892	-0,948
$j_h \times j_c$	-0,0191	-0,490	-0,311	0,0656	0,00146	-0,0818

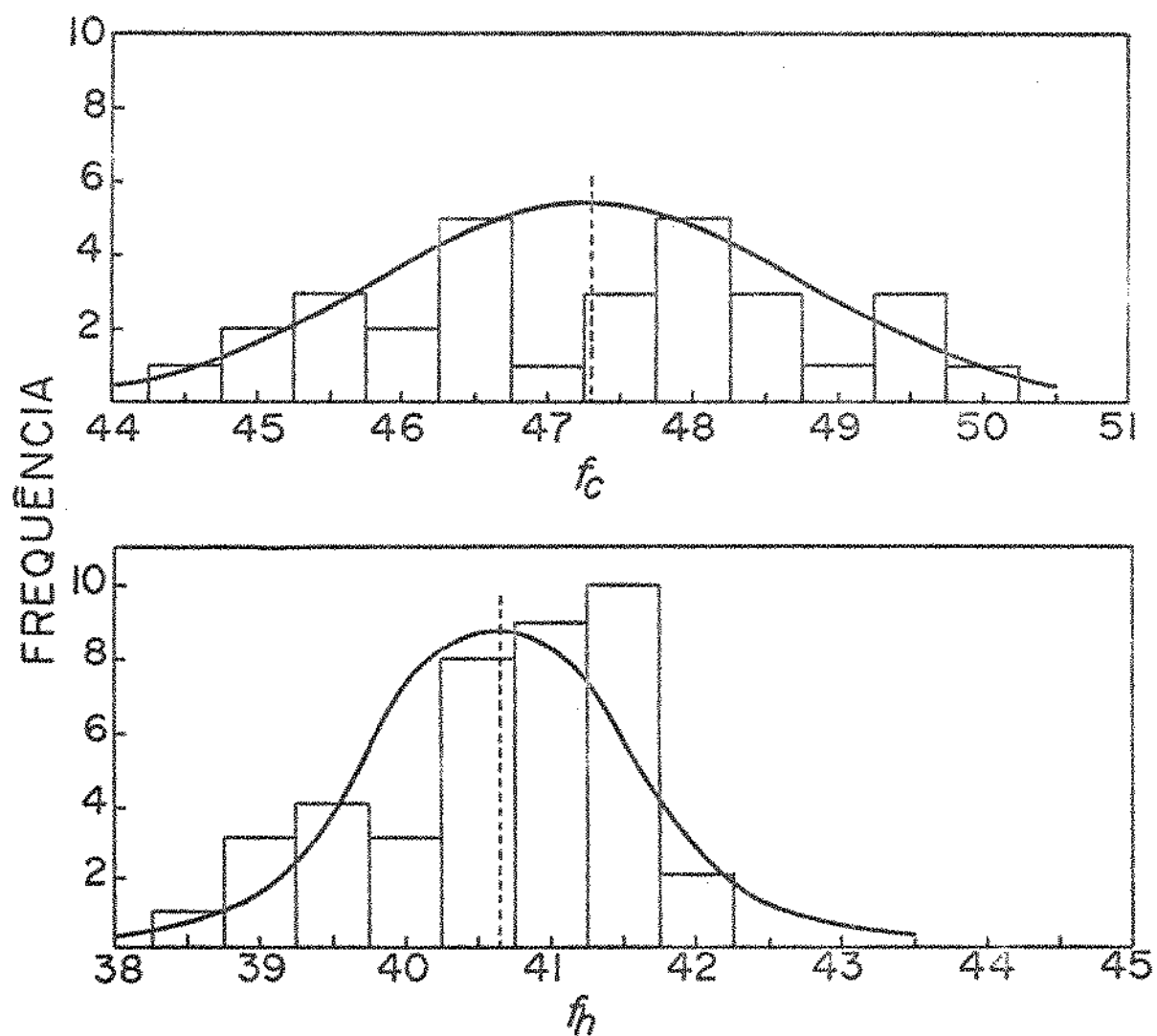


Figura 4: Distribuições dos índices de declives das curvas de aquecimento (f_h) e de esfriamento (f_c) das latas com suspensão de bentonita a 10%.

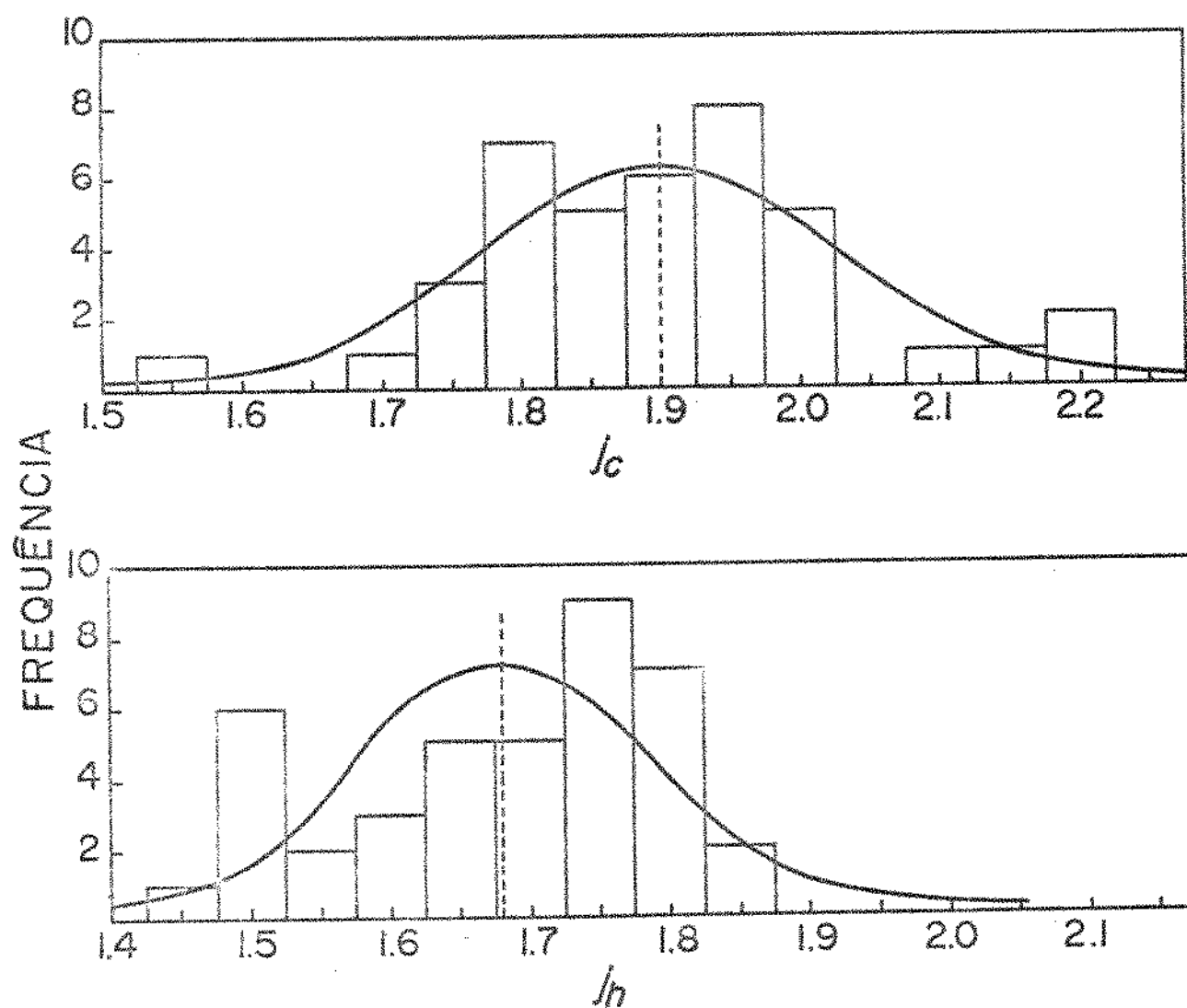


Figura 5: Distribuição dos coeficientes de intersecção das curvas de aquecimento (j_h) e de esfriamento (j_c) das latas com suspensão de bentonita a 10%.

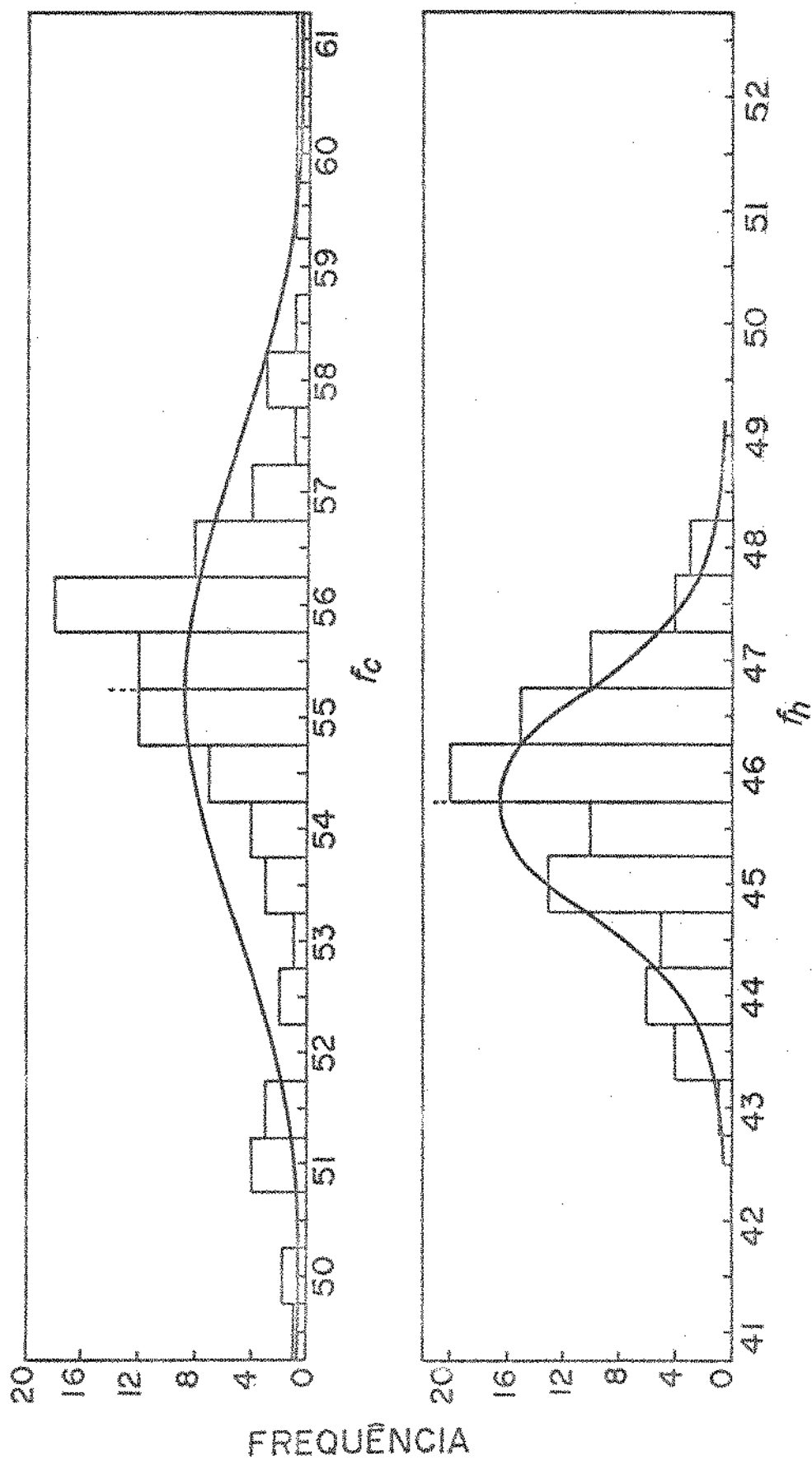


Figura 8: Distribuição dos índices de declives de curvas de aquecimento (f_h) e de esfriamento (f_c) das latas com purê de ervilha.

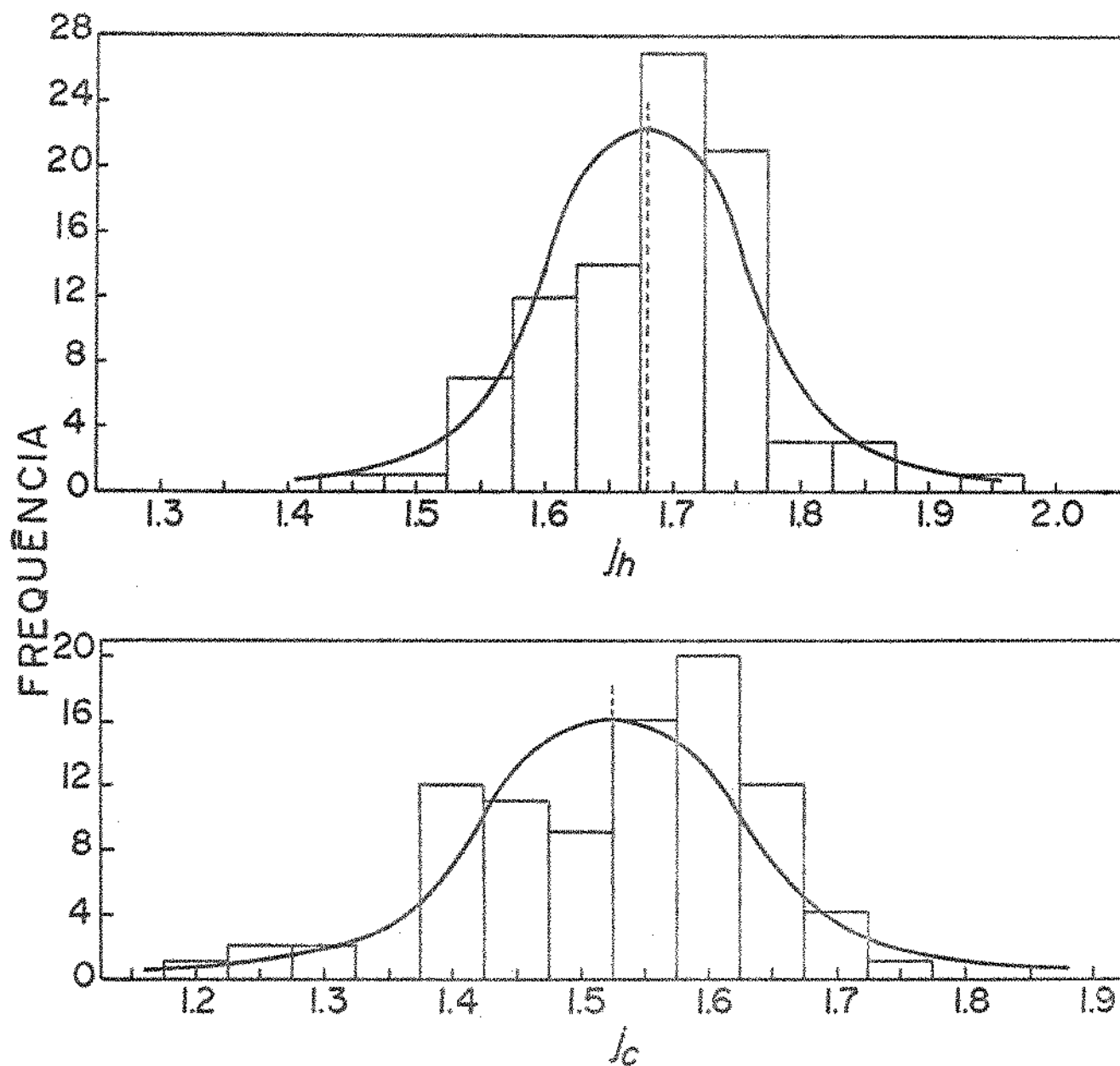


Figura 7: Distribuição dos coeficientes de intersecção das curvas de aquecimento (j_h) e de esfriamento (j_c) das latas de purê de ervilha.

DISCUSSÃO TEÓRICA

Manson e Zahradnik (1967) mostraram que o número de microrganismos sobreviventes esperados após o processamento por um certo tempo era uma função exponencial do índice de declive da curva de aquecimento (f_h) e de esfriamento (f_c) do alimento durante a esterilização. Utilizando-se vários valores de índice de declive ($5 \leq f_h \leq 1000$ minutos) constatou-se, no presente trabalho, que essa relação era verdadeira, desde que o intervalo de f_h considerado não seja muito amplo (figura 8). O método empregado para os cálculos foi o de Stumbo (1965) aplicado a determinação do valor de esterilização média da massa (F_g). Um programa de computação no computador digital foi desenvolvido para calcular o número final de sobreviventes (b) esperado para um dado valor de f_h , assumindo-se os valores fixos de j_h , j_c , T_0 , T_r , T_w , t_b , D_r e z . Esse programa, baseado naquele apresentado por Manson e Zahradnik (1967) está descrito na figura 9.

Considerando-se a variação do número de microrganismos remanecentes (b) após o processamento como sendo uma função exponencial do f_h , mantendo todos os outros parâmetros invariáveis, tem-se (pela figura 8):

$$R = \frac{\log b}{f_h} \quad (I)$$

Onde: R .. declive da relação $\log b/f_h$ (min.^{-1}).

b .. número final de bactérias viáveis após o tratamento de calor.

f_h .. índice de declive.

Portanto:

$$b = 10^{R \cdot f_h} = e^{2,303R \cdot f_h} \quad (\text{II})$$

Considerando x , como sendo a variação de f_h em torno do valor médio de f_h , tem-se:

$$b = e^{2,303R \cdot x} \quad (\text{III})$$

Os dados experimentais mostram que os valores de f_h estão distribuídos em torno da média obedecendo uma distribuição normal (figuras 4 e 6). Tem-se, portanto, o seguinte:

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{IV})$$

a equação diferencial da curva normal.

Considerando o valor médio $\bar{x} = 0$, tem-se:

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{V})$$

Num determinado lote com f_h média de $\bar{x}$ e desvio padrão de σ , a distribuição de sobreviventes será dada pela

$$S_f = y \cdot b \quad (\text{VI})$$

Ou seja;

$$S_f = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \cdot e^{2,303R \cdot x}$$

Ou, ainda;

$$S_f = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{x(2,303R - \frac{x}{2\sigma^2})}{2\sigma^2}} \quad (\text{VII})$$

As curvas dessa equação para os valores de $R = 0,204 \text{ min}^{-1}$ e σ de 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; e 5,0 estão apresentadas na figura 10. As curvas são simétricas e o ponto do máximo está deslocado do valor $x = 0$, cuja distância aumenta com o aumento de σ . Essas curvas da figura 10 foram obtidas pelo computador digital, munido de "plotter", usando o programa apresentado na figura 9.

O total de microrganismos viáveis esperados em um lote de alimento "esterilizado" para um determinado valor de σ e de R é dada pela equação.

$$S_s = \int_{-\infty}^{+\infty} S_f \cdot dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{x(2,303R - \frac{x}{2\sigma^2})}{2\sigma^2}} \cdot dx \quad (\text{VIII})$$

Essa integral é equivalente a soma da área sob a curva apresentada na figura 11. É uma expressão matemática um tanto difícil de ser resolvida. Portanto, preferiu-se, no presente trabalho, proceder a integração, dividindo a distância no eixo dos x em pequenos intervalos, obtendo-se a área dentro de um espaço razoável de x . Para isso, foi determinado, inicialmente, o ponto de máximo (x_1) da curva. A área total foi determinada multiplicando-se por 2 a área obtida entre $-a$ e x_1 . O incremento na área pela ampliação do intervalo de x para valores inferiores que $-a$ foi desprezível. O valor de $-a$ empregado variou de acordo com o f_h considerado.

Para determinar o ponto x_1 , a equação (VIII) foi transformada da seguinte maneira:

$$S_f = \frac{0,399}{\sigma} \cdot e^{(R2,303 \cdot x - \frac{x^2}{2\sigma^2})} \quad (IX)$$

Considerando, $0,399/\sigma = C$, e aplicando o logarítmo, tem-se:

$$\ln S_f = \ln C + R \cdot 2,303 \cdot x - \frac{x^2}{2\sigma^2} \quad (X)$$

que é uma equação do segundo grau, do tipo $ax^2 + bx + c = y$.

O ponto máximo (x_1) dessa curva foi prontamente obtida calculando-se a derivada da equação acima.

$$y' = \frac{d \ln S_f}{dx} = \frac{x}{\sigma^2} - 2,303 \cdot R \quad (XI)$$

e, fazendo-o igual a zero.

$$\frac{x_1}{\sigma^2} - 2,303 \cdot R = 0 \quad (XII)$$

Portanto,

$$x_1 = 2,303 \cdot R \cdot \sigma^2 \quad (XIII)$$

Hayakawa (comunicação pessoal) relatou que a equação (VIII) poderia ser integrada analiticamente da seguinte forma:

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{x_0}^{x_a} e^{x(2,303R - \frac{x}{2\sigma^2})} dx \quad (XIV)$$

Considerando,

$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} = a ; 2,303R = a ; \frac{1}{2\sigma^2} = b$$

tem-se

$$y = c \cdot \int_{x_0}^{x_a} e^{ax-bx^2} \cdot dx \quad (\text{XV})$$

$$y = c \cdot \int_{x_0}^{x_a} e^{-b(x - \frac{a}{2b})^2 - \frac{a^2}{4b}} \cdot dx$$

$$y = c \cdot e^{-\frac{a^2}{4b}} \cdot \int_{x_0}^{x_a} e^{-b(x - \frac{a}{2b})^2} \cdot dx \quad (\text{XVI})$$

Fazendo

$$\sqrt{b}(x - \frac{a}{2b}) = \zeta$$

$$\frac{d\zeta}{dx} = \sqrt{b} ; \text{ ou ainda, } dx = \frac{d\zeta}{\sqrt{b}}$$

$$y = c \cdot e^{-\frac{a^2}{4b}} \cdot \int_{\sqrt{b}(x_0 - \frac{a}{2b})}^{\sqrt{b}(x_a - \frac{a}{2b})} \frac{e^{-\zeta^2}}{\sqrt{b}} d\zeta \quad (\text{XVII})$$

Essa integral é imediata, aplicando a função de erro seguinte:

$$\text{erf}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y e^{-x^2} \cdot dx \quad (\text{XVIII})$$

$$y = a \cdot \frac{e^{-\frac{a^2}{4b}}}{\sqrt{b}} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left| \text{erf}\left\{\sqrt{b}\left(x_a - \frac{a}{2b}\right)\right\} - \text{erf}\left\{\sqrt{b}\left(x_0 - \frac{a}{2b}\right)\right\} \right| \quad (\text{XIX})$$

Onde: $a = 2,303R$

$$b = 1/2\sigma^2$$

$$c = 1/\sigma\sqrt{2\pi}$$

Para o cálculo com auxílio de computador digital, a equação XIX não oferece grandes vantagens sobre o método baseado na somatória de pequenos intervalos. No presente estudo, a área sob a curva foi determinada de $-a$ a x_1 , dividindo-se em intervalos regulares (em números pares) e aplicando-se a regra de Simpson para a integração. Essa área, multiplicada por dois forneceu a área que corresponde ao número de sobreviventes remanecentes após a esterilização. O programa de computador utilizado para esse cálculo está apresentado na figura 11.

A curva que representa o número de sobreviventes versus os valores diferentes de σ está apresentada na figura 12. Como pode ser observado, o número de bactérias remanecentes (b') aumenta rapidamente com o aumento no valor de σ , quando esse supera um certo valor. No caso de $R = 0,204$, esse aumento foi bastante grande quando o valor de σ ultrapassou a 1,5 (figura 10).

Foi observado que o logaritmo do valor de b' em função do σ obedece uma equação da parábola. Esses dados foram confirmados para os valores de R entre 0,01 a 3,50 (ver tabela 1).

Aplicando a equação da parábola seguinte (Korn e Korn , 1961),

$$y^2 = 4px \quad (XX)$$

tem-se para o presente estudo

$$\sigma^2 = 4p \cdot \log b' \quad (XXI)$$

Onde: y foi substituído por σ e x por $\log b'$.

Representando graficamente $-\log R$ versus $\log 4p$, notou-se que os diversos valores obtidos de $4p$ obedecia uma progressão retilínea no intervalo de $0,01 \leq R \leq 3,5 \text{ min}^{-1}$ (figura 13).

A razão de ter escolhido esse intervalo de R será explicado mais adiante.

Pelo gráfico obtém-se a equação da reta seguinte:

$$\log R = - 0,5 \cdot \log 4p - 0,0362 \quad (XXII)$$

Comparando as equações XXI e XXII, tem-se o seguinte:

$$\log R = - 0,5 \cdot \log \left(\frac{\sigma^2}{\log b} \right) - 0,0362 \quad (XXIII)$$

Essa equação permite-nos calcular o número final de bactérias viáveis (b'), sabendo-se os valores de R e σ . É mais convenientemente aplicável se for transformado na seguinte:

$$\frac{1}{R} = \left(\frac{\sigma^2}{\log b'} \right)^{0,5} \cdot 10^{0,0362}$$

$$\frac{1}{R} = \left(\frac{\sigma^2}{\log b'} \right)^{0,5} \cdot 1,087$$

$$\log b' = 1,17157 R^2 \sigma^2 \quad (\text{XXIV})$$

Para usar com dados experimentais, o desvio padrão (σ) da equação acima é substituído por desvio padrão (s), obtendo-se:

$$\log b' = 1,17157 R^2 s^2 \quad (\text{XXV})$$

Nesta equação, o valor de b foi fixado para igual a uma unidade. Assim, qualquer variação no número final de esporos sobreviventes esperado (b') devido a variação de σ (ou s) está relacionado ao valor unitário de b obtido facilmente considerando-se o desvio padrão igual a zero.

Tabela 1: Relação entre o número de bactérias sobreviventes esperados (b') e σ para os diferentes valores de R .

R	σ	b'	$4p = \sigma^2 / \log b'$
0,01	5,0	1,004	14.451 (*)
	10,0	1,021	11.074 (*)
	15,0	1,050	10.618
	20,0	1,096	10.048
	25,0	1,161	9.640 (*)
0,02	5,0	1,024	2.427,2(*)
	10,0	1,105	2.327,2
	15,0	1,258	2.257,2
	20,0	1,514	2.220,6
	25,0	1,922	2.202,6
0,04	5,0	1,108	561,3 (*)
	10,0	1,522	548,2
	15,0	2,587	545,1
	20,0	5,444	543,5
	25,0	14,15	543,1
0,06	5,0	1,268	242,4
	10,0	2,591	241,9
	15,0	8,554	241,4
	20,0	45,48	241,3
	25,0	289,4	241,3
0,08	5,0	1,526	136,35
	10,0	5,450	135,80
	15,0	45,48	135,72
	20,0	885,9	135,71
	25,0	$4,029 \times 10^4$	135,72
0,10	1,0	1,027	86,430
	2,0	1,111	87,508
	3,0	1,268	87,277
	4,0	1,526	87,170
	5,0	1,937	87,068
	10,0	14,16	86,876
	15,0	389,4	86,859
	20,0	$4,029 \times 10^4$	86,858
	25,0	$1,569 \times 10^7$	86,858
0,20	1,0	1,112	21,692
	2,0	1,528	21,725 (Cont.)

Tabela 1: (Continuação)

R	σ	b'	$4p = \sigma^2 / \log b'$
0,20	3,0	2,596	21,723
	4,0	5,455	21,718
	5,0	14,167	21,713
0,40	1,0	1,528	5,4312
	2,0	5,456	5,4284
	3,0	45,49	5,4285
	4,0	885,9	5,4286
	5,0	$4,029 \times 10^4$	5,4286
0,60	1,0	2,597	2,4127
	2,0	45,49	2,4127
	3,0	$5,373 \times 10^3$	2,4127
	4,0	$4,281 \times 10^6$	2,4127
	5,0	$2,300 \times 10^{10}$	2,4127
0,80	1,0	5,456	1,3571
	2,0	885,9	1,3571
	3,0	$4,281 \times 10^6$	1,3571
	4,0	$6,156 \times 10^{11}$	1,3572
	5,0	$2,635 \times 10^{18}$	1,3572
1,00	0,4	1,528	0,86900
	0,8	5,456	0,86850
	1,0	14,17	0,86853
	2,0	$4,029 \times 10^4$	0,86858
	3,0	$2,300 \times 10^{10}$	0,86858
	4,0	$2,635 \times 10^{18}$	0,86858
	5,0	$6,058 \times 10^{28}$	0,86859
2,00	0,4	5,456	0,21713
	0,8	$8,859 \times 10^2$	0,21714
	1,2	$4,281 \times 10^6$	0,21714
	1,6	$6,156 \times 10^{11}$	0,20714
	2,0	$2,635 \times 10^{10}$	0,21714
3,00	0,4	$4,546 \times 10^1$	0,096506
	0,8	$4,281 \times 10^6$	0,096508
	1,2	$8,333 \times 10^{14}$	0,096509
	1,6	$3,356 \times 10^{26}$	0,096509
	2,0	$1,645 \times 10^{37}$	0,10748 (*)
3,50	0,4	$1,805 \times 10^2$	0,070906
	0,8	$1,062 \times 10^9$	0,070905
	1,2	$2,036 \times 10^{20}$	0,070905
	1,6	$1,272 \times 10^{36}$	0,070577(*)

(*) Dados discordantes.

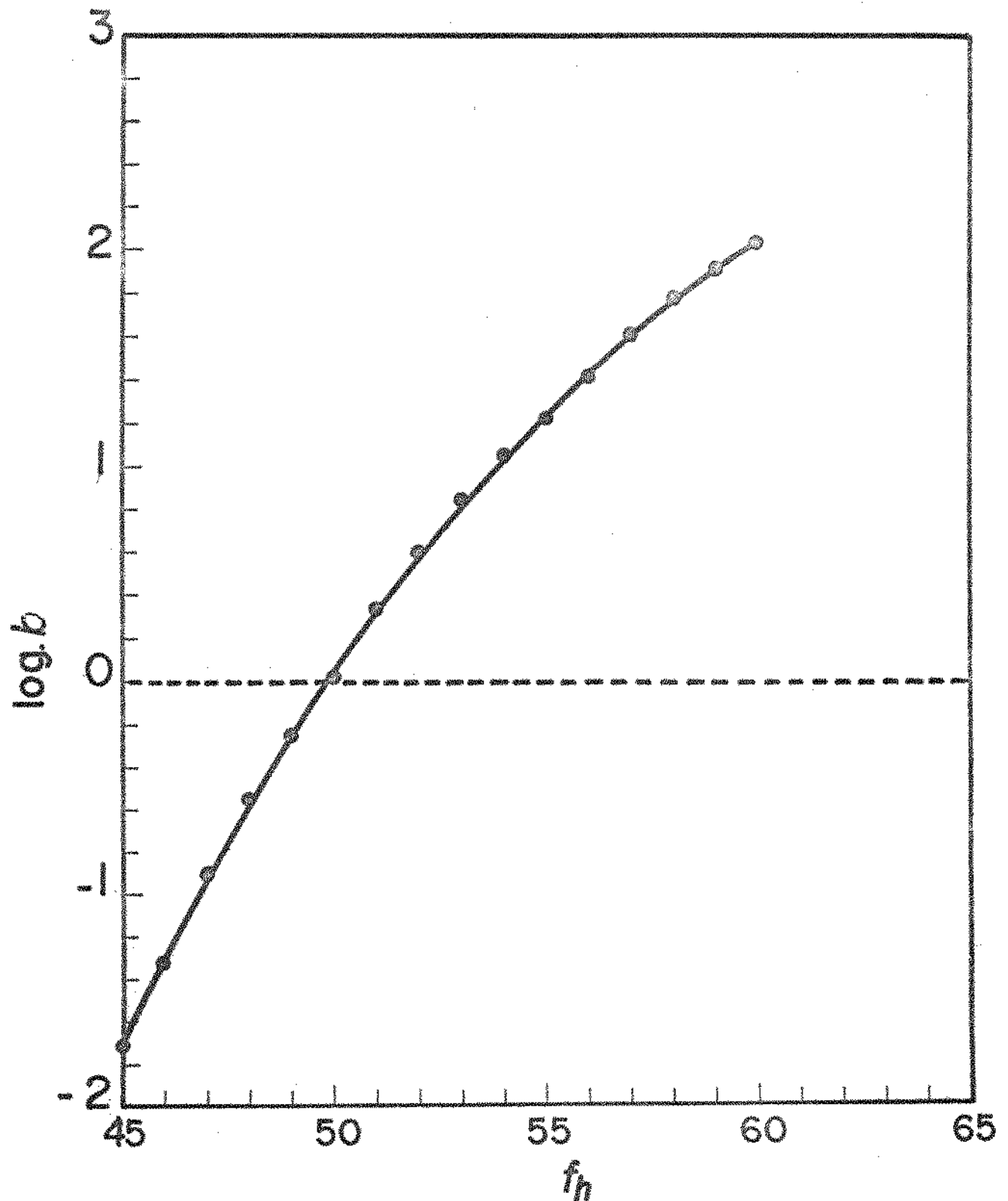


Figura 8: Valores do número final de bactérias (b) a diferentes valores de índice de declive (f_h). Condições de esterilização: $a/b = 10^5$; $D_r = 1,0$ min.; $z = 10^\circ\text{C}$; valor médio de $f_h = f_c = 50,0$ min.; $j_h = j_c = 1,50$; $I_0 = 55,59^\circ\text{C}$; $T_a = 121,19^\circ\text{C}$; $T_w = 21,19^\circ\text{C}$.

Figura 9: Diagrama de blocos do programa de computação para o cálculo do número final de sobreviventes baseado no programa de Manson e Zahradnik (1967).

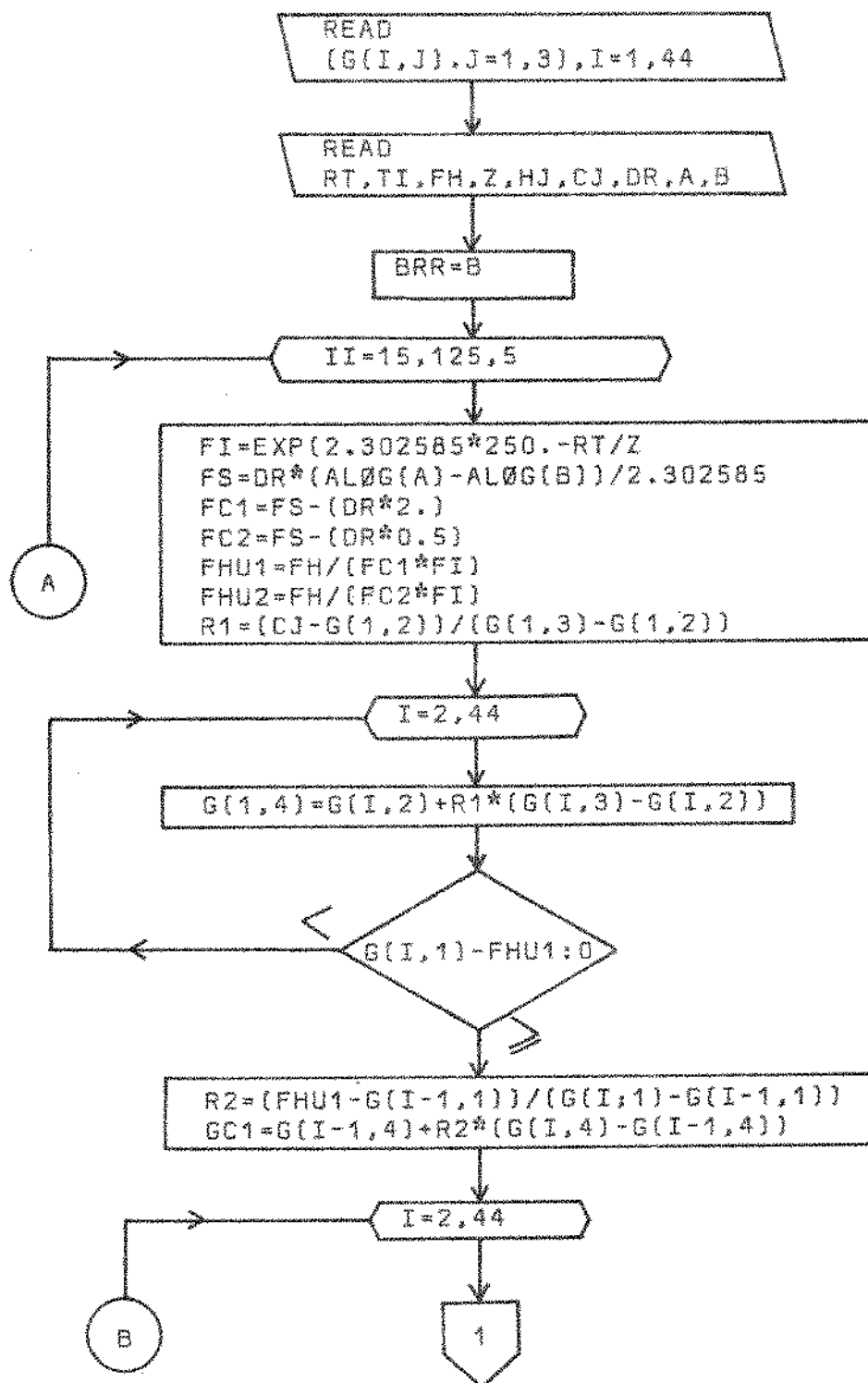


Figura 9: (Continuação).

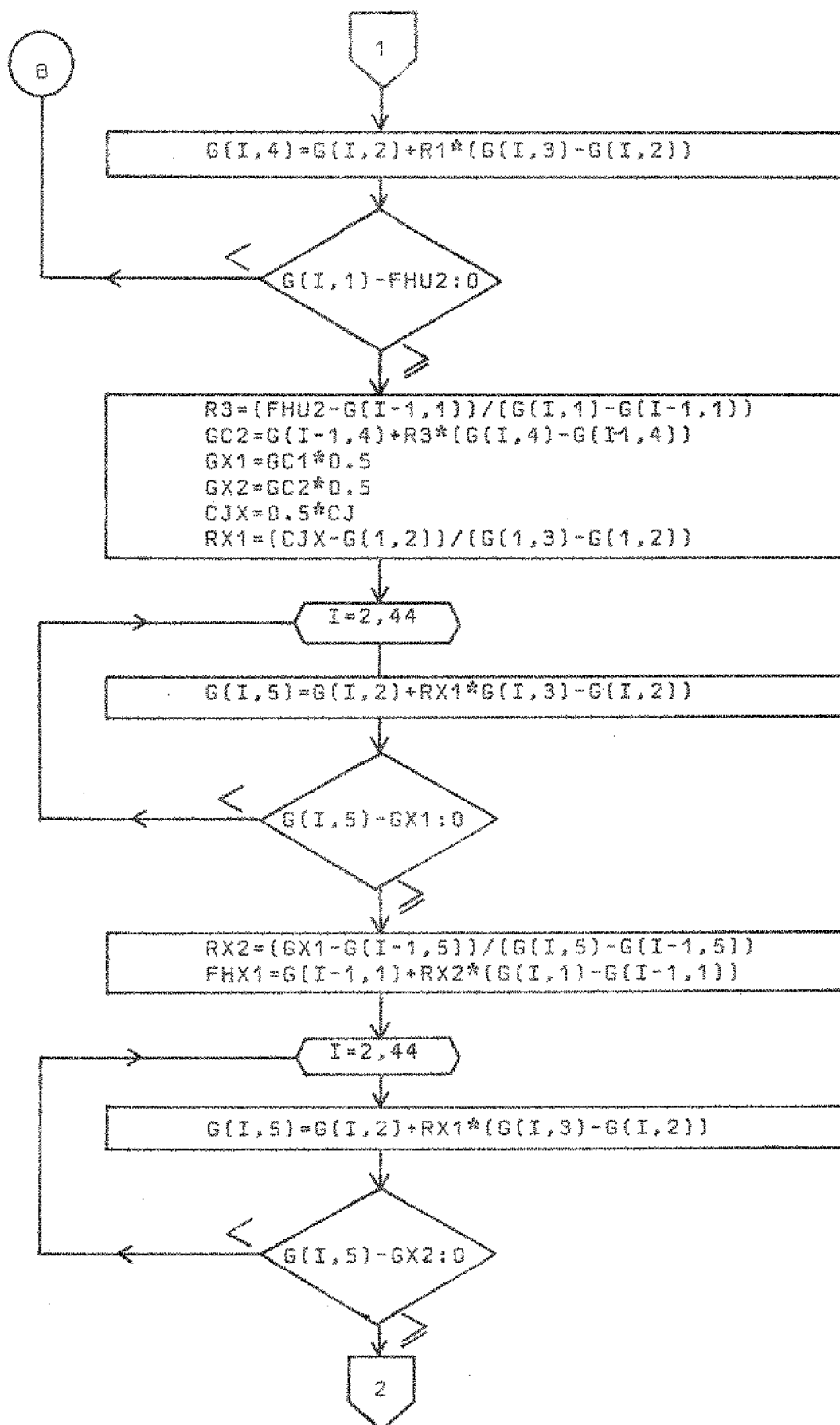
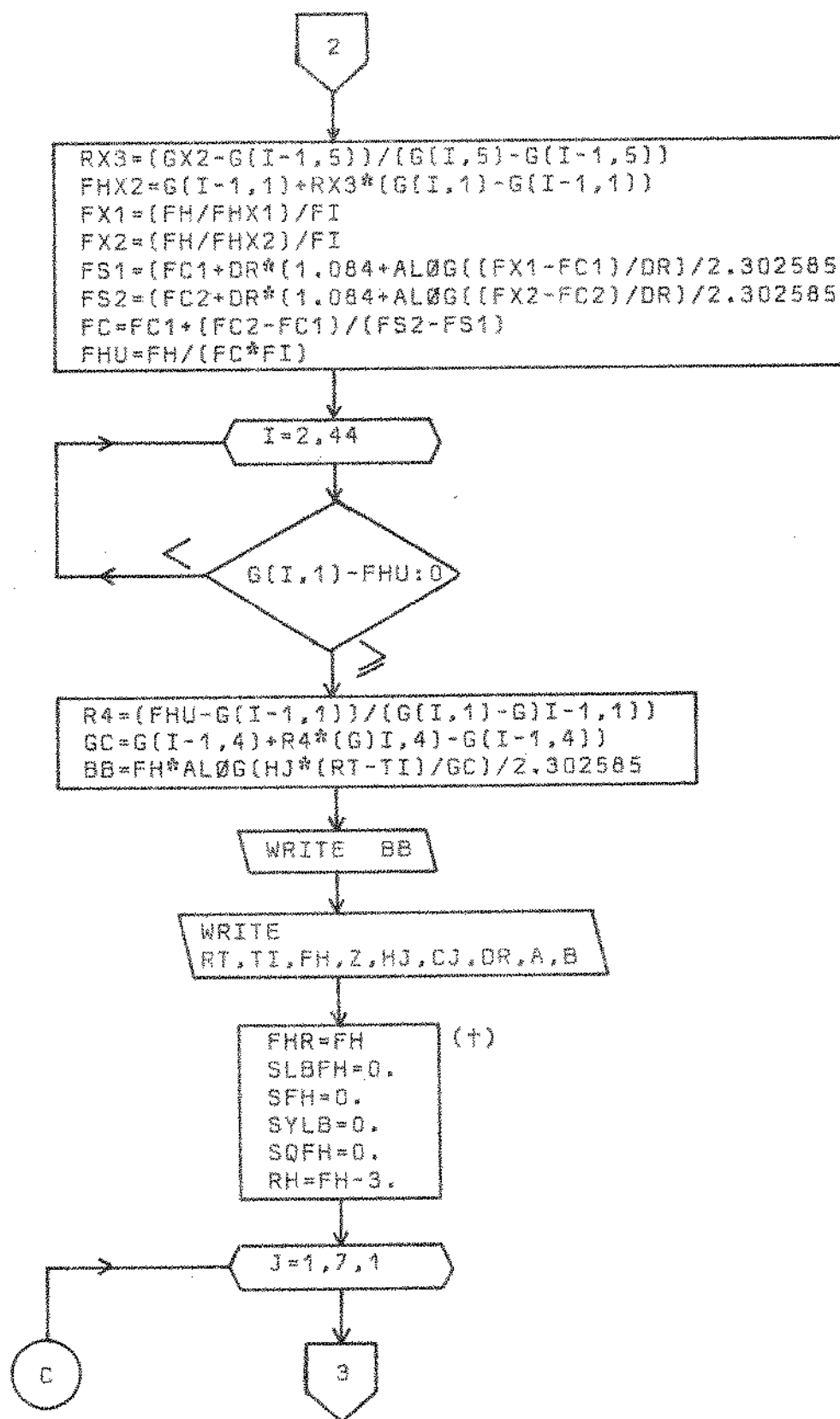


Figura 9: (Continuação).



(+) Usado somente para calcular o valor de R.

Figura 8: (Continuação).

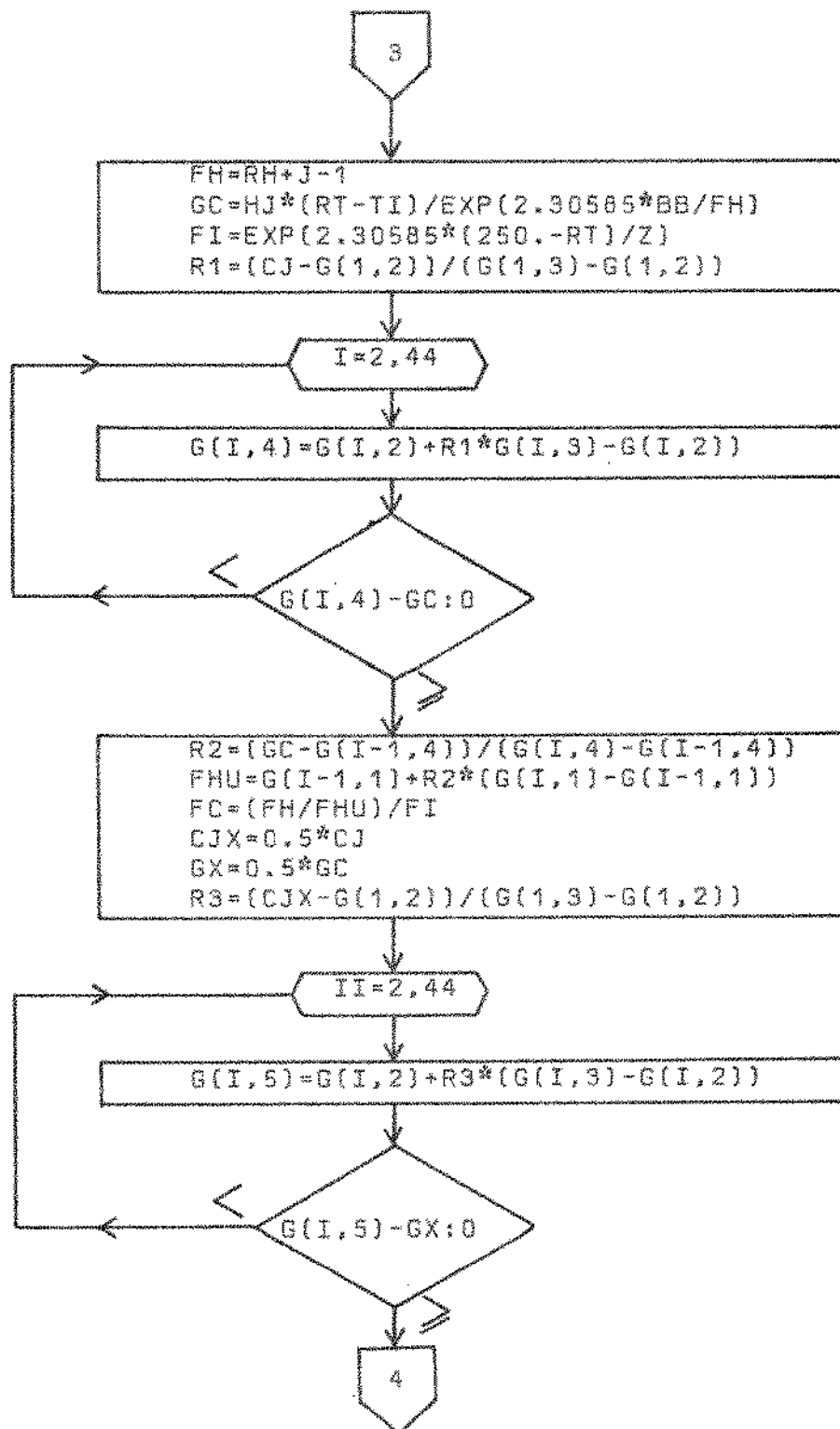
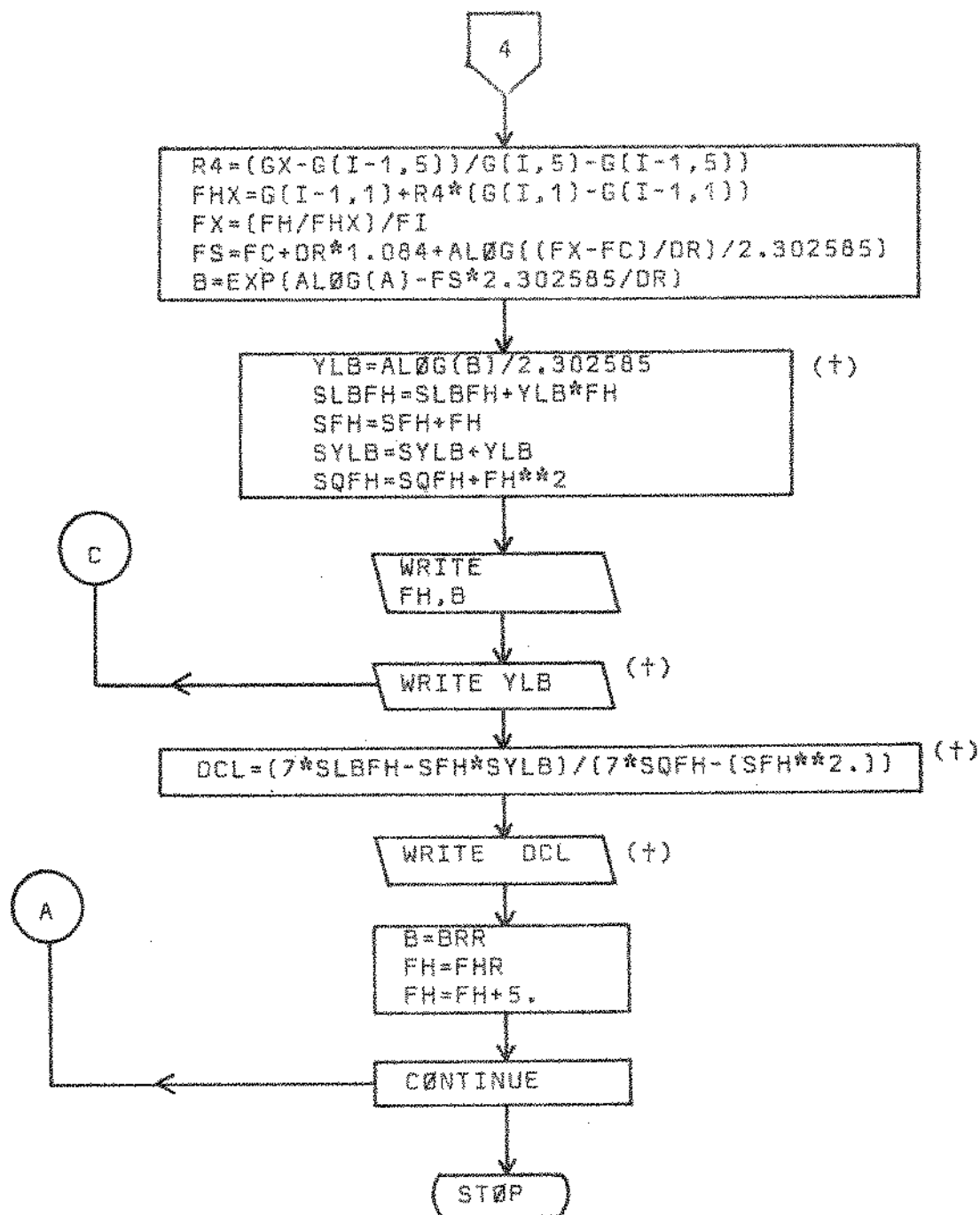


Figura 9: (Continuação).



(+) Usado somente para calcular o valor de R.

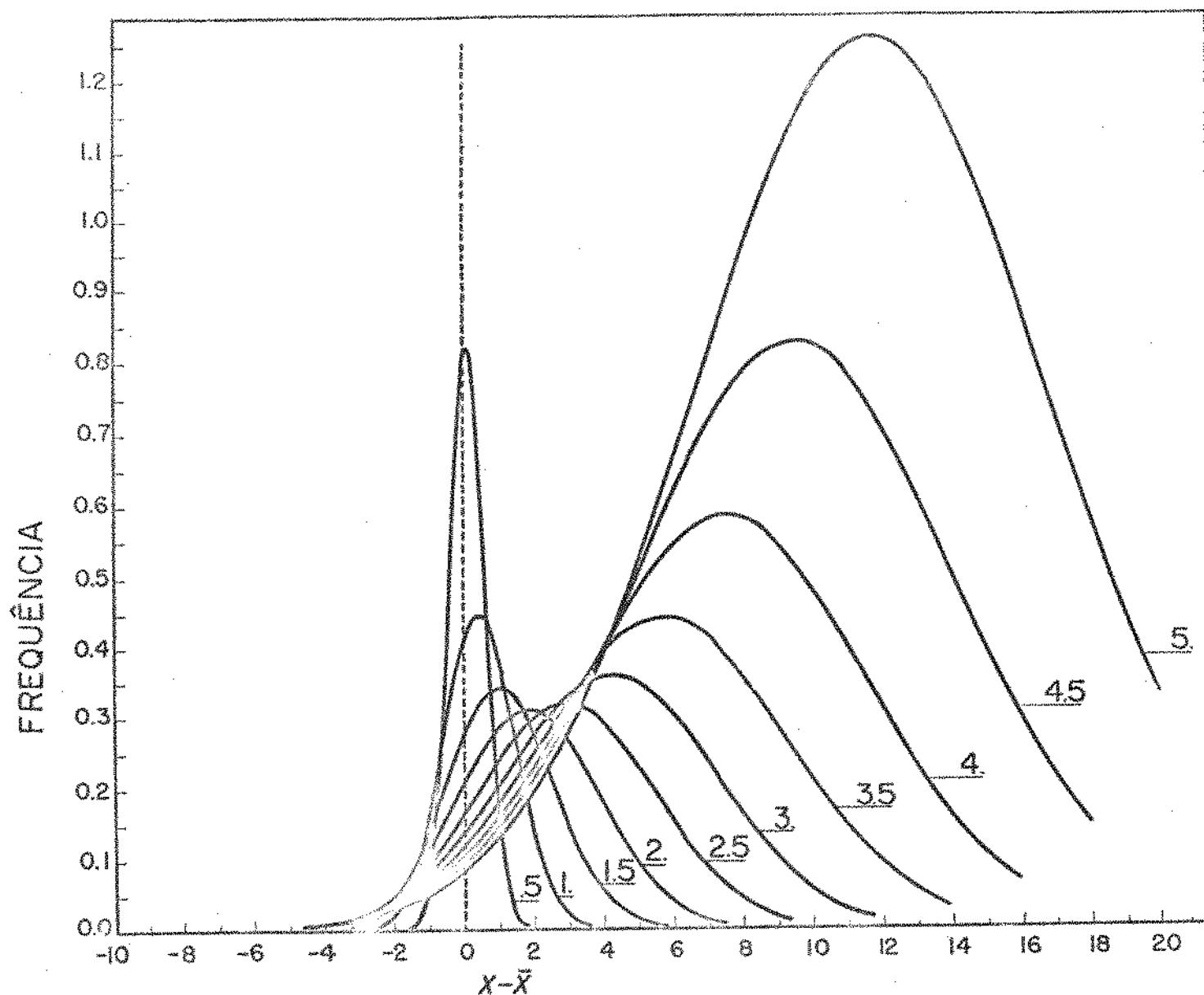


Figura 10: Distribuição dos valores de S_f (equação VII) em torno da média de f_h ($x = 0$) para os valores de $R = 0,204 \text{ min.}^{-1}$; e $\sigma = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0$.

Figura 11: Diagrama de blocos do programa de computação para a obtenção da curva de distribuição dos valores de S_f (equação VII).

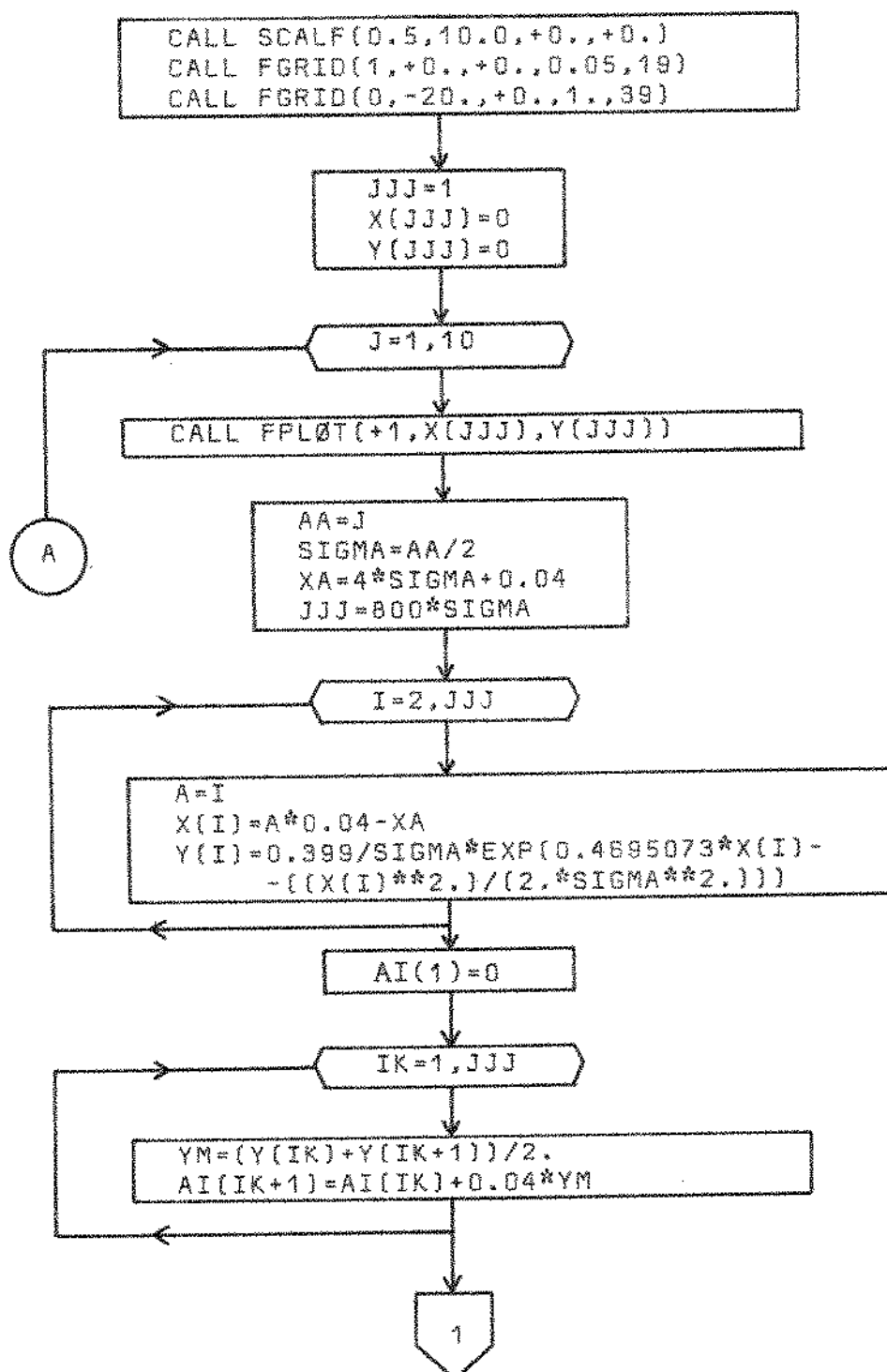


Figura 11: (Continuação).

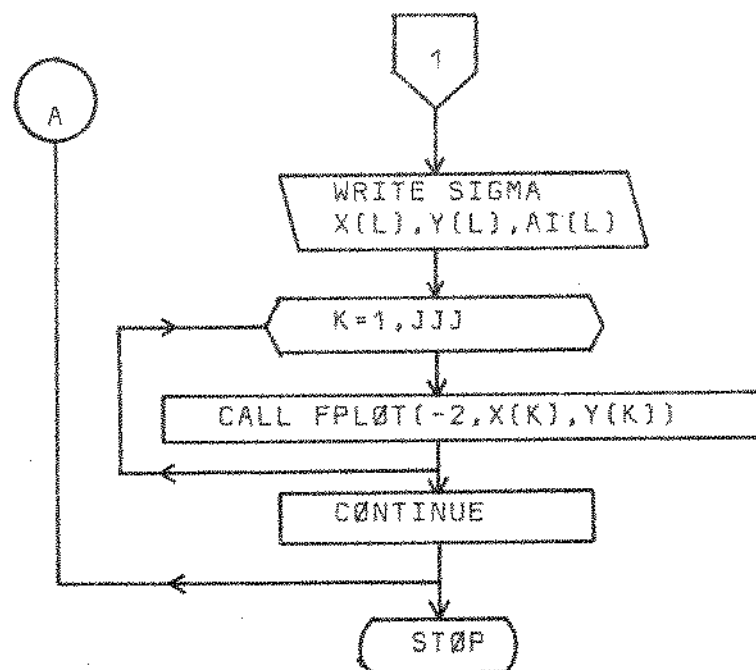


Figura 12: Diagrama de blocos do programa de computação para o cálculo da área da integral $2/S_f dx$, aplicando a regra de Simpson.

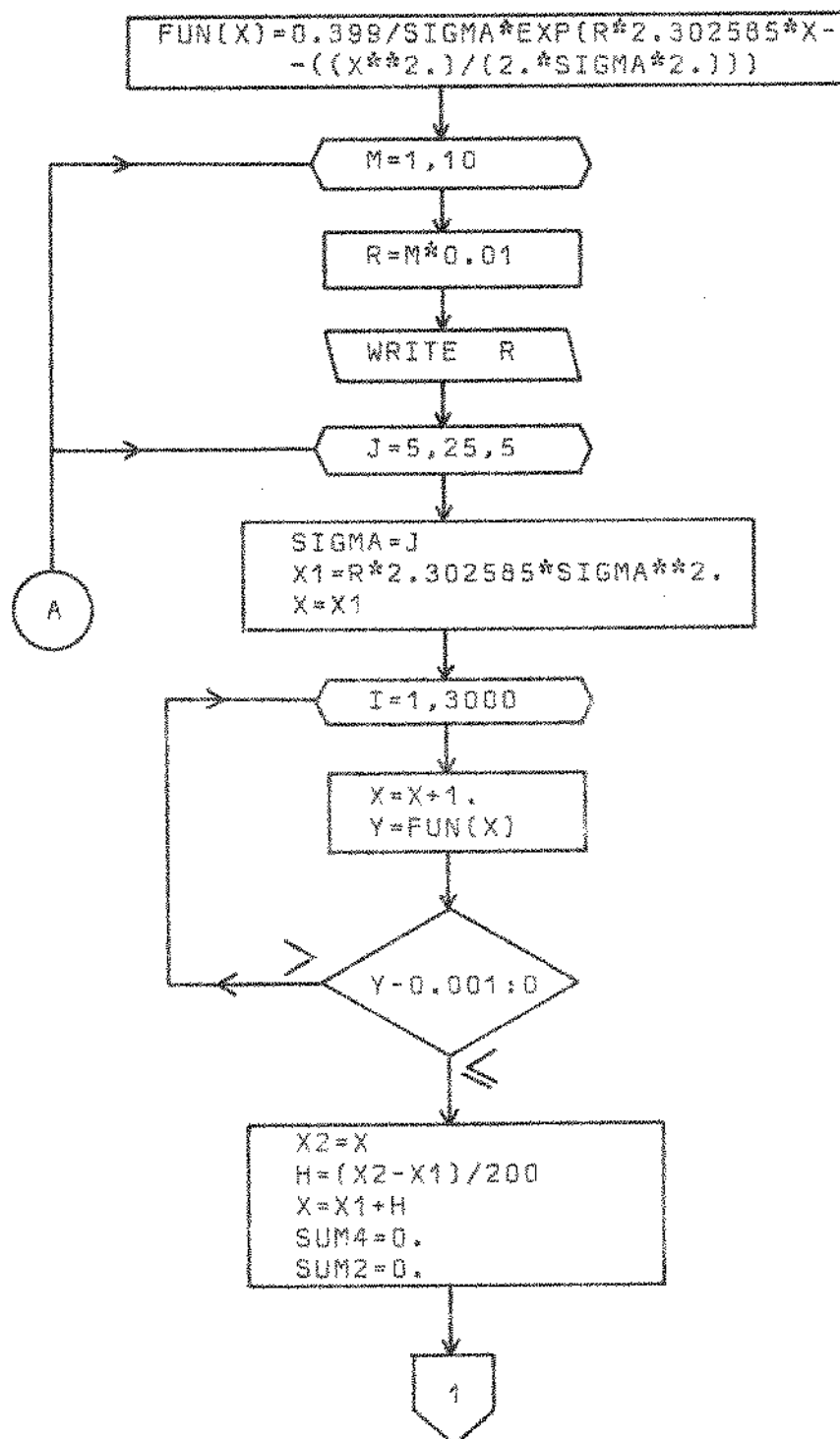
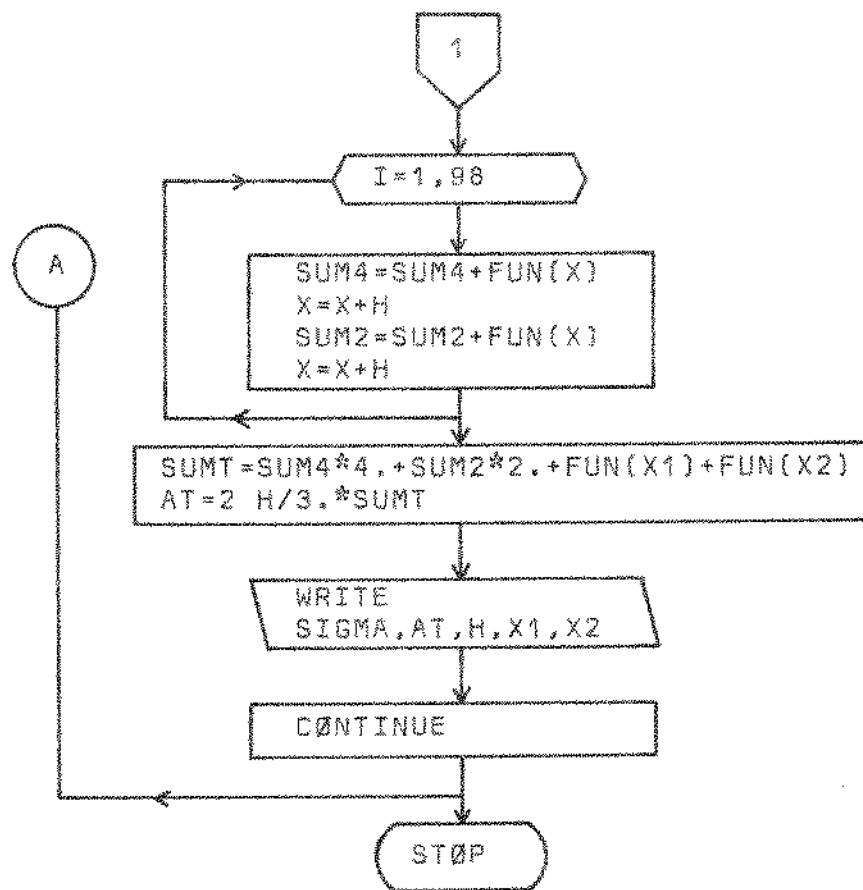


Figura 12: (Continuação).



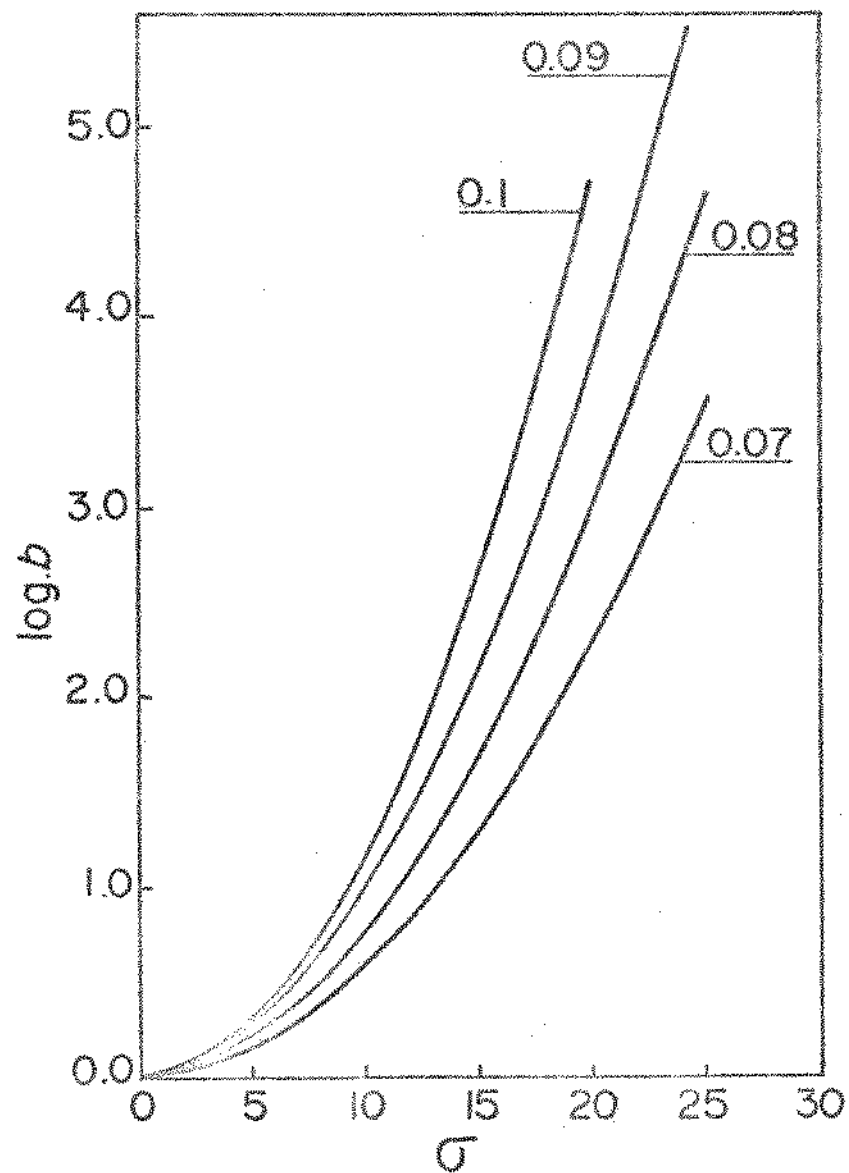


Figura 13: Exemplo das curvas da relação $\log b'$ versus σ a diferentes valores de R . O presente gráfico mostra as curvas para os valores de $R = 0,07$; $0,08$; $0,09$; e $0,10$.

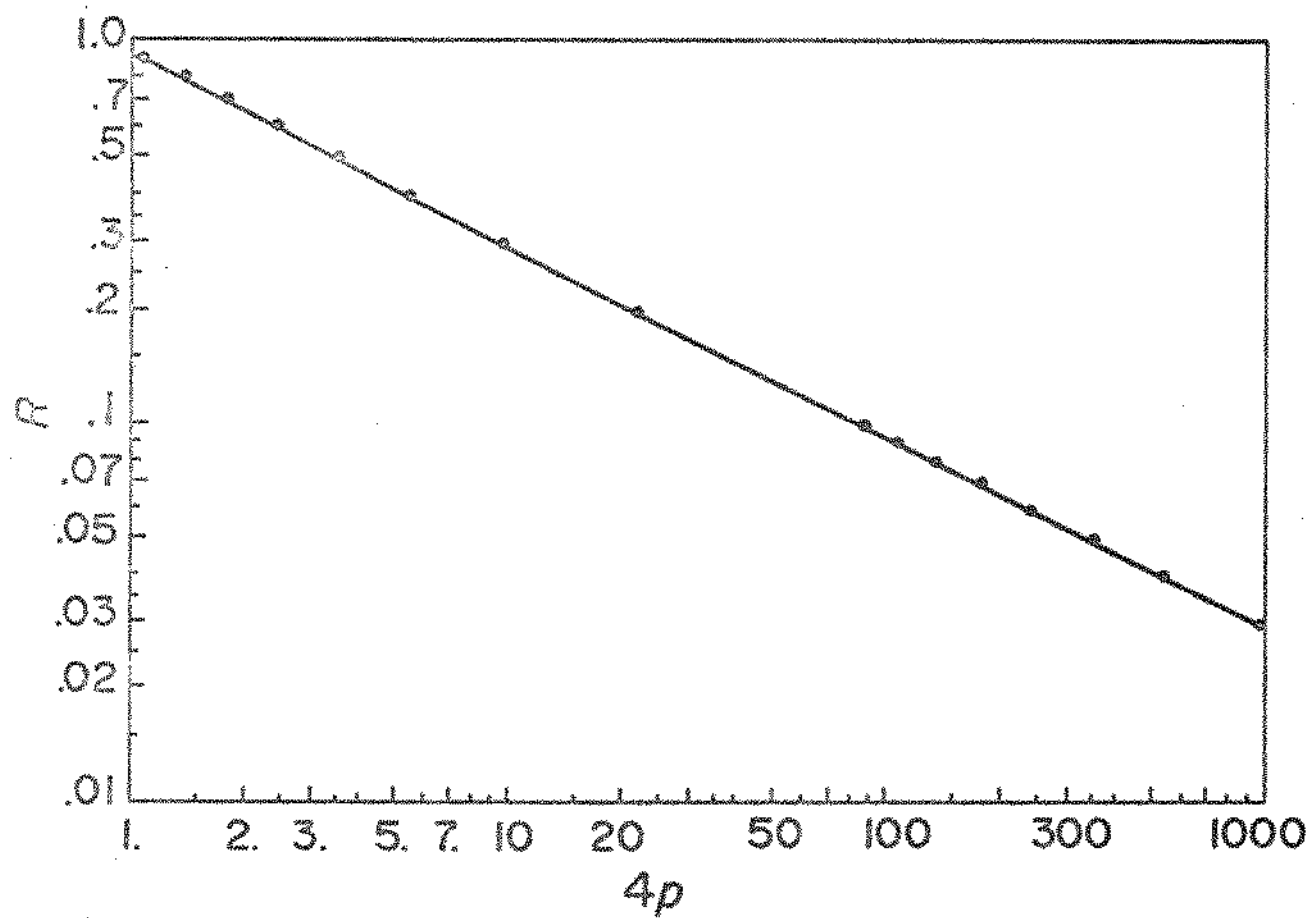


Figura 14: Curva da relação entre R e $4p$.

APLICAÇÃO DA TEORIA PROPOSTA

Para que a equação XXV seja aplicável, é preciso haver um meio fácil de determinar os valores de s e de R . O valor do desvio padrão (s) é obtido aplicando-se a fórmula

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (\text{XXVI})$$

Onde: x .. as variáveis.

$\bar{x}$.. média das variáveis.

n .. número de variáveis.

O valor de R é um pouco mais difícil de se determinar, porque depende de uma série de fatores, como: D_r , T_r , z , a/b , T_0 e f_h . Foi constatado que o valor de R diminui com o aumento do índice de declive (f_h). Locando-se o logaritmo do R em função do logaritmo do f_h , tem-se observado uma curva ligeiramente côncava. A figura 14 mostra essa curva calculada considerando-se $D_r = 1,00$ min.; $a/b = 10^5$; $j_h = j_c = 1,50$; $T_r = 121,19^\circ\text{C}$; $T_0 = 65,69^\circ\text{C}$; $T_w = 21,29^\circ\text{C}$; $z = 10^\circ\text{C}$; e $5 \leq f_h \leq 1000$ minutos. Figuras semelhantes foram obtidas para outras condições de esterilização. O diagrama de blocos para o cálculo do valor R está apresentado na figura 9.

Considerando os exemplos apresentados no livro de Stumbo (1965), foram feitas as curvas de R versus f_h para os esporos de bactérias termófilas e de *Clostridium botulinum*. Para o primeiro caso (ver figura 15) foi considerado $D_r = 4,00$ minutos; $a/b = 57.000$; $j_h = j_c = 1,50$; $T_r = 121,19^\circ\text{C}$; $T_0 = 65,69^\circ\text{C}$; $T_w = 21,19^\circ\text{C}$; $z = 10^\circ\text{C}$; e $5 \leq f_h \leq 1000$ minutos.

Para o segundo caso (ver figura 16) foi considerado $D_r = 0,21$ minutos; $a/b = 10^{12}$; $j_h = j_c = 1,50$; $T_r = 121,19^\circ\text{C}$; $T_0 = 65,69^\circ\text{C}$; $T_w = 21,19^\circ\text{C}$; $z = 109^\circ\text{C}$; e $10 \leq f_h \leq 1000$ minutos.

O valor máximo de R obtido nesses tres exemplos foi de $3,2 \text{ min.}^{-1}$, para os esporos de *C. botulinum* a $f_h = 10$ minutos, e o mínimo foi de $0,015 \text{ min.}^{-1}$ para os esporos de bactérias termófilas a $f_h = 1000$ minutos. Essa é a razão porque no estudo da relação entre R e b' foi considerado o intervalo de $0,01 \leq R \leq 3,5$.

Pela comparação visual das tres durvas (figuras 14,15 e 16) pode-se notar que outros fatores, além do f_h , influem no valor de R . Passaremos a analisar alguns desses fatores.

1. Efeito do z .

Os valores de R foram locados em função do f_h , no intervalo de $10 \leq f_h \leq 500$ minutos para $D_r = 1,00 \text{ min.}$; $a/b = 100.000$; $j_h = j_c = 1,50$; $T_r = 121,19^\circ\text{C}$; $T_0 = 65,69^\circ\text{C}$; $T_w = 21,19^\circ\text{C}$; e $6,7 \leq z \leq 12,29^\circ\text{C}$.

Como pode ser notado na figura 17, a variação do valor de R com os diferentes valores de z foi pequena, de $0,024$ a $0,042 \text{ min.}^{-1}$ no $f_h = 500$ minutos, respectivamente aos valores de $z = 12,29^\circ\text{C}$ e $6,79^\circ\text{C}$, e de $0,70$ e $1,15 \text{ min.}^{-1}$ no $f_h = 10$ minutos, respectivamente aos valores de $z = 12,29^\circ\text{C}$ e $6,79^\circ\text{C}$, portanto menos de duas vezes. As variações de R nos valores do índices de declives intermediários ($20 \leq f_h \leq 300$) foram menores. Por exemplo, a $f_h = 100 \text{ min.}$, R variou de $0,15$ a $0,19 \text{ min.}^{-1}$, respectivamente a os valores de $z = 12,29^\circ\text{C}$ e $z = 6,79^\circ\text{C}$.

Para os valores de z comumente encontrados nos esporos de bactérias de importância a esterilização de alimentos de baixa acidêz ($7,8 \leq z \leq 11,19^\circ\text{C}$), a diferença dos valores de R não ultrapassou de 20%. Portanto, o efeito do valor de z não foi considerado no presente estudo.

2. Efeito do j_c .

Os valores de R em função do f_h foram locados em papel log-log (figura 18) considerando os seguintes parâmetros: $D_p = 1,00$ minutos; $z = 10^\circ\text{C}$; $T_0 = 65,6^\circ\text{C}$; $T_r = 121,1^\circ\text{C}$; $T_w = 21,1^\circ\text{C}$; $j_h = 1,50$; $10 \leq f_h \leq 500$ minutos; e j_c de 1,0 ; 1,5 e 2,0. Todas as tres curvas puderam ser superpostas, indicando que a influência de j_c no valor de R é desprezível.

3. Efeito de a/b .

A relação entre o número inicial e o número final de esporos viáveis (a/b) admissíveis no alimento esterilizado influe enormemente no valor R . A figura 19 mostra o gráfico da relação entre R e f_h considerando os valores de a/b entre 10^4 e 10^{12} . Outros parâmetros considerados foram: $D_p = 1,00$ minutos; $z = 10^\circ\text{C}$; $T_0 = 65,6^\circ\text{C}$; $T_r = 121,1^\circ\text{C}$; $T_w = 21,1^\circ\text{C}$; $j_h = j_c = 1,50$; $10 \leq f_h \leq 500$ minutos.

O valor de R a $f_h = 10$ minutos foram de $0,73 \text{ min.}^{-1}$ para $a/b = 10^4$ e $1,30 \text{ min.}^{-1}$ para 10^{12} . Os valores de R a $f_h = 500$ minutos foram de $0,024$ e $0,092 \text{ min.}^{-1}$, respectivamente aos valores de a/b de 10^4 e 10^{12} . A relação dos valores intermediários de a/b e R a diferentes valores de f_h está apresentada na figura 20. A figura mostra que a relação entre R e o logaritmo de a/b é uma função linear cuja declividade varia com o f_h .

4. Efeito do valor D_p (ou D_a)

A figura 21 mostra a relação entre os valores de R e f_h quando se considera os diferentes valores de D_p . Os parâmetros considerados para o preparo desse gráfico foram: $T_0 = 65,6^\circ\text{C}$; $T_r = 121,1^\circ\text{C}$; $T_w = 21,1^\circ\text{C}$; $j_h = j_c = 1,50$; $z = 10^\circ\text{C}$; $a/b = 10^5$; $10 \leq f_h \leq 500$ minutos; e $D_p = 0,2$, $0,5$, $1,0$, $2,0$, $3,0$, $4,0$, $6,0$, $8,0$ e $10,0$ minutos.

Os valores mais elevados de R foram observados quando o valor de D_r era bem pequeno. Essa figura mostra que o valor de R é mais influenciado pelo valor D_r quando o índice de declive (f_h) é baixo. Assim, a $f_h = 10$ minutos, o valor de R variou de 0,18 a 1,7 min.⁻¹ para os valores de $10 \geq D_r \geq 0,2$ min., e a $f_h = 500$ minutos, essa variação foi de apenas 0,025 a 0,033 na mesma variação de D_r . Os cálculos efetuados a temperatura de autoclave a 110°C mostram que o valor de R varia mais propriamente com D_a , ou seja, com o valor de D a temperatura da autoclave considerada. Uma elucidação desse fato está apresentada na figura 22.

5. Efeito de T_0 e T_r .

A temperatura inicial do alimento, T_0 , tem um efeito desprezível no valor de R , como mostra a figura 23, dentro do intervalo mais comumente empregado na esterilização de alimentos. Os dados apresentados nessa figura foram obtidos, considerando o valor de T_0 de 54,5, 65,6 e 82,2°C. Por essa razão, no presente estudo, esse fator não foi considerado como afetando o valor de R .

O efeito da temperatura da autoclave (T_r) está na mudança do valor de D_a modificando o valor de R , como exposto no item 4 desse capítulo. Também, a mudança da temperatura da autoclave vem causar uma variação no valor I_0 , se a temperatura inicial do produto for mantida constante. Porém, como já foi exposto, esta variação não afeta sensivelmente o valor R (figura 23).

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que o valor de R aplicado a esterilização de alimentos depende principalmente dos parâmetros f_h , D_a e a/b . Foram feitas várias tentativas para encontrar uma equação ou uma série de equações que pudessem ser aplicadas para o cálculo do valor R a uma determinada condição de processamento.

Embora algumas relações simples pudessem ser traçadas, como no caso da figura 22, a variação de R com a mudança dos diversos parâmetros na maioria dos casos não apresentou uma expressão matematicamente simples. Por essa razão, neste trabalho preferiu

se apresentar uma tabela obtida calculando-se os valores de R às condições de processamentos seguintes: $0,2 \leq D_a \leq 10$ min. ; $10 \leq f_h \leq 500$ min.; $3 \leq \log(a/b) \leq 12$. O programa de computação para o cálculo de R está apresentado na figura 9.

Os valores de R foram obtidos para os seguintes valores de f_h : 10 , 20 , 30 , 40 , 50 , 100 , 200 , 300 , 400 , 500 min. ; para os seguintes valores de D_a : 0,2 , 0,4 , 0,6 , 0,8 , 1,0 , 2,0 , 3,0 , 4,0 , 5,0 , 6,0 , 7,0 , 8,0 , 10,0 min.; e para os seguintes valores de $\log(a/b)$: 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12. A seguir foram traçadas as curvas da relação R versus f_h para cada condição de D_a e $\log(a/b)$, através dos pontos locados. Os dados constantes na tabela 2 foram obtidos das curvas assim traçadas (ver figura 24 para um exemplo dessas curvas).

Assim, pode-se facilmente obter o valor b' , calculando-se s pela equação XXVI, obtendo-se o valor de R na tabela 2 e resolvendo-se a equação XXV.

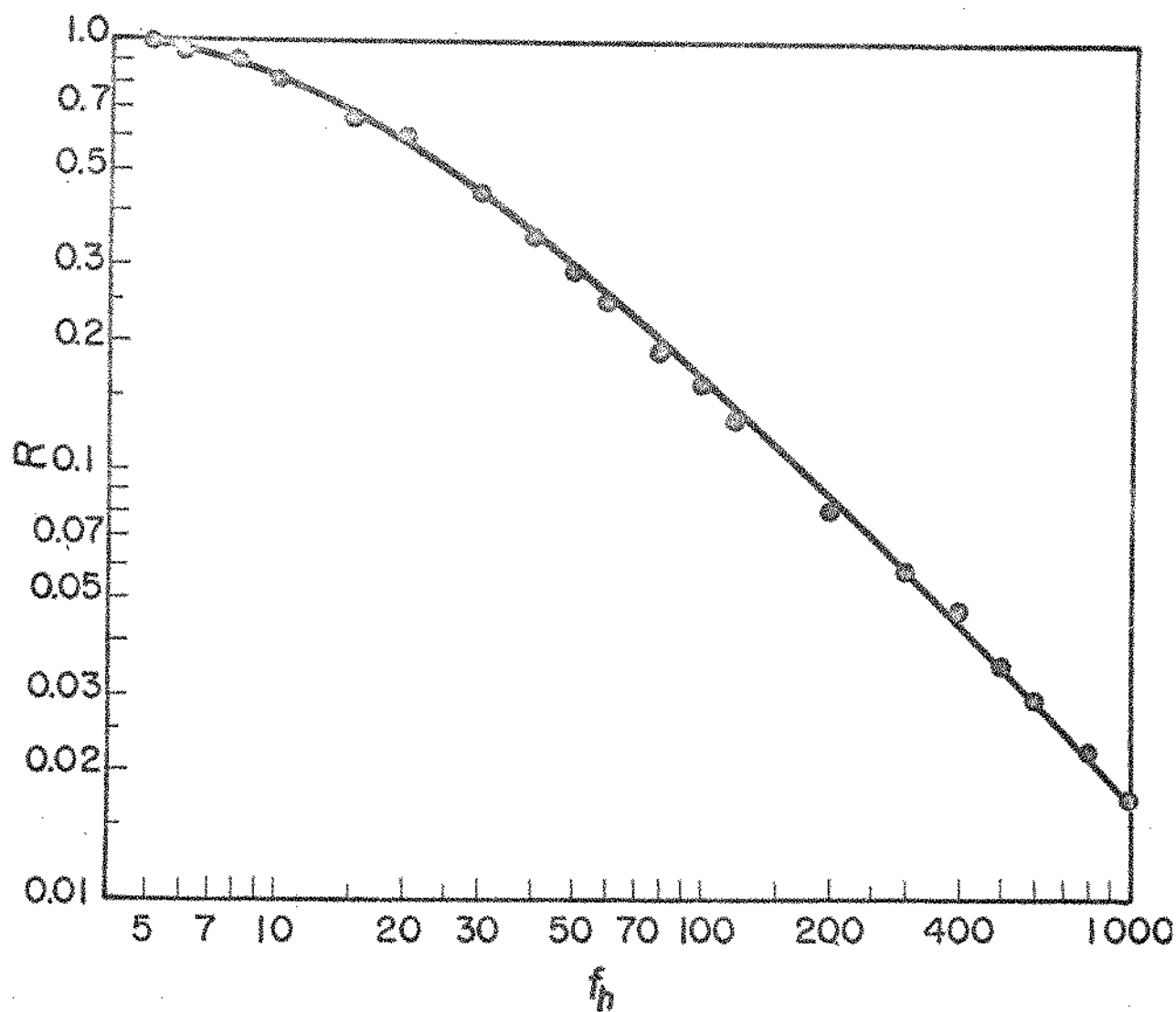


Figura 15: Curva da relação entre f_h e R considerando $D_r = 1,00$ min.; $a/b = 10^5$; $j_h = j_o = 1,50$; $T_a = 121,1^\circ\text{C}$; $T_o = 65,6^\circ\text{C}$; $T_w = 21,1^\circ\text{C}$; $z = 10^\circ\text{C}$; e $5 \leq f_h \leq 1000$ min. Dados de Stumbo (1965) para a condição de esterilização para os esporos de bactérias mesófilas.

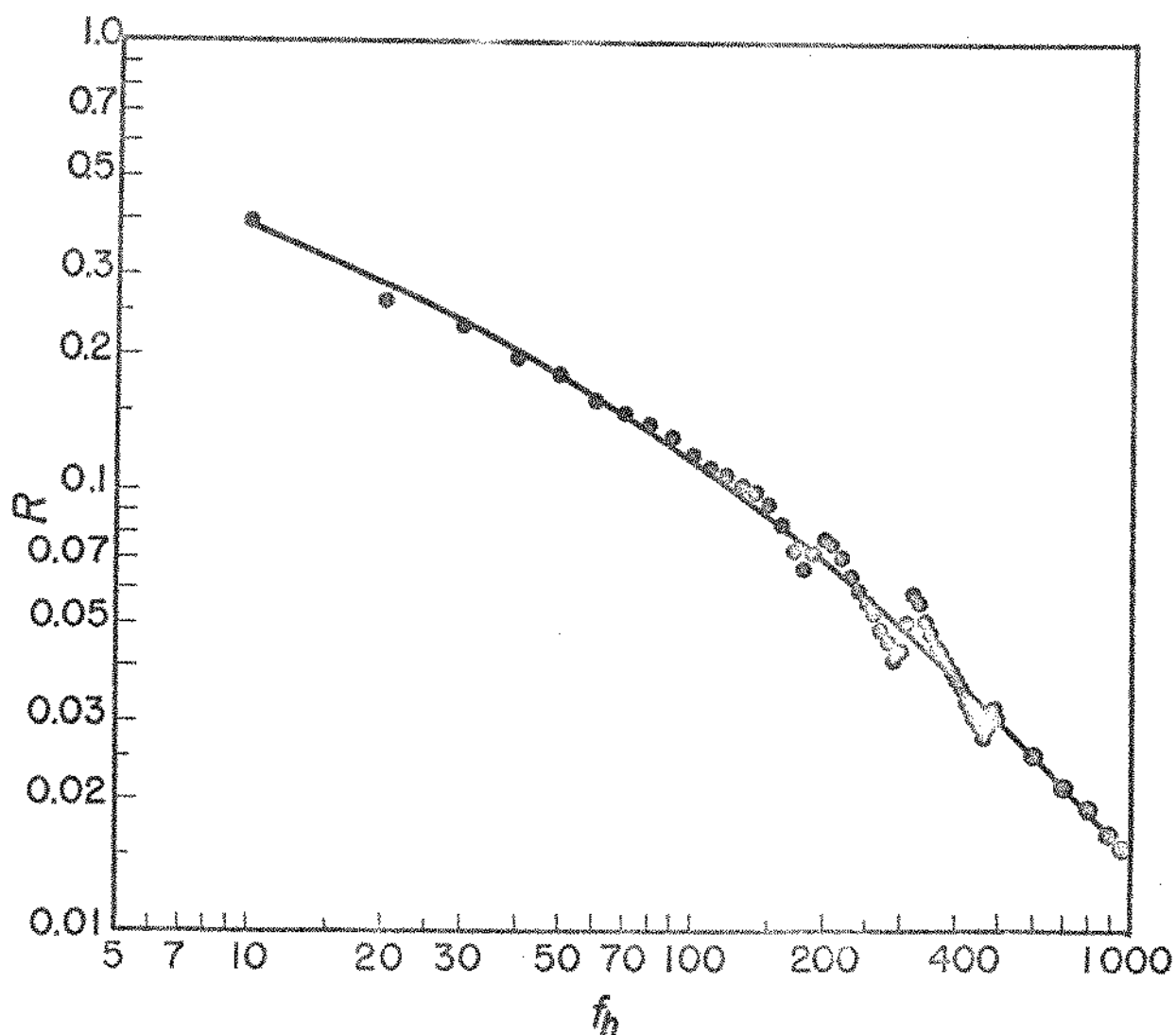


Figura 16: Curva da relação entre f_h e R , considerando $D_r = 4,0$ min.; $a/b = 57.000$; $j_h = j_c = 1,50$; $T_a = 121,19^\circ\text{C}$; $T_0 = 65,69^\circ\text{C}$; $T_w = 21,19^\circ\text{C}$; $z = 10^\circ\text{C}$; e $5 \leq f_h \leq 1000$ min. Dados de Stumbo (1965) para a condição de esterilização para os esporos de bactérias termófilas.

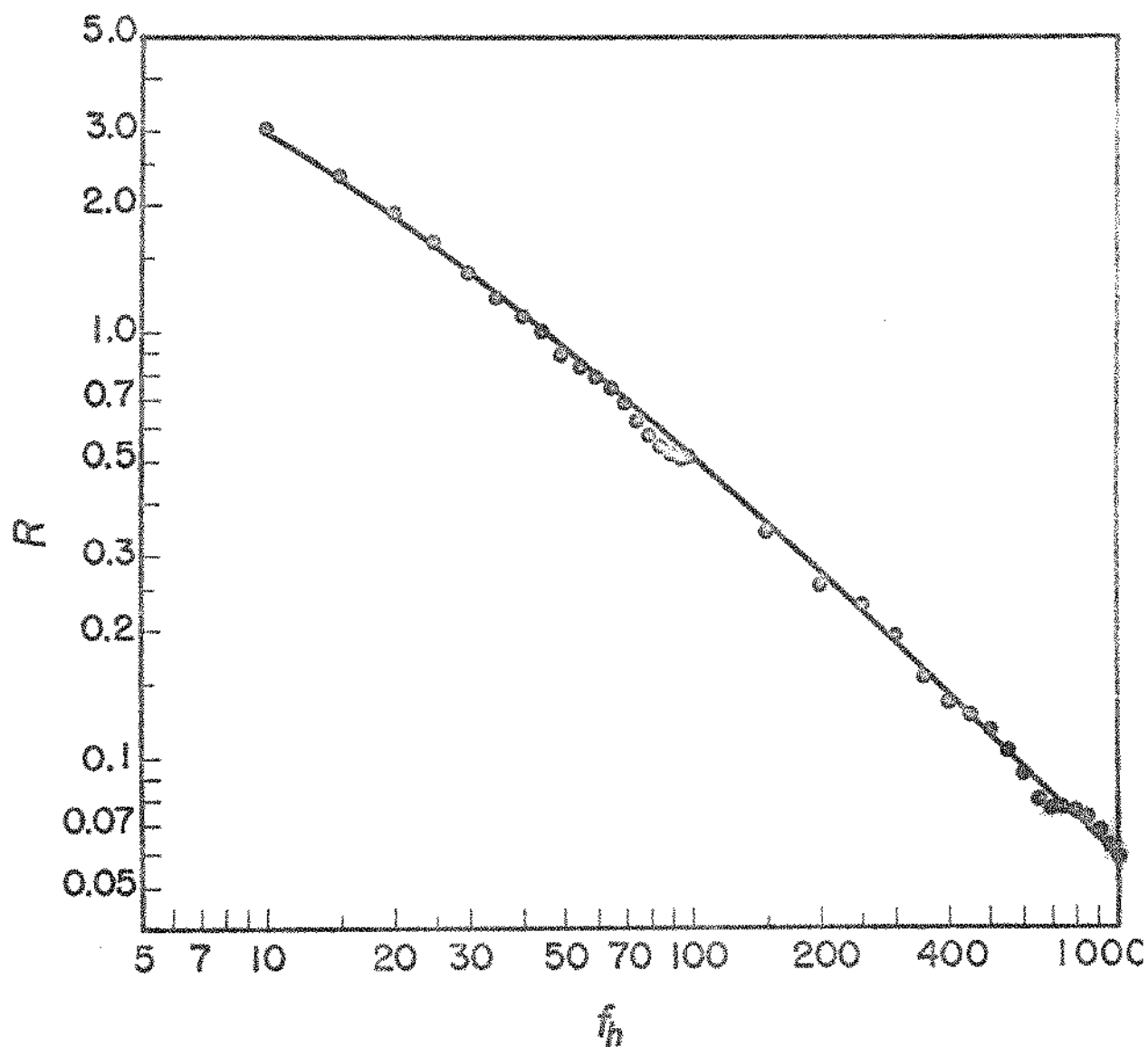


Figura 17: Curva da relação entre f_h e R , considerando $D_p = 0,21$ min.; $a/b = 10^{12}$; $j_h = j_c = 1,50$; $T_a = 121,19^\circ\text{C}$; $T_0 = 65,69^\circ\text{C}$; $T_w = 21,19^\circ\text{C}$; $z = 109^\circ\text{C}$; $10 \leq f_h \leq 1000$ - min. Dados de Stumbo (1965) para a condição de esterilização para os esporos de *Clostridium botulinum*.

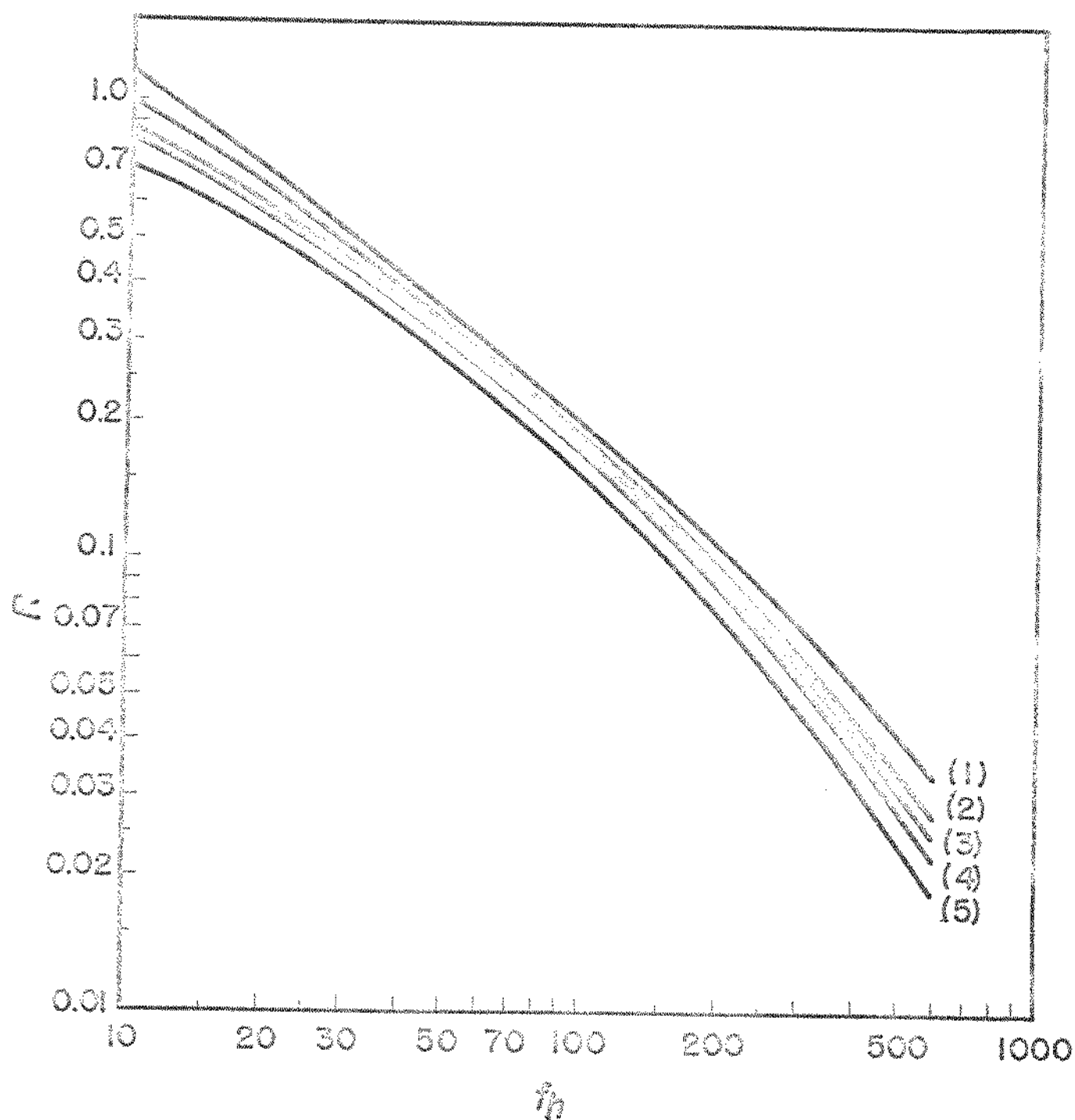


Figura 18: Efeito da variação do valor z na relação R versus f_h . Valores de z para curva (1) = 6,7°C; (2) = 7,8°C; (3) = 8,9°C; (4) = 10,0°C; (5) = 12,2°C.

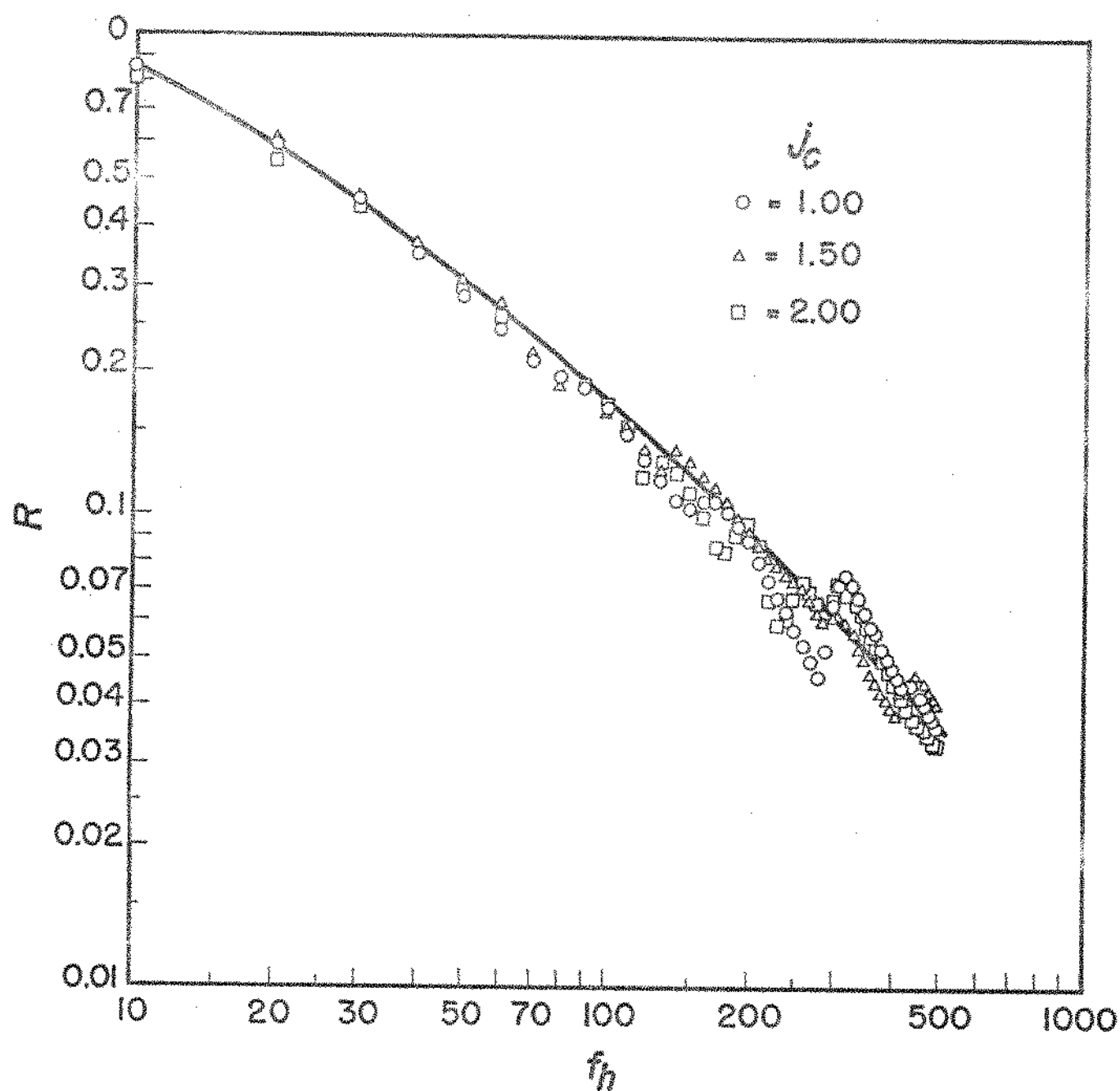


Figura 19: Efeito da variação no valor de j_c na relação entre f_h e R . Valores de j_c utilizados: 1,00; 1,50; e 2,00.

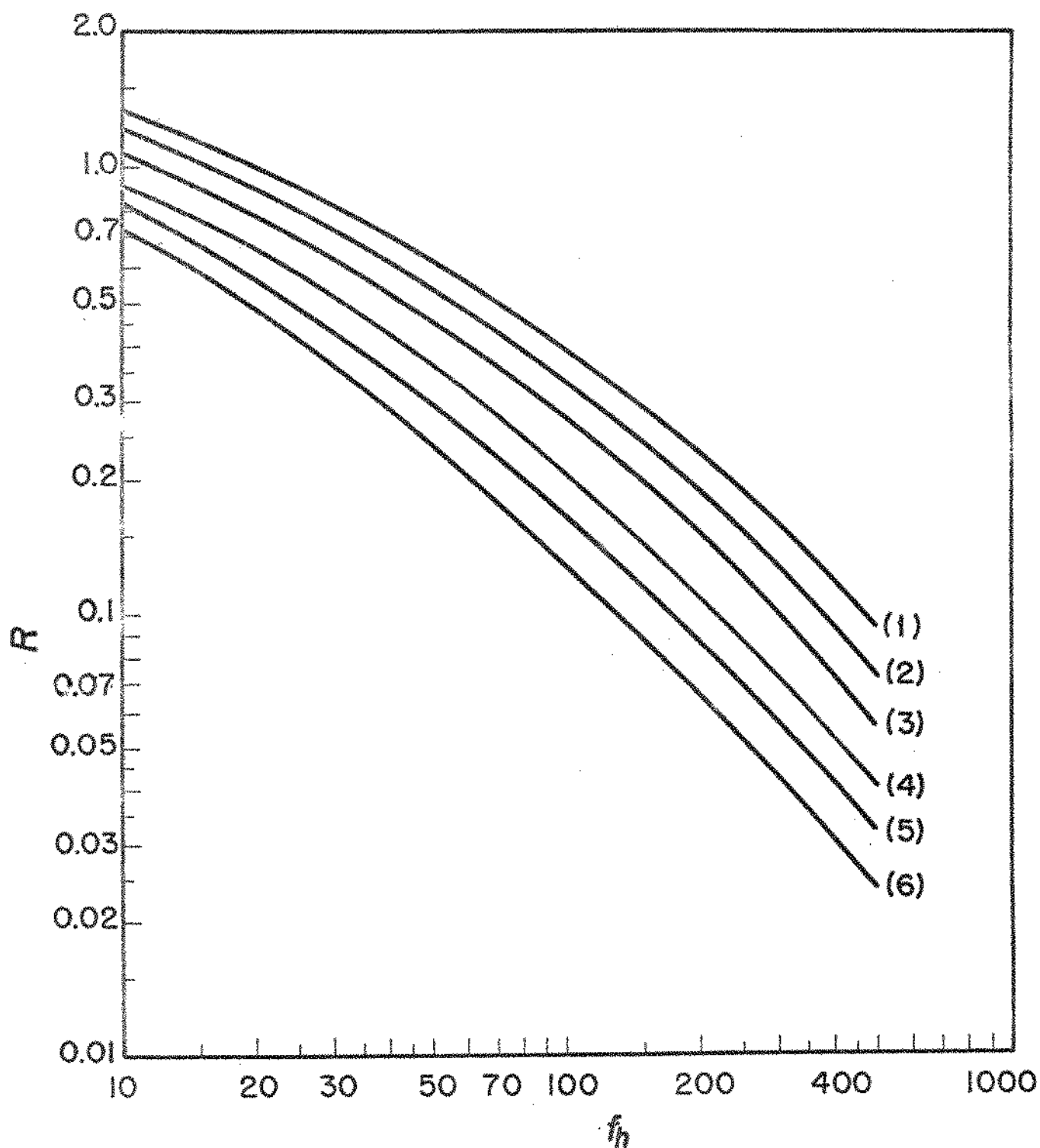


Figura 20: Efeito da variação da relação entre o número inicial e o número final de bactérias (a/b) na curva R versus f_h . Valores de a/b para a curva (1) = 10^{12} ; (2) = 10^{10} ; (3) = 10^8 ; (4) = 10^6 ; (5) = 10^5 ; (6) = 10^4 .

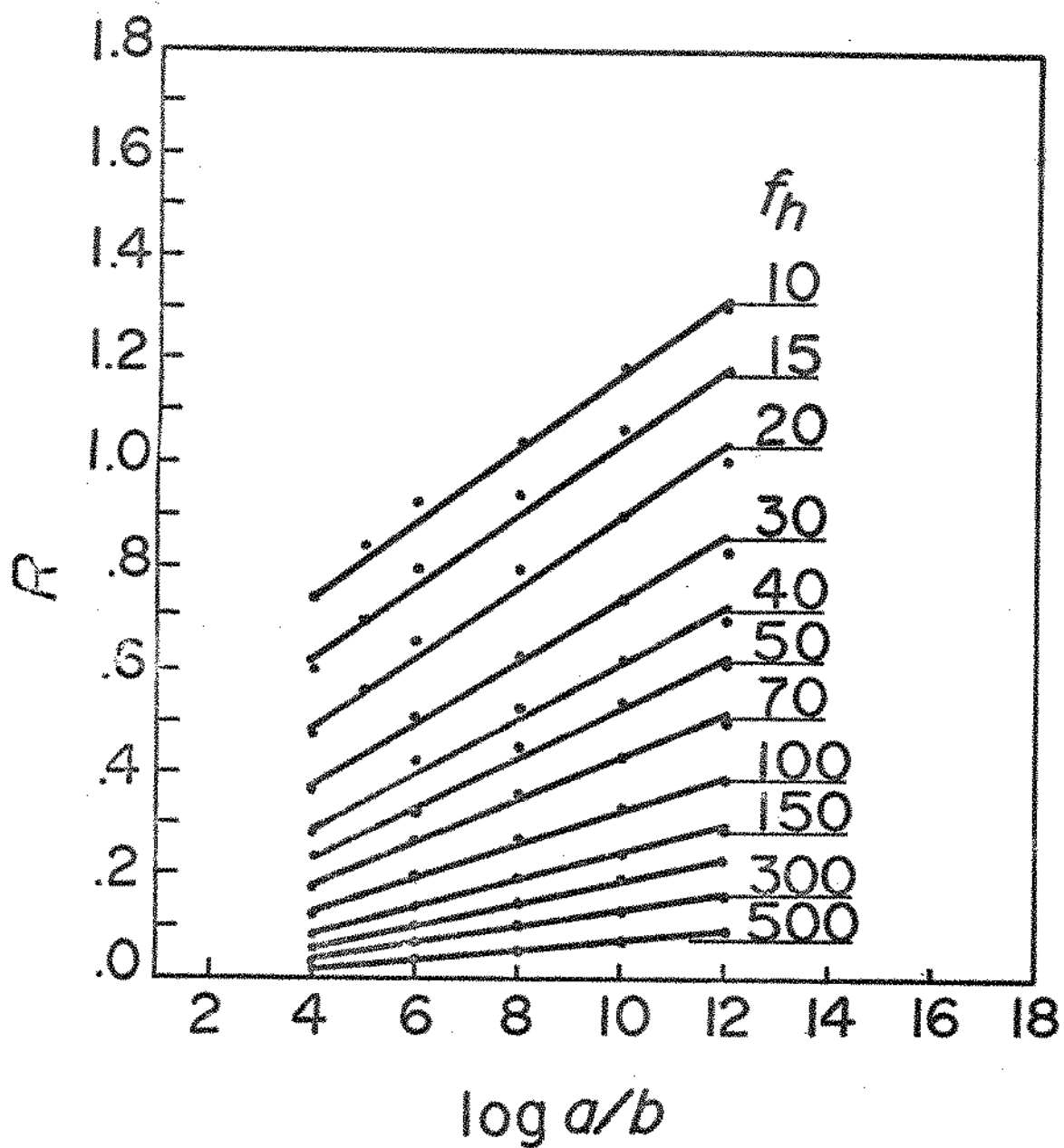


Figura 21: Relação entre o valor R e $\log a/b$ determinados no índice de declive de $10 \leq f_h \leq 500$ minutos.

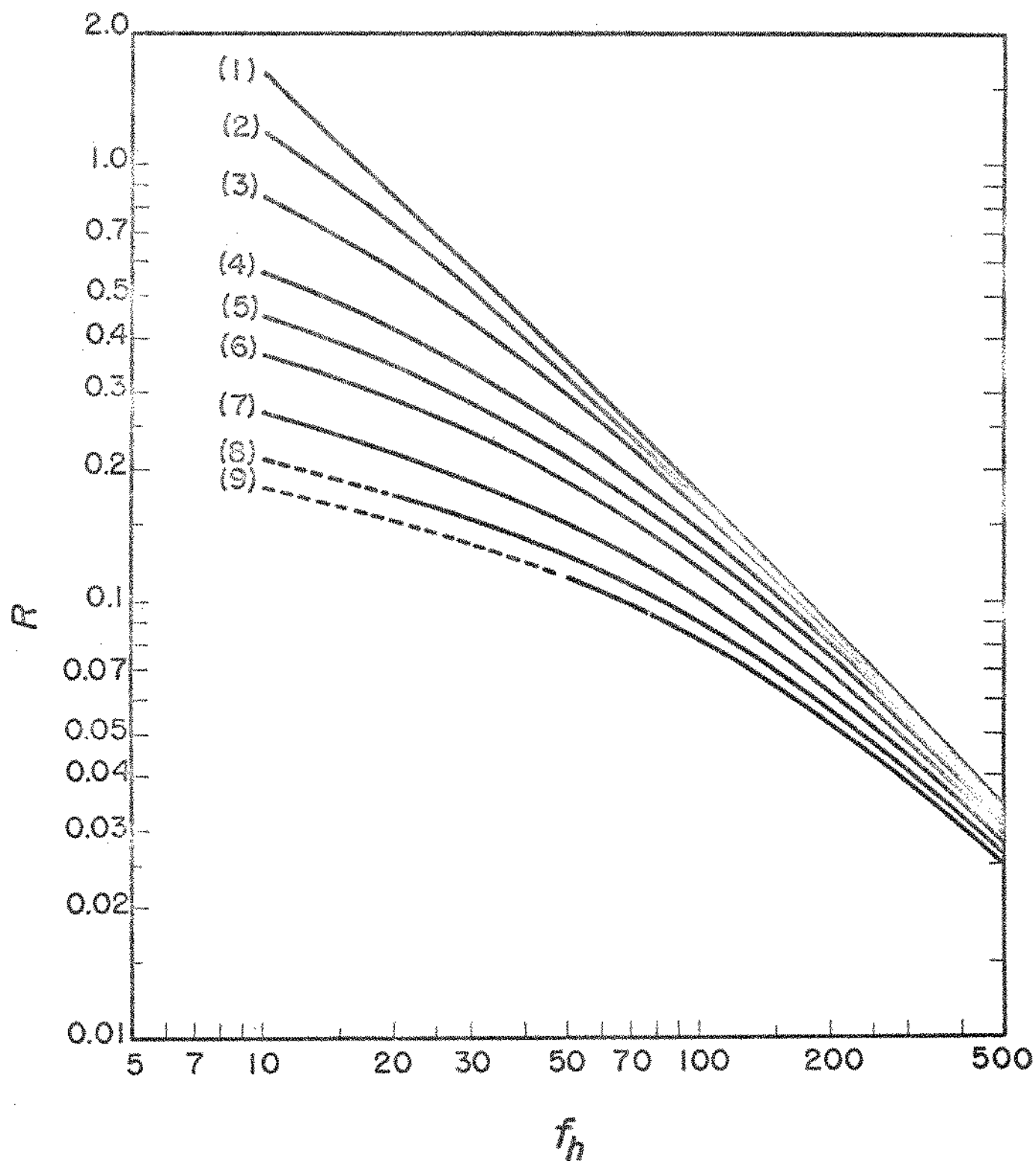


Figura 22: Efeito da variação do valor D_r (ou D_a) na relação R versus f_h . Valores de D_r (ou D_a) para a curva (1) = 0,2 min.; (2) = 0,5 min.; (3) = 1,0 min.; (4) = 2,0 min.; (5) = 3,0 min.; (6) = 4,0 min.; (7) = 6,0 min.; (8) = 8,0 min.; (9) = 10 min.

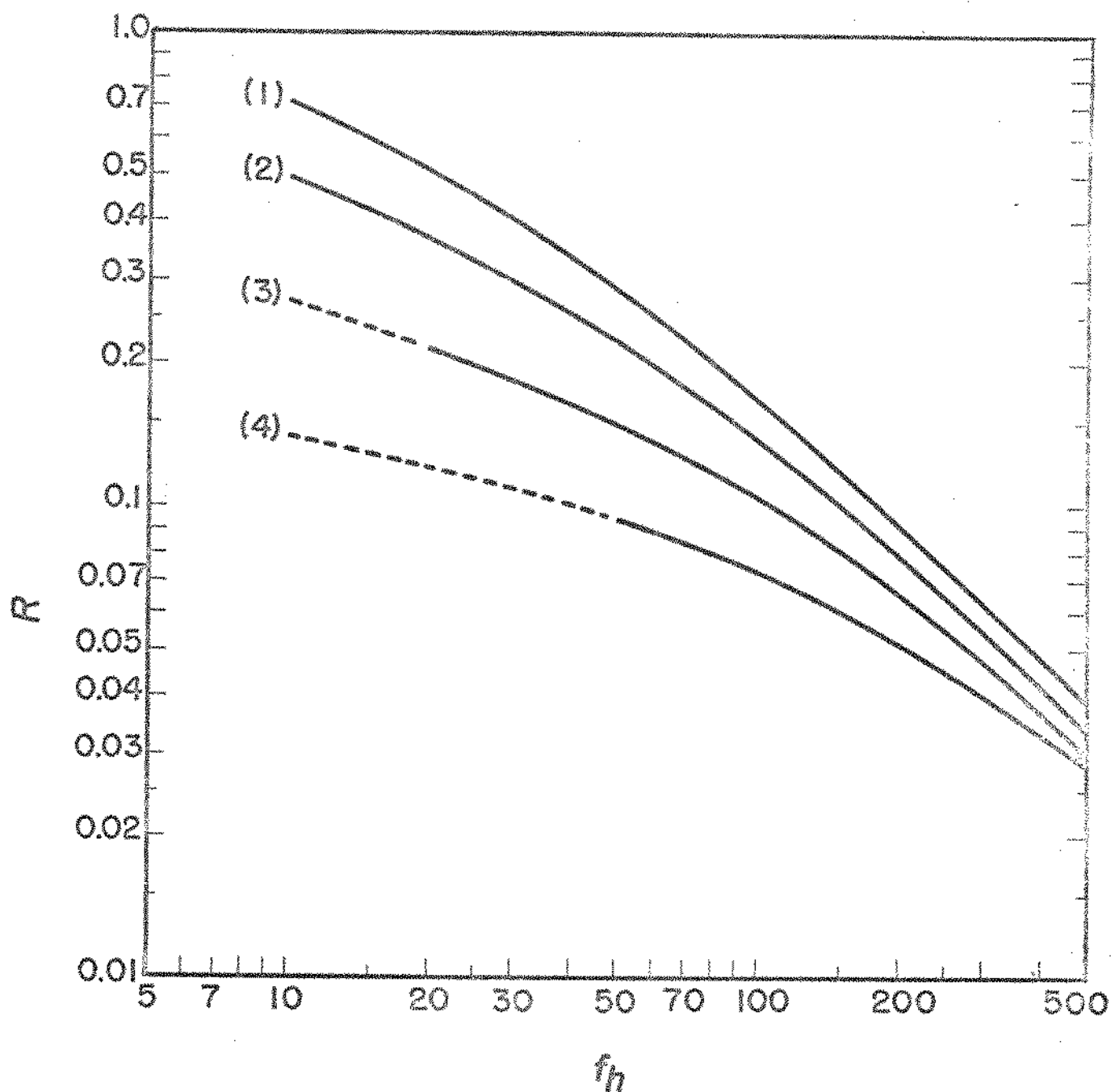


Figura 23: Efeito da temperatura da autoclave na relação R versus f_h . Dados: $T_0 = 65,6^\circ\text{C}$; $T_w = 21,1^\circ\text{C}$; $j_h = j_a = 1,50$; $s = 10^\circ\text{C}$; $a/b = 10^5$; $D_r = 1,00 \text{ min.}$; $10 \leq f_h \leq 500 \text{ min.}$; T_a para curva (1) = $121,1^\circ\text{C}$; (2) = $118,3^\circ\text{C}$; (3) = $115,6^\circ\text{C}$; e (4) = $110,0^\circ\text{C}$.

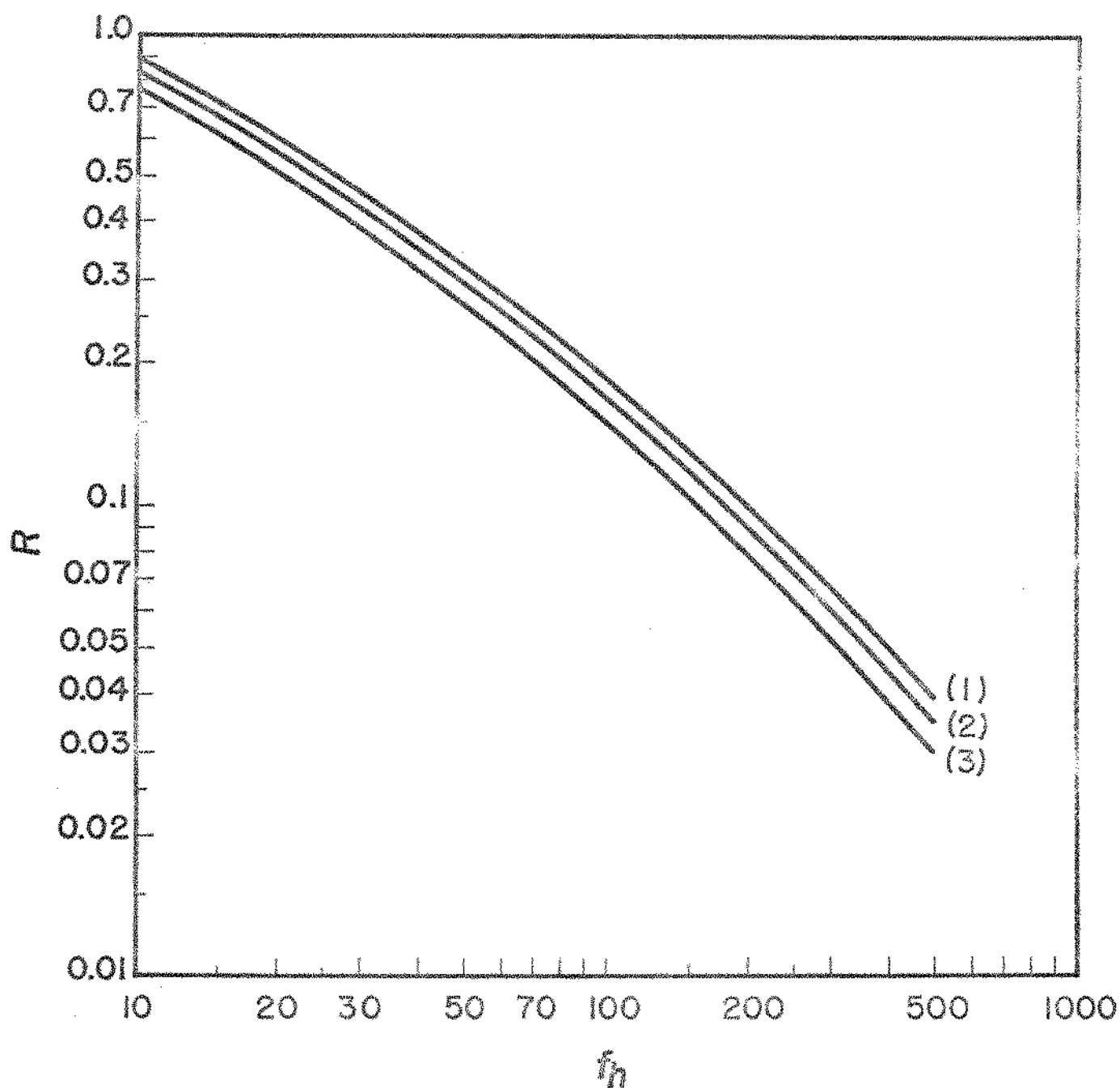


Figura 24: Efeito da temperatura inicial do alimento na relação R versus f_h . Dados: $T_a = 121,1^\circ\text{C}$; $T_u = 21,1^\circ\text{C}$; $j_h = j_a = 1,50$; $z = 10^\circ\text{C}$; $a/b = 10^5$; $D_r = 1,00$ min.; $10 \leq f_h \leq 500$ min.; T_0 para curva (1) = $54,5^\circ\text{C}$; (2) = $65,6^\circ\text{C}$; (3) = $82,2^\circ\text{C}$.

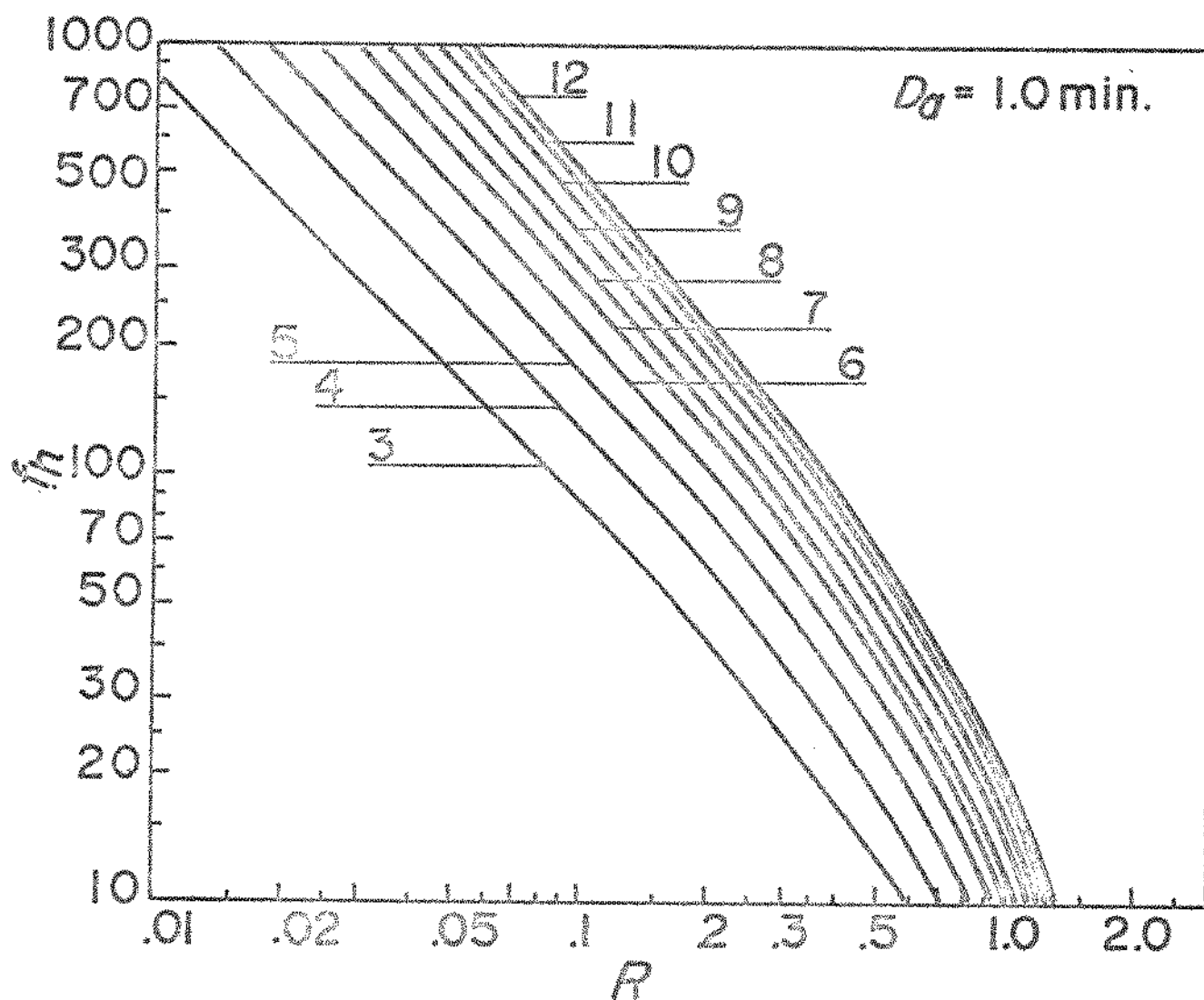


Figura 25: Curvas da relação R versus f_h traçadas para $D_a = 1,00$ minutos e $\log a/b$ de 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12.

Tabela 2: Valores de R em função de f_h e a/b para $D_a = 0,20$ minutos.

f_h	log a/b									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	1,00	1,36	1,60	1,93	2,20	2,40	2,60	2,75	3,03	3,33
15	0,62	0,86	1,10	1,32	1,55	1,72	1,88	2,00	2,22	2,42
20	0,46	0,62	0,79	1,00	1,20	1,35	1,48	1,60	1,77	1,92
25	0,36	0,49	0,64	0,82	0,97	1,10	1,23	1,33	1,48	1,62
30	0,29	0,41	0,53	0,69	0,82	0,94	1,07	1,17	1,28	1,38
35	0,25	0,36	0,46	0,60	0,71	0,82	0,93	1,03	1,13	1,22
40	0,21	0,31	0,41	0,53	0,63	0,73	0,83	0,92	1,01	1,10
50	0,168	0,254	0,330	0,425	0,510	0,602	0,690	0,770	0,850	0,920
60	0,137	0,212	0,260	0,360	0,430	0,515	0,592	0,660	0,730	0,792
70	0,125	0,180	0,242	0,312	0,375	0,450	0,522	0,582	0,642	0,700
80	0,100	0,158	0,214	0,275	0,330	0,400	0,465	0,525	0,573	0,628
90	0,088	0,142	0,192	0,246	0,296	0,352	0,424	0,478	0,522	0,570
100	0,078	0,126	0,173	0,224	0,270	0,326	0,388	0,440	0,476	0,522
150	0,050	0,084	0,118	0,153	0,185	0,228	0,260	0,298	0,325	0,352
200	0,036	0,063	0,091	0,117	0,142	0,178	0,190	0,225	0,245	0,272
250	0,028	0,044	0,070	0,094	0,114	0,142	0,157	0,180	0,199	0,220
300	0,023	0,033	0,056	0,080	0,097	0,117	0,130	0,150	0,167	0,185
350	-	-	0,049	0,068	0,084	0,102	0,112	0,128	0,144	0,160
400	-	-	0,039	0,056	0,074	0,089	0,090	0,112	0,127	0,142
500	-	-	0,030	0,043	0,056	0,071	0,079	0,090	0,103	0,115
600	-	-	-	-	-	0,059	0,067	0,075	0,087	0,096
700	-	-	-	-	-	0,051	0,058	0,065	0,075	0,083
800	-	-	-	-	-	0,045	0,050	0,056	0,066	0,074
900	-	-	-	-	-	0,040	0,045	0,051	0,059	0,066
1000	-	-	-	-	-	0,036	0,040	0,045	0,054	0,059

Tabela 2: Valores de R em função do f_h e a/b para $D_a = 0,40$ minutos.

f_h	log a/b									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0,85	1,15	1,30	1,45	1,60	1,78	1,90	2,00	2,12	2,22
15	0,56	0,74	0,91	1,10	1,26	1,44	1,55	1,64	1,77	1,85
20	0,43	0,57	0,71	0,87	1,03	1,17	1,27	1,36	1,46	1,56
25	0,34	0,47	0,59	0,73	0,85	0,98	1,07	1,15	1,24	1,33
30	0,29	0,39	0,51	0,63	0,74	0,85	0,93	1,00	1,09	1,16
35	0,24	0,35	0,44	0,55	0,65	0,74	0,82	0,89	0,93	1,03
40	0,22	0,31	0,40	0,49	0,57	0,66	0,74	0,81	0,88	0,94
50	0,173	0,250	0,325	0,410	0,475	0,552	0,622	0,680	0,745	0,794
60	0,145	0,212	0,279	0,353	0,412	0,475	0,542	0,590	0,648	0,693
70	0,124	0,184	0,245	0,312	0,362	0,420	0,481	0,530	0,590	0,612
80	0,109	0,163	0,218	0,276	0,325	0,376	0,435	0,480	0,522	0,532
90	0,097	0,147	0,197	0,253	0,295	0,343	0,396	0,438	0,478	0,516
100	0,087	0,132	0,180	0,230	0,270	0,315	0,365	0,407	0,445	0,475
150	0,059	0,086	0,119	0,154	0,183	0,213	0,246	0,274	0,305	0,330
200	0,044	0,064	0,089	0,116	0,138	0,162	0,187	0,208	0,233	0,254
250	0,035	0,050	0,072	0,093	0,112	0,132	0,152	0,168	0,188	0,207
300	0,030	0,041	0,059	0,077	0,094	0,112	0,127	0,142	0,160	0,174
350	0,025	0,035	0,051	0,067	0,081	0,096	0,110	0,122	0,138	0,152
400	0,022	0,031	0,045	0,058	0,071	0,085	0,097	0,108	0,122	0,134
500	-	0,024	0,036	0,047	0,057	0,069	0,078	0,087	0,090	0,109
600	-	-	-	0,038	0,048	0,058	0,066	0,073	0,084	0,093
700	-	-	-	0,033	0,042	0,051	0,057	0,064	0,073	0,081
800	-	-	-	0,029	0,037	0,044	0,051	0,056	0,065	0,072
900	-	-	-	0,026	0,033	0,040	0,046	0,051	0,058	0,065
1000	-	-	-	0,023	0,030	0,036	0,041	0,046	0,052	0,058

Tabela 2: Valores de R em função do f_h e a/b para $D_a = 0,60$ minutos.

f_h	log a/b									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0,74	0,96	1,08	1,20	1,34	1,44	1,52	1,62	1,70	1,76
15	0,51	0,69	0,85	0,96	1,08	1,18	1,25	1,34	1,40	1,45
20	0,39	0,55	0,69	0,80	0,90	1,00	1,06	1,15	1,21	1,26
25	0,32	0,45	0,57	0,67	0,77	0,86	0,94	1,00	1,06	1,12
30	0,27	0,38	0,48	0,58	0,67	0,75	0,83	0,89	0,94	0,99
35	0,23	0,33	0,43	0,50	0,59	0,68	0,74	0,80	0,85	0,90
40	0,21	0,30	0,38	0,46	0,53	0,60	0,67	0,72	0,78	0,82
50	0,168	0,245	0,315	0,378	0,445	0,512	0,568	0,618	0,665	0,705
60	0,144	0,208	0,270	0,352	0,382	0,446	0,495	0,545	0,590	0,628
70	0,124	0,182	0,236	0,288	0,338	0,395	0,440	0,486	0,528	0,567
80	0,112	0,162	0,213	0,258	0,304	0,356	0,400	0,444	0,482	0,518
90	0,099	0,146	0,192	0,235	0,275	0,325	0,365	0,407	0,445	0,478
100	0,091	0,133	0,176	0,215	0,255	0,300	0,338	0,375	0,420	0,445
150	0,057	0,088	0,117	0,145	0,172	0,202	0,232	0,263	0,285	0,310
200	0,041	0,066	0,088	0,110	0,132	0,156	0,179	0,204	0,220	0,238
250	0,031	0,052	0,071	0,089	0,106	0,128	0,147	0,167	0,181	0,195
300	0,025	0,043	0,059	0,075	0,089	0,107	0,124	0,142	0,154	0,165
350	0,021	0,037	0,051	0,065	0,077	0,093	0,108	0,124	0,134	0,143
400	0,018	0,032	0,044	0,057	0,068	0,083	0,096	0,110	0,120	0,127
500	0,014	0,026	0,035	0,048	0,055	0,067	0,079	0,090	0,098	0,104
600	0,011	0,021	0,030	0,038	0,046	0,057	0,067	0,077	0,084	0,088
700	-	0,018	0,025	0,033	0,040	0,049	0,059	0,067	0,073	0,077
800	-	0,016	0,022	0,030	0,035	0,044	0,052	0,060	0,065	0,068
900	-	0,014	0,020	0,026	0,032	0,039	0,047	0,054	0,058	0,061
1000	-	0,013	0,018	0,024	0,029	0,036	0,043	0,049	0,054	0,056

Tabela 2: Valores de R em função do f_h e a/b para $D_a = 0,60$ minutos.

f_h	log a/b									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0,66	0,62	0,93	1,03	1,12	1,23	1,30	1,35	1,41	1,48
15	0,49	0,64	0,76	0,86	0,96	1,08	1,14	1,20	1,25	1,33
20	0,38	0,51	0,64	0,73	0,82	0,92	0,99	1,03	1,08	1,16
25	0,31	0,42	0,53	0,61	0,70	0,78	0,85	0,89	0,94	1,01
30	0,26	0,36	0,46	0,53	0,61	0,68	0,75	0,79	0,84	0,90
35	0,23	0,32	0,41	0,47	0,54	0,61	0,67	0,71	0,76	0,82
40	0,20	0,28	0,36	0,43	0,49	0,56	0,61	0,65	0,70	0,75
50	0,165	0,233	0,304	0,362	0,414	0,475	0,530	0,560	0,605	0,650
60	0,138	0,148	0,262	0,313	0,360	0,415	0,465	0,495	0,540	0,590
70	0,121	0,175	0,230	0,280	0,322	0,372	0,417	0,446	0,487	0,528
80	0,107	0,156	0,203	0,253	0,291	0,338	0,381	0,408	0,448	0,485
90	0,096	0,142	0,187	0,230	0,267	0,312	0,352	0,375	0,416	0,448
100	0,087	0,128	0,172	0,212	0,245	0,288	0,325	0,350	0,385	0,420
150	0,056	0,085	0,115	0,142	0,170	0,197	0,225	0,242	0,265	0,290
200	0,041	0,064	0,087	0,107	0,130	0,151	0,173	0,187	0,205	0,225
250	0,032	0,050	0,070	0,087	0,106	0,123	0,142	0,152	0,167	0,175
300	0,027	0,042	0,059	0,073	0,089	0,104	0,119	0,129	0,142	0,157
350	0,023	0,036	0,050	0,063	0,078	0,091	0,104	0,112	0,124	0,137
400	0,020	0,031	0,044	0,055	0,068	0,080	0,092	0,099	0,108	0,122
500	0,015	0,025	0,035	0,044	0,056	0,065	0,075	0,081	0,090	0,099
600	0,013	0,021	0,030	0,037	0,047	0,055	0,064	0,069	0,076	0,085
700	0,011	0,018	0,026	0,032	0,041	0,048	0,055	0,060	0,066	0,074
800	-	0,015	0,023	0,028	0,036	0,042	0,049	0,053	0,059	0,066
900	-	0,014	0,020	0,025	0,032	0,038	0,044	0,048	0,053	0,059
1000	-	0,012	0,018	0,023	0,029	0,035	0,040	0,043	0,048	0,054

Tabela 2: Valores de R em função do f_h e a/b para $D_a = 1,00$ minutos.

f_h	log a/b									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0,60	0,73	0,84	0,93	1,00	1,06	1,13	1,18	1,24	1,29
15	0,46	0,59	0,69	0,77	0,85	0,90	0,96	1,03	1,06	1,13
20	0,36	0,48	0,58	0,66	0,73	0,79	0,86	0,91	0,96	1,00
25	0,30	0,41	0,50	0,58	0,64	0,70	0,79	0,81	0,86	0,90
30	0,26	0,35	0,43	0,51	0,57	0,62	0,69	0,73	0,78	0,82
35	0,23	0,31	0,39	0,54	0,51	0,56	0,63	0,68	0,72	0,69
40	0,20	0,27	0,35	0,41	0,47	0,51	0,57	0,62	0,66	0,69
50	0,165	0,228	0,290	0,345	0,396	0,440	0,490	0,535	0,575	0,600
60	0,141	0,196	0,250	0,300	0,347	0,390	0,435	0,475	0,510	0,527
70	0,123	0,172	0,222	0,266	0,312	0,352	0,392	0,428	0,462	0,487
80	0,111	0,154	0,200	0,242	0,282	0,312	0,360	0,392	0,424	0,446
90	0,099	0,139	0,182	0,222	0,262	0,296	0,333	0,362	0,392	0,415
100	0,091	0,128	0,168	0,202	0,242	0,275	0,310	0,347	0,368	0,390
150	0,059	0,085	0,112	0,138	0,166	0,190	0,215	0,236	0,260	0,275
200	0,043	0,064	0,085	0,106	0,128	0,147	0,166	0,183	0,203	0,215
250	0,034	0,051	0,068	0,086	0,104	0,120	0,136	0,152	0,168	0,178
300	0,028	0,043	0,057	0,072	0,088	0,102	0,115	0,128	0,141	0,152
350	0,024	0,037	0,049	0,063	0,077	0,088	0,100	0,112	0,125	0,134
400	0,021	0,032	0,043	0,055	0,068	0,078	0,089	0,100	0,110	0,118
500	0,016	0,026	0,034	0,045	0,055	0,064	0,073	0,082	0,092	0,098
600	0,013	0,021	0,029	0,038	0,047	0,054	0,062	0,070	0,079	0,084
700	0,011	0,018	0,025	0,033	0,041	0,047	0,054	0,062	0,069	0,074
800	0,010	0,016	0,022	0,029	0,036	0,042	0,048	0,055	0,062	0,066
900	-	0,014	0,020	0,026	0,033	0,037	0,043	0,050	0,056	0,060
1000	-	0,013	0,018	0,024	0,030	0,034	0,039	0,045	0,051	0,054

Tabela 2: Valores de R em função de f_h e a/b para $D_a = 2,00$ minutos.

f_h	$\log a/b$									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0,41	0,49	0,56	0,62	0,67	0,71	0,74	0,76	0,78	0,79
15	0,34	0,41	0,47	0,53	0,57	0,60	0,64	0,66	0,68	0,70
20	0,29	0,35	0,41	0,46	0,50	0,53	0,55	0,59	0,61	0,63
25	0,25	0,31	0,37	0,41	0,45	0,48	0,52	0,54	0,56	0,58
30	0,23	0,28	0,33	0,37	0,41	0,44	0,47	0,50	0,52	0,54
35	0,20	0,26	0,30	0,34	0,38	0,41	0,44	0,46	0,49	0,51
40	0,18	0,23	0,28	0,32	0,35	0,38	0,41	0,44	0,46	0,48
50	0,150	0,200	0,240	0,275	0,308	0,336	0,365	0,390	0,413	0,430
60	0,129	0,174	0,213	0,246	0,276	0,305	0,331	0,355	0,376	0,392
70	0,114	0,156	0,192	0,224	0,253	0,278	0,304	0,328	0,347	0,362
80	0,102	0,142	0,174	0,206	0,234	0,260	0,283	0,307	0,325	0,337
90	0,093	0,130	0,162	0,193	0,218	0,244	0,266	0,288	0,305	0,318
100	0,085	0,120	0,150	0,180	0,206	0,230	0,250	0,272	0,290	0,302
150	0,056	0,080	0,100	0,125	0,145	0,162	0,180	0,198	0,213	0,226
200	0,041	0,060	0,076	0,097	0,112	0,127	0,142	0,159	0,173	0,183
250	0,033	0,048	0,061	0,079	0,092	0,105	0,118	0,135	0,147	0,155
300	0,027	0,040	0,051	0,067	0,079	0,090	0,102	0,117	0,0126	0,137
350	0,023	0,034	0,044	0,058	0,068	0,079	0,090	0,104	0,115	0,122
400	0,020	0,030	0,039	0,052	0,061	0,070	0,081	0,094	0,104	0,111
500	0,016	0,024	0,031	0,042	0,050	0,058	0,067	0,079	0,089	0,094
600	0,013	0,020	0,026	0,036	0,043	0,050	0,058	0,069	0,079	0,082
700	0,011	0,017	0,022	0,031	0,037	0,044	0,051	0,061	0,069	0,074
800	0,010	0,015	0,020	0,028	0,033	0,039	0,046	0,054	0,063	0,067
900	-	0,013	0,018	0,025	0,030	0,035	0,042	0,051	0,058	0,061
1000	-	0,012	0,016	0,023	0,027	0,032	0,038	0,040	0,043	0,047

Tabela 2: Valores de R em função do f_h e a/b para $D_a = 3,00$ minutos.

f_h	log a/b									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0,325	0,410	0,450	0,510	0,530	0,535	0,540	0,545	0,550	0,560
15	0,272	0,340	0,382	0,426	0,450	0,465	0,478	0,490	0,500	0,512
20	0,235	0,295	0,335	0,375	0,405	0,420	0,435	0,450	0,465	0,475
25	0,210	0,264	0,302	0,338	0,368	0,382	0,400	0,416	0,433	0,446
30	0,188	0,240	0,275	0,310	0,338	0,345	0,373	0,392	0,410	0,422
35	0,173	0,220	0,254	0,285	0,315	0,332	0,350	0,372	0,390	0,405
40	0,160	0,202	0,237	0,265	0,295	0,312	0,332	0,354	0,370	0,385
50	0,139	0,178	0,210	0,236	0,264	0,282	0,302	0,325	0,342	0,358
60	0,123	0,160	0,189	0,213	0,241	0,258	0,279	0,302	0,318	0,334
70	0,112	0,144	0,172	0,195	0,221	0,229	0,260	0,282	0,298	0,313
80	0,100	0,132	0,158	0,180	0,205	0,223	0,243	0,265	0,282	0,296
90	0,091	0,121	0,146	0,167	0,192	0,208	0,228	0,230	0,266	0,280
100	0,083	0,111	0,125	0,156	0,180	0,196	0,216	0,236	0,252	0,266
150	0,053	0,076	0,097	0,126	0,137	0,152	0,178	0,185	0,199	0,206
200	0,043	0,058	0,075	0,091	0,108	0,122	0,136	0,148	0,162	0,173
250	0,035	0,047	0,062	0,074	0,089	0,102	0,113	0,124	0,135	0,145
300	0,029	0,040	0,052	0,063	0,077	0,087	0,097	0,107	0,117	0,125
350	0,025	0,034	0,045	0,055	0,067	0,077	0,085	0,094	0,103	0,112
400	0,022	0,030	0,040	0,049	0,060	0,069	0,076	0,084	0,093	0,100
500	0,018	0,025	0,033	0,040	0,049	0,057	0,063	0,070	0,088	0,094
600	0,015	0,021	0,028	0,034	0,042	0,049	0,054	0,060	0,067	0,073
700	0,013	0,018	0,024	0,030	0,037	0,043	0,048	0,053	0,059	0,065
800	0,011	0,016	0,021	0,026	0,033	0,038	0,043	0,048	0,054	0,058
900	0,010	0,014	0,019	0,024	0,030	0,035	0,039	0,043	0,049	0,053
1000	-	0,013	0,018	0,022	0,027	0,032	0,036	0,040	0,045	0,049

Tabela 2: Valores de R em função do f_h e a/b para $D_a = 4,00$ minutos.

f_h	log a/b									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0,300	0,345	0,385	0,385	0,385	0,385	0,385	0,395	0,400	0,405
15	0,248	0,292	0,328	0,336	0,345	0,355	0,363	0,373	0,380	0,387
20	0,217	0,256	0,290	0,305	0,318	0,332	0,343	0,354	0,362	0,372
25	0,193	0,230	0,264	0,282	0,297	0,314	0,326	0,338	0,346	0,358
30	0,175	0,210	0,243	0,262	0,280	0,298	0,312	0,323	0,333	0,345
35	0,160	0,194	0,225	0,245	0,264	0,284	0,298	0,310	0,320	0,332
40	0,147	0,180	0,211	0,232	0,252	0,272	0,288	0,300	0,309	0,322
50	0,129	0,158	0,187	0,208	0,230	0,250	0,266	0,278	0,289	0,302
60	0,115	0,142	0,169	0,190	0,210	0,230	0,246	0,258	0,270	0,284
70	0,108	0,128	0,155	0,175	0,194	0,213	0,229	0,242	0,254	0,267
80	0,094	0,117	0,142	0,162	0,179	0,198	0,214	0,226	0,238	0,252
90	0,085	0,108	0,132	0,149	0,167	0,184	0,199	0,212	0,223	0,236
100	0,078	0,100	0,123	0,138	0,155	0,171	0,186	0,198	0,210	0,222
150	0,053	0,071	0,089	0,104	0,116	0,130	0,142	0,154	0,164	0,175
200	0,040	0,056	0,071	0,085	0,095	0,106	0,117	0,128	0,137	0,147
250	0,032	0,046	0,059	0,072	0,081	0,092	0,101	0,112	0,119	0,129
300	0,027	0,039	0,051	0,063	0,071	0,081	0,090	0,099	0,107	0,115
350	0,023	0,034	0,045	0,057	0,064	0,073	0,081	0,090	0,097	0,105
400	0,020	0,030	0,041	0,052	0,058	0,067	0,074	0,083	0,089	0,097
500	0,016	0,025	0,034	0,044	0,050	0,057	0,064	0,072	0,078	0,085
600	0,013	0,021	0,029	0,038	0,044	0,050	0,057	0,061	0,070	0,076
700	0,012	0,019	0,026	0,034	0,039	0,045	0,052	0,058	0,063	0,069
800	0,010	0,017	0,023	0,031	0,036	0,041	0,047	0,053	0,058	0,064
900	-	0,015	0,021	0,029	0,032	0,038	0,044	0,049	0,054	0,060
1000	-	0,014	0,019	0,027	0,030	0,035	0,041	0,046	0,051	0,056

Tabela 2: Valores de R em função do f_h e a/b para $D_a = 5,00$ minutos.

f_h	log a/b									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0,237	0,265	0,292	0,310	0,325	0,350	0,368	0,375	0,385	0,395
15	0,202	0,235	0,260	0,276	0,295	0,318	0,333	0,348	0,357	0,370
20	0,180	0,213	0,238	0,254	0,274	0,295	0,308	0,321	0,334	0,345
25	0,164	0,196	0,222	0,237	0,256	0,276	0,288	0,302	0,313	0,326
30	0,152	0,182	0,207	0,223	0,242	0,260	0,272	0,285	0,296	0,309
35	0,142	0,172	0,195	0,210	0,229	0,247	0,259	0,262	0,283	0,295
40	0,134	0,162	0,185	0,200	0,218	0,236	0,247	0,256	0,262	0,283
50	0,119	0,146	0,168	0,184	0,200	0,217	0,223	0,240	0,252	0,263
60	0,107	0,135	0,155	0,170	0,186	0,202	0,213	0,224	0,236	0,247
70	0,097	0,124	0,144	0,158	0,164	0,189	0,199	0,212	0,222	0,233
80	0,089	0,115	0,134	0,149	0,163	0,178	0,188	0,199	0,211	0,222
90	0,082	0,107	0,126	0,140	0,154	0,169	0,179	0,190	0,201	0,212
100	0,076	0,099	0,119	0,132	0,146	0,160	0,170	0,181	0,192	0,202
150	0,051	0,072	0,091	0,104	0,116	0,127	0,138	0,149	0,159	0,169
200	0,039	0,055	0,072	0,084	0,095	0,104	0,115	0,125	0,136	0,146
250	0,031	0,045	0,058	0,069	0,079	0,087	0,097	0,107	0,118	0,126
300	0,026	0,038	0,050	0,059	0,068	0,076	0,084	0,093	0,101	0,111
350	0,023	0,033	0,044	0,052	0,060	0,067	0,075	0,083	0,092	0,099
400	0,020	0,029	0,039	0,047	0,054	0,061	0,068	0,076	0,084	0,091
500	0,016	0,023	0,032	0,039	0,045	0,051	0,057	0,064	0,071	0,087
600	0,013	0,020	0,028	0,033	0,039	0,044	0,050	0,056	0,062	0,067
700	0,012	0,017	0,024	0,029	0,035	0,039	0,044	0,050	0,056	0,060
800	0,010	0,015	0,022	0,026	0,031	0,036	0,040	0,045	0,050	0,055
900	-	0,013	0,020	0,024	0,028	0,033	0,037	0,041	0,046	0,051
1000	-	0,012	0,018	0,022	0,026	0,030	0,034	0,039	0,043	0,046

Tabela 2: Valores de R em função do f_h e a/b para $D_x = 6,00$ minutos.

f_h	$\log a/b$									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0,214	0,255	0,265	0,266	-	-	-	-	-	-
15	0,184	0,221	0,235	0,245	-	-	-	-	-	-
20	0,163	0,196	0,213	0,228	0,240	0,252	0,268	0,278	0,286	0,286
25	0,147	0,180	0,199	0,218	0,229	0,242	0,257	0,271	0,280	0,280
30	0,135	0,167	0,187	0,208	0,220	0,232	0,246	0,266	0,270	0,270
35	0,125	0,156	0,177	0,199	0,212	0,222	0,236	0,252	0,262	0,263
40	0,117	0,147	0,168	0,190	0,203	0,213	0,227	0,240	0,252	0,254
50	0,104	0,132	0,152	0,175	0,188	0,197	0,208	0,221	0,236	0,240
60	0,094	0,120	0,142	0,162	0,176	0,184	0,194	0,206	0,220	0,226
70	0,086	0,111	0,132	0,152	0,164	0,174	0,181	0,193	0,206	0,214
80	0,080	0,103	0,124	0,141	0,153	0,163	0,170	0,182	0,195	0,202
90	0,074	0,096	0,116	0,132	0,144	0,153	0,161	0,172	0,185	0,193
100	0,069	0,090	0,108	0,124	0,136	0,145	0,153	0,164	0,175	0,184
150	0,052	0,069	0,084	0,097	0,107	0,116	0,123	0,134	0,143	0,151
200	0,040	0,055	0,068	0,080	0,090	0,097	0,104	0,115	0,122	0,130
250	0,032	0,045	0,056	0,067	0,077	0,084	0,091	0,100	0,108	0,114
300	0,027	0,038	0,048	0,058	0,068	0,075	0,081	0,089	0,097	0,102
350	0,024	0,033	0,042	0,051	0,060	0,067	0,074	0,081	0,088	0,093
400	0,021	0,029	0,038	0,046	0,054	0,061	0,068	0,074	0,081	0,086
500	0,017	0,024	0,031	0,039	0,046	0,052	0,059	0,065	0,070	0,075
600	0,014	0,020	0,027	0,033	0,040	0,046	0,052	0,058	0,063	0,067
700	0,012	0,018	0,024	0,030	0,036	0,041	0,048	0,053	0,058	0,061
800	0,010	0,015	0,021	0,027	0,033	0,038	0,044	0,049	0,053	0,056
900	-	0,014	0,019	0,024	0,030	0,035	0,040	0,045	0,049	0,053
1000	-	0,013	0,017	0,022	0,028	0,032	0,038	0,042	0,046	0,049

Tabela 2: Valores de R em função do f_h e a/b para $D_p = 7,00$ minutos.

f_h	log a/b									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0,200	0,230	0,267	-	-	-	-	-	-	-
15	0,171	0,201	0,234	-	-	-	-	-	-	-
20	0,153	0,180	0,212	0,218	0,227	0,232	0,250	0,262	0,268	0,268
25	0,139	0,165	0,194	0,202	0,208	0,218	0,234	0,247	0,252	0,255
30	0,129	0,153	0,180	0,190	0,197	0,206	0,222	0,235	0,240	0,243
35	0,120	0,143	0,169	0,180	0,188	0,197	0,212	0,223	0,228	0,232
40	0,113	0,135	0,160	0,171	0,179	0,189	0,203	0,214	0,219	0,223
50	0,101	0,122	0,145	0,156	0,165	0,175	0,188	0,198	0,204	0,208
60	0,092	0,111	0,133	0,144	0,154	0,164	0,176	0,185	0,191	0,196
70	0,084	0,103	0,123	0,135	0,144	0,154	0,165	0,175	0,181	0,186
80	0,078	0,096	0,115	0,126	0,136	0,146	0,156	0,166	0,172	0,176
90	0,073	0,090	0,108	0,120	0,129	0,139	0,149	0,157	0,165	0,168
100	0,068	0,085	0,101	0,114	0,123	0,132	0,142	0,151	0,157	0,161
150	0,051	0,066	0,079	0,091	0,100	0,108	0,117	0,125	0,131	0,135
200	0,039	0,053	0,065	0,075	0,084	0,092	0,100	0,107	0,113	0,117
250	0,031	0,044	0,054	0,064	0,071	0,078	0,087	0,093	0,098	0,103
300	0,026	0,038	0,046	0,055	0,062	0,069	0,077	0,083	0,089	0,093
350	0,022	0,033	0,041	0,049	0,055	0,062	0,069	0,076	0,081	0,085
400	0,020	0,030	0,037	0,044	0,050	0,056	0,064	0,070	0,074	0,078
500	0,016	0,024	0,031	0,037	0,042	0,048	0,055	0,061	0,065	0,069
600	0,013	0,021	0,026	0,032	0,036	0,042	0,049	0,054	0,059	0,062
700	0,012	0,018	0,023	0,028	0,032	0,038	0,044	0,049	0,053	0,057
800	0,010	0,016	0,021	0,026	0,029	0,034	0,041	0,046	0,049	0,053
900	-	0,015	0,019	0,023	0,026	0,032	0,038	0,042	0,046	0,049
1000	-	0,013	0,017	0,021	0,024	0,029	0,035	0,039	0,043	0,046

Tabela 2: Valores de R em função de f_h e a/b para $D_a = 8,00$ minutos.

f_h	log a/b									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0,185	0,208	-	-	-	-	-	-	-	-
15	0,160	0,184	-	-	-	-	-	-	-	-
20	0,143	0,166	0,164	0,190	0,212	0,218	0,225	0,228	0,230	0,235
25	0,130	0,153	0,170	0,164	0,198	0,205	0,211	0,215	0,218	0,224
30	0,120	0,142	0,159	0,173	0,188	0,195	0,201	0,205	0,208	0,215
35	0,112	0,133	0,150	0,164	0,177	0,185	0,192	0,197	0,200	0,207
40	0,105	0,126	0,143	0,155	0,169	0,178	0,185	0,190	0,193	0,200
50	0,094	0,114	0,130	0,143	0,156	0,165	0,173	0,177	0,181	0,189
60	0,086	0,104	0,120	0,132	0,144	0,154	0,162	0,167	0,171	0,179
70	0,079	0,097	0,112	0,124	0,135	0,145	0,153	0,158	0,162	0,171
80	0,074	0,090	0,105	0,116	0,127	0,137	0,145	0,151	0,155	0,164
90	0,069	0,085	0,099	0,110	0,121	0,131	0,139	0,144	0,148	0,157
100	0,065	0,080	0,094	0,105	0,115	0,124	0,133	0,138	0,144	0,151
150	0,049	0,063	0,075	0,085	0,093	0,101	0,110	0,116	0,120	0,128
200	0,039	0,051	0,063	0,072	0,079	0,087	0,096	0,100	0,104	0,110
250	0,031	0,043	0,053	0,061	0,068	0,076	0,083	0,088	0,092	0,097
300	0,026	0,036	0,046	0,053	0,060	0,067	0,074	0,079	0,083	0,087
350	0,023	0,032	0,041	0,048	0,054	0,061	0,077	0,082	0,086	0,090
400	0,020	0,028	0,037	0,044	0,049	0,056	0,062	0,067	0,070	0,084
500	0,016	0,024	0,031	0,037	0,042	0,049	0,054	0,058	0,062	0,065
600	0,014	0,020	0,027	0,032	0,038	0,043	0,048	0,052	0,056	0,059
700	0,012	0,018	0,024	0,028	0,034	0,039	0,044	0,047	0,051	0,054
800	0,010	0,016	0,022	0,026	0,032	0,036	0,040	0,044	0,047	0,050
900	-	0,014	0,020	0,024	0,028	0,033	0,037	0,041	0,044	0,047
1000	-	0,013	0,018	0,022	0,026	0,031	0,035	0,038	0,041	0,044

Tabela 2: Valores de R em função de f_h e a/b para $D_\alpha = 10,00$ minutos.

f_h	log a/b									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0,150	0,166	0,181	-	-	-	-	-	-	-
15	0,133	0,150	0,165	-	-	-	-	-	-	-
20	0,121	0,137	0,153	0,167	0,172	0,177	0,182	0,185	0,186	0,186
25	0,112	0,127	0,144	0,157	0,162	0,167	0,172	0,176	0,177	0,180
30	0,105	0,120	0,136	0,149	0,154	0,159	0,165	0,170	0,172	0,175
35	0,099	0,114	0,129	0,142	0,148	0,152	0,159	0,164	0,167	0,170
40	0,093	0,108	0,124	0,135	0,142	0,146	0,153	0,158	0,162	0,165
50	0,085	0,099	0,114	0,125	0,132	0,137	0,144	0,150	0,154	0,170
60	0,078	0,092	0,106	0,116	0,125	0,129	0,136	0,142	0,147	0,150
70	0,073	0,084	0,100	0,110	0,116	0,122	0,129	0,135	0,141	0,144
80	0,068	0,080	0,095	0,104	0,110	0,116	0,124	0,130	0,135	0,139
90	0,064	0,074	0,090	0,099	0,105	0,112	0,118	0,124	0,130	0,134
100	0,061	0,072	0,086	0,095	0,100	0,107	0,114	0,120	0,126	0,130
150	0,047	0,058	0,070	0,078	0,084	0,091	0,097	0,102	0,108	0,112
200	0,037	0,048	0,059	0,066	0,073	0,079	0,084	0,089	0,094	0,098
250	0,031	0,041	0,049	0,057	0,064	0,070	0,075	0,079	0,083	0,087
300	0,026	0,035	0,043	0,050	0,056	0,063	0,067	0,071	0,075	0,079
350	0,023	0,031	0,039	0,045	0,052	0,057	0,061	0,065	0,069	0,073
400	0,020	0,028	0,035	0,042	0,048	0,052	0,057	0,060	0,064	0,068
500	0,017	0,023	0,029	0,036	0,042	0,046	0,049	0,053	0,057	0,060
600	0,014	0,020	0,025	0,032	0,037	0,041	0,044	0,048	0,052	0,054
700	0,012	0,018	0,023	0,028	0,034	0,037	0,041	0,044	0,047	0,050
800	0,011	0,016	0,020	0,026	0,031	0,034	0,038	0,041	0,044	0,046
900	0,010	0,015	0,019	0,024	0,029	0,032	0,035	0,038	0,041	0,044
1000	-	0,013	0,017	0,022	0,027	0,030	0,033	0,036	0,039	0,041

EXEMPLO DA APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Deseja-se saber o tempo necessário para esterilizar a lata de feijoadade de um quilo (99,5 x 118 mm) considerando as seguintes condições de processamento:

Valor de esterilização média da massa (F_s) = 5,00 min.

Temperatura inicial do produto (T_o) = 65,6°C.

Temperatura de operação da autoclave (T_a) = 121,1°C.

Temperatura da água de esfriamento (T_w) = 21,1°C.

Tempo de ascensão da autoclave (t_l) = 0 minutos.

Índice de declive da curva de aquecimento (f_h) = 70,0 min.

Desvio do f_h = $\pm 1,85$

Coefficiente de intersecção da curva de aquecimento

$$(j_h) = 1,85.$$

Coefficiente de intersecção da curva de esfriamento

$$(j_e) = 1,60.$$

D_r = 1,00 minutos.

z = 10°C.

a. Cálculo do F_p .

Pelo método de Stumbo (1965), ou por outro método apropriado, calcula-se o valor de esterilização no ponto crítico, baseando-se no valor de esterilização média da massa (F_s). Nas condições do exercício aqui apresentado, o valor de F_p é de 3,482 minutos.

b. Cálculo da relação a/b.

A relação entre o número inicial e o número final de bactérias admissível é calculada aplicando-se a fórmula da destruição térmica de bactérias (equação 1).

$$F_p = F = D_r \log a/b$$

Sendo: $F_p = 3,482$ min.; $D_p = 1,00$ min.; e $b = 1$, tem-se:

$$3,482 = 1,00 \log a$$

Ou, seja,

$$a = 3,03 \times 10^3$$

c. *Cálculo do número de bactérias sobreviventes corrigido (b').*

É feito aplicando-se a fórmula XXV seguinte:

$$\log b' = 1,172 \times R^2 \times s^2$$

Onde: $s = 1,85$

R é obtida na tabela 2, correspondente a $D_a = 1,00$ minutos, $f_h = 70,0$ min., e $a/b = 3,03 \times 10^3$.
Obtem-se, assim, $R = 0,123$.

Tem-se:

$$\log b' = 1,172 (0,123)^2 \times (1,85)^2$$

$$b' = 1,15.$$

O resultado indica que vamos ter 1,15 bactérias vivas em vez de 1,00, como havíamos previstos.

d. *Cálculo do valor F_p corrigido.*

É calculado aplicando-se a equação 1, assumindo os valores de $a = 3,03 \times 10^3$ e $b = 1/1,15$.

$$F_p = 1,00 \log \frac{3,03 \times 10^3}{1/1,15}$$

$$F_p = 3.690 \text{ minutos.}$$

e. *Cálculo do valor t_b .*

Esse valor é obtido pelo método de Stumbo (1965), seguinte:

$$t_b = f_h (\log j_h I_0 - \log I_g)$$

Tem-se os seguintes valores: $f_h = 70,0$ min.; $j_h = 1,85$; $j_c = 1,60$ e $I_0 = 55,6^\circ\text{C}$ (100°F).

I_g é obtido da tabela de Stumbo (1965), considerando $z = 10^\circ\text{C}$ (18°F); $f_h/U = 70,0/3,690 = 19,0$ e $j_c = 1,60$. Tem-se, assim, $I_g = 14,0$.

Aplicando a fórmula acima,

$$t_b = 70,0 \{ \log(1,85 \times 100) - \log 14,0 \}$$

$$t_b = \underline{78,4 \text{ minutos}}$$

Não assumindo a correção para o desvio, tem-se: $f_h/U = 70,0/3,482 = 20,5$. E, tem-se, pela tabela de Stumbo (1965), o valor de $I_g = 14,5$.

Aplicando-se na fórmula, tem-se:

$$t_b = 70,0 (\log(1,85 \times 100) - \log 14,5)$$

$$t_b = \underline{77,4 \text{ minutos.}}$$

Este valor é cerca de 1,5% menor que o valor obtido considerando o desvio.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados do cálculo do tempo necessário para se obter F_g (esterilização média da massa) igual a 5,0 minutos, estão apresentados no quadro 7. Para o preparo desse quadro foi utilizado o método de Stumbo (1965), assumindo os seguintes parâmetros: $D_r = 1,00$ minutos; $z = 109^\circ\text{C}$; $T_0 = 65,69^\circ\text{C}$; $T_a = 121,19^\circ\text{C}$; $f_h = f_o$. O valor de F_p calculado nessas condições foi de 3,482 minutos. Os valores de j_h e j_o utilizados foram aqueles correspondentes a f_h selecionado para os cálculos.

Como pode ser visto no quadro 7, os tempos de processamento calculados variaram de cerca de 10%, dependendo do lote experimental considerado, tanto para as latas com bentonita, como para purê de ervilha. Essa variação é bastante grande, podendo, no ensaio com apenas um lote experimental, obter resultados que não venham prever adequadamente a esterilização comercial. A principal razão dessa variação é devida a diferença dos parâmetros experimentais obtidos em diferentes lotes. A influência da variação do comportamento da curva de penetração de calor das diferentes latas dentro de um mesmo lote experimental é bem menor (2 a 12 vezes), como mostra as análises de variância apresentadas nos quadros 2 e 5 (comparar os valores de F para "Latas" e "Lotes").

A recomendação feita por National Canners Association (NCA, 1968) para os produtos homogêneos, empregando de 6 a 8 recipientes (latas ou vidros) na obtenção do valor de f_h mais elevado dentro de um lote experimental parece não ser suficiente para prever a curva de penetração de calor nos lotes comerciais, e por conseguinte, a esterilização adequada do produto. É mais lógico dividir em pequenos lotes de 2 a 5 recipientes e repetir 4 a 6 vezes o ensaio para se ter um resultado mais representativo das variações experimentais no processo de esterilização por calor. Esse fato está bem ilustrado no quadro 8, onde mostram

os valores de t_b (tempo de esterilização) calculados, considerando o valor mais elevado de f_h obtidos nos lotes experimentais (quadro 1 e 4) de bentonita 10% e de purê de ervilha, dividindo-se em sub-lotes com 2, 5 e 10 latas e 3, 5 e 15 latas, respectivamente, e considerando todas as repetições. Nestas condições, a diferença entre o maior valor de t_b obtido foi inferior a 5% para o ensaio com bentonita e inferior a 2% para o ensaio com purê de ervilha, mostrando que o resultado pode ser mais representativo dos lotes comerciais a serem processados nas condições similares. Desta forma, utilizando-se um lote de número limitado de recipiente (10 a 20), pode-se obter o valor de tempo de esterilização bastante satisfatória, se esses forem divididos em pequenos sub-lotes de 2 a 3 recipientes e repetir as determinações por 4 a 6 vezes.

A técnica de usar valores dos parâmetros do recipiente com maior índice de declive (f_h) é bastante simples e prático. Entretanto, um resultado estatisticamente mais refinado poderia ser obtido se o valor de tempo de esterilização (t_b) for baseado em média e desvio dos parâmetros experimentais da curva de penetração de calor. Os quadros 9 e 10 mostram as médias e os erros de cada lote dos ensaios conduzidos com a bentonita e com purê de ervilha.

A variação dos valores médios dos parâmetros obtidos nos diferentes lotes não foram maiores que 5%, comparados com a média geral, porém os desvios calculados nos lotes individuais foram de até 50% inferiores ao erro padrão geral. Assim, o resultado obtido baseando-se na média e desvio de um único lote pode resultar no valor de F inferior a aquele necessário. Dessa forma mais uma vez, vem mostrar que o uso dos valores de parâmetros de penetração de calor obtido em um único ensaio não é adequado.

Os resultados bem mais uniformes (tanto dos valores médios como dos desvios) foram obtidos se os lotes forem subdivididos como mostra os quadros 11 e 12. Em sub-lotes de 2 ou 3 recipientes e com 4 ou 6 repetições, a diferença dos valores médios dos parâmetros foi inferior a 2% da média geral e dos desvios de 20%.

Aplicando-se o método descrito no presente trabalho, cal-

culou-se o tempo de esterilização (t_b) e 121,1°C para obter o valor de F_s de 5,00 minutos. A diferença entre a média geral de t_b e o menor ou maior valor de t_b obtido em qualquer sub-lote de dois recipientes não foi superior a 1%, mostrando que o método é bastante consistente (cerca de 2 a 3 vezes mais consistente que o método empregando o valor mais elevado de f_h). Todos os valores de t_b obtidos por esse método eram aproximadamente 2% menores que aqueles obtidos empregando o valor mais elevado de f_h (quadro 13).

Quadro 7: Tempo de esterilização necessário (t_b) a 121,1°C considerando o maior valor de índice de declive da curva de aquecimento (f_h) de cada lote, calculado pelo método de Stumbo (1965) (*).

a. Ensaios com suspensão de bentonita, 10%.

Lote Número	f_h (min.)	j_h	j_c	t_b (min.)
1	40,4	1,47	1,90	43,8
2	41,8	1,67	1,85	47,9
3	42,0	1,73	1,97	47,6
4	41,7	1,60	1,89	46,4

b. Ensaios com purê de ervilha.

Lote Número	f_h (min.)	j_h	j_c	t_b (min.)
1	45,4	1,68	1,42	53,6
2	48,0	1,63	1,64	54,1
3	46,8	1,63	1,61	53,1
4	47,1	1,49	1,54	51,1
5	47,1	1,68	1,46	54,6
6	46,8	1,55	1,24	57,0

(*) Outros parâmetros considerados nos cálculos acima: $z = 10^\circ\text{C}$, $D_r = 1,00$ min., $T_0 = 65,6^\circ\text{C}$, $T_w = 21,1^\circ\text{C}$, $f_h = f_c$, $F_s = 5,00$ min. ($F_c = 3,482$ min.).

Quadro 8: Tempo de esterilização necessário (t_b) a 121,19°C considerando o maior valor do índice de declive da curva de aquecimento (f_h) de sub-lotes, calculado pelo método de Stumbo (1965) (*).

a. Ensaios com suspensão de bentonita, 10%.

Sub-lotes de	f_h (min.)	j_h	j_c	t_b (min.)
2 latas - a	41,3	1,77	1,80	48,6
2 latas - b	41,6	1,60	1,89	46,4
2 latas - c	42,0	1,73	1,97	47,6
2 latas - d	41,7	1,67	1,85	47,9
2 latas - e	41,6	1,77	1,93	48,4
5 latas - a	41,6	1,60	1,89	46,4
5 latas - b	42,0	1,73	1,97	47,6
10 latas	42,0	1,73	1,97	47,6

b. Ensaios com purê de ervilha.

Sub-lotes de	f_h (min.)	j_h	j_c	t_b (min.)
3 latas - a	48,0	1,63	1,64	54,1
3 latas - b	47,9	1,66	1,56	54,4
3 latas - c	47,2	1,70	1,58	54,4
3 latas - d	47,4	1,69	1,54	55,0
3 latas - e	47,8	1,64	1,65	54,2
5 latas - a	48,0	1,63	1,64	54,1
5 latas - b	47,9	1,66	1,56	54,4
5 latas - c	47,8	1,64	1,65	54,2
15 latas	48,0	1,63	1,64	54,1

(*) Outros parâmetros considerados nos cálculos acima: $z = 109^\circ\text{C}$

$D_p = 1,00$ min., $T_0 = 65,69^\circ\text{C}$, $T_w = 21,19^\circ\text{C}$, $f_h = f_c$, $F_s = 5,00$ min. ($F_e = 3,482$ min.).

Quadro 9: Média e desvio dos parâmetros da curva de penetração de calor nas latas com suspensão de bentonita 10%.

a. Índice de declive.

Lotes	Aquecimento (f_h)		Esfriamento (f_c)	
	Média	Desvio	Média	Desvio
I	39,4	0,606	47,4	1,43
II	40,8	0,575	48,4	1,54
III	41,2	0,436	46,4	1,09
IV	41,1	0,571	47,1	1,18
Total	40,6	0,905	47,3	1,47

b. Coeficiente de intersecção.

Lotes	Aquecimento (j_h)		Esfriamento (j_c)	
	Média	Desvio	Média	Desvio
I	1,52	0,0323	1,86	0,122
II	1,75	0,0597	1,84	0,136
III	1,78	0,0324	1,94	0,100
IV	1,67	0,0579	1,96	0,120
Total	1,68	0,111	1,90	0,27

Quadro 10: Média e desvio dos parâmetros da curva de penetração de calor nas latas de purê de ervilha.

a. Índice de declive.

Lotes	Aquecimento (f_h)		Esfriamento (f_c)	
	Média	Desvio	Média	Desvio
I	44,2	0,709	55,3	0,924
II	47,1	0,580	55,8	1,04
III	45,5	0,680	55,4	0,519
IV	46,2	0,532	56,0	2,06
V	45,6	0,911	57,0	1,57
VI	45,8	0,601	51,9	2,10
Total	45,8	1,09	55,2	2,16

b. Coeficiente de intersecção.

Lotes	Aquecimento (j_h)		Esfriamento (j_c)	
	Média	Desvio	Média	Desvio
I	1,74	0,0376	1,42	0,0213
II	1,69	0,0388	1,57	0,0492
III	1,69	0,0313	1,61	0,0242
IV	1,57	0,0487	1,52	0,103
V	1,73	0,0776	1,43	0,0903
VI	1,66	0,0995	1,62	0,121
Total	1,68	0,0810	1,53	0,112

Quadro 11 Média e desvio dos parâmetros da curva de penetração de calor nas latas com suspensão de bentonita 10%.

a. Índice de declive

Sub-lotes de	Aquecimento (f_h)		Esfriamento (f_c)	
	Média	Desvio	Média	Desvio
1 lata - a	40,5	0,805	48,5	0,555
1 lata - b	40,4	0,860	46,5	1,18
1 lata - c	40,6	1,02	47,6	1,68
1 lata - d	40,6	1,27	46,4	1,35
1 lata - e	40,6	0,785	46,7	2,09
1 lata - f	41,0	1,06	47,0	1,67
1 lata - g	40,1	0,887	47,1	1,37
1 lata - h	41,3	0,613	47,1	1,14
1 lata - i	41,0	0,667	47,3	0,863
1 lata - j	40,2	1,27	48,9	1,27
2 latas - a	40,4	0,773	47,6	1,44
2 latas - b	40,5	1,06	47,0	1,55
2 latas - c	40,8	0,886	46,9	1,70
2 latas - d	40,7	0,945	47,1	1,17
2 latas - e	40,6	1,02	48,1	1,32
5 latas - a	40,5	0,865	47,2	1,57
5 latas - b	40,7	0,955	47,5	1,37
10 latas	40,6	0,905	47,3	1,47

(Continua)

Quadro 11: Continuação).

b. Coeficiente de intersecção.

Sub-lotes de	Aquecimento (j_h)		Esfriamento (j_c)	
	Média	Desvio	Média	Desvio
1 lata - a	1,67	0,104	1,81	0,0102
1 lata - b	1,72	0,142	1,99	0,118
1 lata - c	1,66	0,128	1,88	0,112
1 lata - d	1,67	0,0860	1,99	0,139
1 lata - e	1,70	0,115	1,96	0,205
1 lata - f	1,65	0,0992	1,91	0,0941
1 lata - g	1,72	0,150	1,92	0,136
1 lata - h	1,65	0,123	1,91	0,0511
1 lata - i	1,66	0,115	1,86	0,0711
1 lata - j	1,69	0,150	1,76	0,137
2 latas - a	1,70	0,118	1,90	0,126
2 latas - b	1,67	0,101	1,94	0,129
2 latas - c	1,67	0,104	1,93	0,150
2 latas - d	1,69	0,132	1,92	0,0950
2 latas - e	1,68	0,124	1,81	0,116
5 latas - a	1,69	0,106	1,93	0,138
5 latas - b	1,67	0,118	1,87	0,111
10 latas	1,68	0,111	1,90	0,127

Quadro 12: Média e desvio dos parâmetros da curva de penetração de calor nas latas com purê de ervilha.

a. Índice de declive

Sub-lotes de	Aquecimento (f_h)		Esfriamento (f_c)	
	Média	Desvio	Média	Desvio
1 lata - a	45,9	1,07	54,9	2,04
1 lata - b	46,0	1,51	55,1	2,75
1 lata - c	45,6	1,46	55,4	1,44
1 lata - d	45,5	1,13	55,6	1,92
1 lata - e	46,0	0,706	54,9	2,87
1 lata - f	45,4	1,45	56,7	4,12
1 lata - g	46,1	0,971	55,8	1,24
1 lata - h	45,9	0,818	54,7	2,03
1 lata - i	45,3	1,13	54,7	1,84
1 lata - j	45,8	1,17	55,5	0,935
1 lata - k	45,4	0,982	55,2	1,26
1 lata - l	46,0	0,945	55,6	2,84
1 lata - m	45,5	1,48	54,4	2,01
1 lata - n	45,6	1,12	55,6	2,60
1 lata - o	46,2	0,870	54,6	1,99
3 latas - a	45,8	1,29	55,1	2,02
3 latas - b	45,6	1,10	55,7	3,02
3 latas - c	45,8	0,990	55,0	1,72
3 latas - d	45,7	0,998	55,4	1,76
3 latas - e	45,8	1,15	54,8	2,15
5 latas - a	45,8	1,15	55,2	2,12
5 latas - b	45,7	1,09	55,5	2,29
5 latas - c	45,8	1,06	55,1	2,11
15 latas	45,8	1,09	55,2	2,16

(Continua)

Quadro 12:(Continuação).

b. Coeficiente de intersecção.

Sub-lotes de	Aquecimento (j_h)		Esfriamento (j_c)	
	Média	Desvio	Média	Desvio
1 lata - a	1,65	0,100	1,55	0,0964
1 lata - b	1,62	0,0906	1,56	0,0982
1 lata - c	1,68	0,0788	1,52	0,0777
1 lata - d	1,68	0,0689	1,52	0,103
1 lata - e	1,68	0,0685	1,55	0,134
1 lata - f	1,68	0,0652	1,46	0,194
1 lata - g	1,63	0,0708	1,46	0,121
1 lata - h	1,67	0,0474	1,56	0,0948
1 lata - i	1,70	0,0632	1,52	0,102
1 lata - j	1,70	0,0750	1,52	0,0773
1 lata - k	1,80	0,137	1,53	0,0708
1 lata - l	1,66	0,0627	1,49	0,148
1 lata - m	1,71	0,0915	1,57	0,109
1 lata - n	1,69	0,0923	1,52	0,145
1 lata - o	1,70	0,0602	1,58	0,102
3 latas - a	1,65	0,0878	1,54	0,0870
3 latas - b	1,68	0,0636	1,51	0,145
3 latas - c	1,66	0,0636	1,51	0,109
3 latas - d	1,71	0,0996	1,51	0,0993
3 latas - e	1,70	0,0780	1,56	0,116
5 latas - a	1,66	0,0798	1,54	0,0975
5 latas - b	1,68	0,0658	1,50	0,122
5 latas - c	1,70	0,0919	1,54	0,115
15 latas	1,68	0,0810	1,53	0,112

Quadro 13: Tempo de esterilização a 121,19°C necessário para obter F_s de 5,0 minutos (*), calculado pelo método proposto neste trabalho.

a. Suspensão de bentonita 10%.

Sub-lotes de	f_h (min.)		j_h	j_c	b'	t_b (min.)
	Médio	Desvio	Médio	Médio		
2 latas - a	40,4	0,773	1,70	1,90	1,09	46,5
2 latas - b	40,6	1,06	1,67	1,94	1,18	46,5
2 latas - c	40,8	0,886	1,67	1,93	1,12	46,7
2 latas - d	40,7	0,945	1,69	1,92	1,14	46,8
2 latas - e	40,6	1,02	1,68	1,81	1,16	46,1
5 latas - a	40,5	0,865	1,69	1,93	1,11	46,6
5 latas - b	40,7	0,955	1,67	1,87	1,14	46,6
10 latas	40,6	0,905	1,68	1,90	1,12	46,6

b. Purê de ervilha.

Sub-lotes de	f_h (min.)		j_h	j_c	b'	t_b (min.)
	Médio	Desvio	Médio	Médio		
3 latas - a	45,8	1,29	1,65	1,54	1,20	53,1
3 latas - b	45,6	1,10	1,68	1,51	1,14	53,5
3 latas - c	45,8	0,990	1,66	1,51	1,11	53,4
3 latas - d	45,7	0,998	1,71	1,51	1,11	54,0
3 latas - e	45,8	1,15	1,70	1,56	1,15	53,6
5 latas - a	45,8	1,15	1,66	1,54	1,15	53,2
5 latas - b	45,7	1,09	1,68	1,50	1,14	53,7
5 latas - c	45,8	1,06	1,70	1,54	1,13	53,6
15 latas	45,8	1,09	1,68	1,53	1,14	53,6

(*) Outros parâmetros considerados: $D_r = 1,00$ min.; $z = 10^\circ\text{C}$;
 $T_0 = 65,69^\circ\text{C}$; $T_w = 21,19^\circ\text{C}$; $F_s = 5,00$ min. ($F_p = 3,482$ min.);
 $a/b = 10^5$.

APÊNDICE I - SÍMBOLOS E DEFINIÇÕES.

a	Como definido no texto.
A	$(Pk/m)^2 + (2n - 1)^2 \pi^2$
A_{lmn}	Como definido no texto.
b	Como definido no texto. Geralmente empregado para designar o número final de bactérias viáveis após o tratamento térmico destinado a esterilização de alimentos.
b'	Número final de bactérias viáveis esperado, assumindo-se certo erro padrão na determinação de f_h e considerando $b = 1$.
B_b	Número de Fourier. $B_b = \alpha t_b / l^2$
B_c	Número de Fourier. $B_c = \alpha t_c / l^2$
B_h	Número de Fourier. $B_h = \alpha t_h / l^2$
C_b	Grupo adimensional definido como $C_b = (0,5 t_b / D_r) \cdot 10^{(T_r - 121,1)/z}$
d	Diferença absoluta para um dado valor de T_c entre a ordenada da curva e aquela da linha extrapolada. $d = \pm (I_d - I_c)$
d_0	Valor de d quando $t_c = 0$.
D	Tempo de redução decimal; é a recíproca do declive da curva de sobreviventes, também definido como sendo o tempo, em minutos, para destruir 90% de uma população de microrganismos.
D_a	Valor de D na temperatura de operação da autoclave.
D_r ou D_{250}	Valor de D a 121,1°C (250°F).
D_1	Valor de D correspondente a temperatura T_1 °C.
D_2	Valor de D correspondente a temperatura T_2 °C.
D_{150}	Valor de D a 65,6°C (150°F).
D_{212}	Valor de D a 100°C (212°F).

$E_i(x)$ Integral exponencial.

$$E_i(x) = - \int_{-\infty}^{-x} \frac{e^{+t}}{t} dt$$

$E_1(x)$ Integral exponencial.

$$E_1(x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt$$

f_A Índice de declive da assíntota da curva de aquecimento a dimensional.

f_{Bo} Índice de declive da assíntota da curva de esfriamento adimensional.

f_{Bi} Índice de declive do segmento retilíneo da ordem i na curva adimensional de aquecimento.

f_{Bn} Índice de declive do segmento retilíneo da ordem n na curva adimensional de aquecimento.

f_o Índice de declive da curva de esfriamento; é a recíproca da tangente da curva de esfriamento.

f_h Índice de declive da curva de aquecimento do produto; é a recíproca da tangente da curva de aquecimento.

f_s Índice de declive de um segmento da distribuição de f de terminadas experimentalmente.

F Valor de TDT a 121,19C (2509C).

F_e Valor de F no ponto de mais lento aquecimento (ponto crítico) do recipiente.

F_i Valor de F_p a qualquer temperatura equivalente a 1 minuto a 121,19C.

$$F_i = 10^{-(T_r - 121,1)/z}$$

F_k Grupo adimensional definido como

$$F_k = F_s / (D_r \cdot C_b)$$

F_p O equivalente, em minutos a 121,19C, de todo o tratamento térmico considerado, com respeito a sua capacidade de destruir um determinado organismo (esporos ou células vegetativas).

F_{pe} Efeito letal da fase de esfriamento.

$$F_{pe} = F_{pec} + F_{pel}$$

F_{pec} Efeito de esterilização da fase curvilínea de esfriamento.

F_{ph}	Efeito da esterilização da fase de aquecimento.
F_{pel}	Efeito de esterilização da fase exponencial de esfriamento.
F'_p	Somatória dos valores de $\Delta F'$
F_s	Valor de esterilização média da massa; é o efeito letal integrado do calor recebido por todos os pontos em um recipiente durante o processamento.
F_λ	Valor de esterilização, F_p , em qualquer ponto do recipiente.
h	Distância vertical medida da face inferior do recipiente cilíndrico.
H	Uma função de Hicks. $H = (100 \cdot U_h) / f_h$
I_c	$= T_c - T_w$
I_{c0}	Valor de I_c quando $t_c = 0$.
I_d	Diferença entre a temperatura hipotética do alimento localizado na porção retilínea da curva de esfriamento, T_d , e a temperatura do meio de esfriamento. $I_d = T_d - T_w$
I_g	$= T_r - T_g$
I_h	$= T_r - T_h$
I_0	$= T_r - T_0$
I_{pg}	$= T_{pg} - T_w$
I_{pg}	$= T_r - T_{p0}$
I_r	$= 121,1 - T_r$
I_w	$= T_g - T_w$
j	Coefficiente de intersecção da assíntota da curva de aquecimento ou esfriamento.
j_A	Coefficiente de intersecção da assíntota para a curva adimensional de aquecimento. Para um recipiente cilíndrico, $j_A = 2,03970$.
j_c	Coefficiente de intersecção da curva de esfriamento. $j_c = I_{pg} / I_w$

j_e	Valor de j no centro do recipiente.
j_h	Coeficiente de intersecção da curva de aquecimento. $j_h = I_{p0}/I_0$
j_i	Coeficiente de intersecção para o segmento retilíneo da ordem i na curva adimensional de aquecimento.
j_n	Coeficiente de intersecção para o segmento retilíneo da ordem n na curva adimensional de aquecimento.
$J_0(x)$	Valor da função de ordem zero de Bessel do primeiro tipo avaliado no x .
$J_1(p_1)$	$= 0,51915$.
$J_1(x)$	Valor da função de 1ª. ordem de Bessel de primeiro tipo avaliado no x .
j_λ	Valor de j no ponto desejado do recipiente.
l	Altura interna da lata (cm).
L	Velocidade letal. L = Recíproca do valor TDT da temperatura considerada (no método geral original). L = Recíproca do tempo, a qualquer temperatura letal equivalente a 1 min. a 121,1°C (nos demais métodos).
m	Fator de forma do recipiente cilíndrico; é obtido pela relação entre o raio interno e a altura interna da lata cilíndrica.
n	Número de bactérias sobreviventes após um tratamento térmico. Também, é usado com outros significados conforme definido no texto.
n_0	Número inicial de bactérias submetidas a um tratamento térmico.
p'	$= -\log(I_h/I_0)$
p_k	Raiz positiva da ordem k da função de ordem zero de Bessel do primeiro tipo.
p_1	$= 2,40483$
r	Distância radial medida do eixo central do recipiente cilíndrico.
R'	Fator de correção para o desvio da linealidade na curva de sobreviventes.

R_1	Primeira raiz positiva da $J_0(x) = 0$.
s	Um índice de declive relacionado com f pelas equações 63 e 64. Na análise estatística é usado como simbolizando desvio padrão.
S_f	Frequência de sobreviventes em um determinado ponto da distribuição de f_h .
t	Tempo de aquecimento ou de esfriamento.
t_b	Tempo de processamento; é o tempo decorrido do tempo inicial corrigido até o tempo de desligamento do vapor.
t_c	Tempo da fase de esfriamento.
t_e	Fim da fase de esfriamento.
t_f	Fim do tempo de processamento, incluindo a fase de aquecimento e esfriamento.
t_h	Tempo considerado na fase de aquecimento.
t_l	Tempo de ascensão da autoclave; é o período decorrido da ocasião da introdução do vapor na autoclave ao momento que a temperatura atinge a temperatura de operação.
t_{op}	Tempo do operador; é o tempo decorrido da ocasião que a temperatura da autoclave atinge a temperatura de operação até a ocasião do desligamento do vapor.
t_0	Tempo inicial corrigido. $t_0 = t_{op} + 0,42 t_l$
t_1	Intervalo de tempo da porção curvilínea da fase de esfriamento.
T	Temperatura do ponto crítico após um certo tempo de aquecimento ou esfriamento.
T_c	Temperatura do produto no ponto crítico a um certo tempo de esfriamento.
T'_c	Temperatura de esfriamento em qualquer ponto do recipiente.
T_g	Temperatura do ponto crítico no final da fase de aquecimento.
T'_h	Temperatura de aquecimento em qualquer ponto do recipiente.
T_h	Temperatura do produto no ponto crítico a um certo tempo

de aquecimento.

T_I	Temperatura no ponto de intersecção da curva hiperbólica com a exponencial.
T_{p0}	Temperatura pseudo-inicial, obtida pelo prolongamento da porção retilínea da curva de aquecimento até o tempo zero de aquecimento.
T_r	Temperatura de operação da autoclave.
T_w	Temperatura da água de esfriamento.
T_x	Grupo adimensional definido como $T_x = (T_r - T_w)/z$
T_z	Grupo adimensional definido como $T_z = I_0/z$
T_0	Temperatura do produto antes de inicial a fase de aquecimento.
TDP	Ponto de morte térmica; definido como sendo a temperatura que um certo organismo é destruído em um dado período de tempo sob uma determinada condição específica.
TDT	Tempo de morte térmica; definido como sendo o tempo, a uma dada temperatura, em que os organismos de uma suspensão são destruídos sob uma determinada condição específica.
u_c	Temperatura adimensional de esfriamento no centro geométrico do recipiente. $u_c = I_c/I_0$
u_g	Valor de u quando $T = T_g$
u_h	Temperatura adimensional da fase de aquecimento no centro geométrico do recipiente. $u_h = I_h/I_0$
U	O equivalente, em minutos, a temperatura da autoclave de todo o efeito letal recebido no ponto designado do recipiente durante o processamento.
U_c	O mesmo que U , porém, referindo-se apenas a fase de esfriamento.
U_h	O mesmo que U , porém, referindo-se apenas a fase de aquecimento.
V	Volume fracional do recipiente cilíndrico.

x	Como definido no texto.
y	Como definido no texto.
z	Recíproca da declividade da curva TDT, definida como sendo o incremento na temperatura, em °C, necessário para reduzir 90% no valor de TDT.
α	Difusividade térmica do produto ($\text{cm}^2/\text{min.}$).
β, β_1, β_2	Como definido no texto.
Δf	Diferença percentual (em base da assíntota) entre o índice de declive da tangente no ponto $\theta: p'$ e a assíntota.
ΔF	O incremento do efeito letal acumulado durante o intervalo de tempo Δt .
ζ	Variável adimensional da distancia axial definida como $\zeta = y/l$
θ_c	Temperatura adimensional de esfriamento a qualquer ponto do recipiente. $\theta_c = (T'_c - T_w)/(T_r - T_0)$
θ_h	Temperatura adimensional de aquecimento em qualquer ponto do recipiente. $\theta_h = (T_r - T'_h)/(T_r - T_0)$
ρ	Variável adimensional da distância radial definida como $\rho = r/a$
σ	Desvio padrão.
τ	Valor de TDT a uma dada temperatura, T°C:
ϕ	Como definido no texto.

APÊNDICE II - SÍMBOLOS DE COMPUTAÇÃO

A	a (Nº inicial de bactérias)
AT	b' (área)
B	b (Nº final de bactérias)
BB	t_b
CJ	j_c
CJX	j_λ (j_h em qualquer ponto do recipiente)
DCL	$\text{tg}\alpha$ (declividade)
DR	D_r
FC	F_p
FC1	F_{p1} (F_{p1} na condição de F_{s1})
FC2	F_{p2} (F_{p2} na condição de F_{s2})
FH	f_h
FHU	f_h/U_c
FHX	f_h/U_λ
FHX1	$f_h/U_{\lambda1}$
FHX2	$f_h/U_{\lambda2}$
FS	F_s
FS1	F_{s1} (F_s fixada arbitrariamente)
FS2	F_{s2} (F_s fixada arbitrariamente)
FX	F_λ (F_p em qualquer ponto do recipiente)
FX1	$F_{\lambda1}$ (F_λ correspondente a F_{p1})
FX2	$F_{\lambda2}$ (F_λ correspondente a F_{p2})
GC	I_g
GC1	I_{g1}
GC2	I_{g2}
GX	$I_{g\lambda}$
GX1	$I_{g\lambda}$
GX2	$I_{g\lambda}$
HJ	j_h

R	R
RT	T_a
SFH	Σf_h
SIGMA	σ
SLBFH	$\Sigma(f_h \cdot \log b)$
SQFH	$\Sigma(f_h)^2$
SUMP	$\Sigma f(x)$ (por Simpson)
SYLB	$\Sigma \log b$
TI	T_0
UC	U_p
UX	U_λ
UX1	$U_{\lambda 1}$
UX2	$U_{\lambda 2}$
XI	x_1
Y(I)	S_f para $R = 0,204$
YLB	$\log b$
Z	z

LITERATURA CITADA

- Abramowitz, M e Stegun, I. A. 1964. "Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables." Natl. Bureau of Std. Appl. Math. Series 55. Superintendent of Documents, U. S. Government Printing Off., Washington, D. C., U.S.A.
- Alles, L. A. C. e Cowell, N. D. 1971. Heat penetration into rectangular food containers. *Lebensm. Wiss. u Technol.* 4; 59.
- Ball, C. O. 1923. Thermal process time for canned foods. Bull. Natl. Res. Coun., Washington, D. C., U. S. A.
- Ball, C. O. 1928. Mathematical solution of problems on thermal processing of canned foods. Univ. Calif. Public Health, 1, California, U. S. A.
- Ball, C. O. e Olson, F. C. W. 1957. Sterilization in Food Technology. 2a. Ed. , McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, N. Y., U. S. A.
- Bigelow, W. D. 1921. The logarithmic nature of thermal death time curves. *Jour. Infectious Dis.* 29; 582.
- Bigelow, W. D. e Esty, J. R. 1920. The thermal death point in relation to time of typical thermophilic organisms. *Jour. Infectious Dis.* 27; 602.
- Bigelow, W. D., Bohart, G. S., Richardson, A. C. e Ball, C. O. 1920. Heat penetration in processing canned foods. Bull. 16-L. National Cannery Assoc., Washington, D. C., U.S.A.
- Board, P. W., Cowell, N. D. e Hicks, E. W. 1960. Studies in canning processes III - The cooling phase of processes for products heating by conduction. *Food Res.* 25; 449.
- Charm, S. 1961. A method for calculating the temperature distribution and mass average temperature in conduction-heated canned foods during water cooling. *Food Technol.* 15; 248

- Charm, S. E. 1963. "The Fundamentals of Food Engineering". Cap.5. The AVI Publishing Co., Inc., Westport, Conn., U. S. A.
- Cheftel, H. e Thomas, G. 1963. Principes et methodes pour l'etablissement des baremes de sterilization des conserves alimentaires. Bull. 14. Laboratoire de Recherches. Etablissements J. J. Carnaud et Forges de Basse - Indre, Paris.
- Cowell, N. D., Evans, H. L., Hicks, E. W. e Mellor, J. D. 1959. Conduction errors in thermocouples used for heat penetration measurements in foods which heat by conduction. Food Technol. 13; 425.
- Dabbah, R., Moats, W. A. e Mattick, J. F. 1969. Factors affecting resistance to heat and recovery of heat injured bacteria. Jour. Dairy Sci. 52; 608.
- Dall'Oca, S. R., Canhos, V. P. e Yokoya, F. 1972. Uso de computador digital na determinação dos parametros de esterilização de alimentos. Rev. Bras. Tecnol. (no prelo).
- Duncan, C. L. 1970. Arrest of growth from spores in semi-preserved foods. Jour. Appl. Bacteriol. 33; 60.
- Ecklund, O. F. 1949. Apparatus for the measurement of the rate of heat penetration in canned foods. Food Technol. 3; 231.
- Ecklund, O. F. 1956. Correction factors for heat penetration thermocouples. Food Technol. 10; 43.
- Esselen, W. B., Anderson, E. E., Ruder, L. F. e Pflug, I. J. 1951. Pasteurized fresh whole pickles. I - Pasteurization studies. Food Technol. 5; 279.
- Esty, J. R. e Meyer, K. F. 1922. The heat resistance of the spores of *Bacillus botulinus* and allied anaerobes. XI. Jour. Infectious Dis. 31; 650.
- Evans, H. L. 1958. Studies in canning processes. II - The effects of the variation with temperature of the thermal properties of foods. Food Technol. 12; 276.
- Fenelius, A. L., Wilkes, C. E., De Armon, I. A. Jr. e Lincoln, R. E. 1958. A probit method to interpret thermal inactivation of bacterial spores. Jour. Bacteriol. 34; 179.
- Griffin, R. C., Herndon, D. H. e Ball, C. O. 1971. Use of computer derived tables for packaged foods. 3 - Application

- to cooling curves. Food Technol. 25; 134.
- Gillespy, T. G. 1951. Estimation of sterilizing values of processes as applied to canned foods. Jour. Sci. Food Agric. 2; 107.
- Hammer, P. C. e Strout, A. H. 1958. Numerical evaluation of multiple integrals. II - Mathematical Tables and other Aids to Computation 12; 272.
- Hansen, N. H. e Riemann, H. 1963. Factors affecting the heath resistance of nonsporing organisms. Jour. Appl. Bacteriol. 26; 314.
- Hayakawa, K. 1968. A procedure for calculating the sterilizing value of a thermal process. Food Technol. 22; 905.
- Hayakawa, K. 1969a. New parameters for calculating mass average sterilizing value to estimate nutrient in thermally conductive food. Can. Inst. Food Technol. Jour. 2; 165.
- Hayakawa, K. 1969b. Estimating the central temperatures of canned food during the initial heating or cooling period of heating process. Food Technol. 23(11); 141.
- Hayakawa, K. 1970a. A note on the plotting of curves on semilog paper by a digital computer. Food Technol. 24; 232.
- Hayakawa, K. 1970b. Experimental formulas for accurate estimation of transient temperature of food and their application to thermal process evaluation. Food Technol. 24; 89.
- Hayakawa, K. e Ball, C. O. 1968. A note on theoretical heating curve of a cylindrical can of thermally conductive food. Can. Inst. Food Technol. Jour. 1; 54.
- Hayakawa, K. e Ball, C. O. 1969. A note on theoretical cooling curve of a cylindrical can of thermally conductive food. Can. Inst. Food Technol. Jour. 2; 115.
- Herndon, D. H. 1971. Population distribution of heat rise curves as a significant variable in heat sterilization process calculation. Jour. Food Sci. 36; 299.
- Herndon, D. H., Griffin, R. C. e Ball, C. O. 1968. Use of computer derived tables to calculate sterilizing processes for packaged foods. Food Technol. 22; 473.
- Herson, A. C. e Hulland, E. D. 1964. "Canned Foods - Introduc-

- tion to Their Microbiology". Chemical Publishing Co. , Inc., New York, N. Y., U.S.A.
- Hicks, E. W. 1951. On the evaluation of canning porcesses. Food Technol. 5; 134.
- Hicks, E. W. 1952. Some implication of recent theoretical work on canning processes. Food Technol. 6; 175.
- Hicks, E. W. 1958. A revised table of the Ph function of Ball and Olson. Food Res. 23; 396.
- Hicks, E. W. 1961. Uncertainties in canning process calculations. Jour. Food Sci. 26; 218.
- Hodgaman, C. D., Weast, R. C. e Selby, S. M. 1961-62. "Handbook of Chemistry and Physics". 43a Ed. Chemical Rubber publishing Co., Cleaveland, Ohio, U.S.A.
- Hugo, W. B. 1971. "Inhibition and Destruction of the Microbial Cell". Academic Press, New York, N. Y., U.S.A.
- Hurwicz, H. e Tischer, R. G. 1956. Heat processing of beef. VI. Thermal diffusivity and "slopes" of heating and cooling curves for the high-temperature process. Food Res. 21; 147.
- Kaplan, A. M., Reynolds, H. e Lichtenstein, H. 1954. Significance of variation in observed slopes of thermal death time curves for putrefactive anaeroves. Food Res. 19; 173.
- Korn, G. A. e Korn, T. M. 1961. "Mathematical Handbook for Statistics and Engineers". 2a. Ed. McGraw-Hill Book Co. , Inc., New York, N. Y., U.S.A.
- Lamanna, C. e Mallette, M. F. 1959. "Basic Bacteriology". 2a. Ed. Williams and Wilkins, Baltimore, Md., U.S.A.
- Manson, J. E. e Zahradnik, J. W. 1967. Computer thermal process determination for conduction heated foods. Food Technol. 21; 1206.
- Manson, J. E., Zahradnik, J. W. e Stumbo, C. R. 1970. Evaluation of lethality and nutriente retention of conduction-heating foods in rectangular containers. Food Technol. 24; 1297.
- Michels, H. H. 1963. Abscissas and weight coefficients for Lo-

- batto quadrature. Mathematics of Computation 17; 237.
- Olson, F. C. W. e Jackson, J. M. 1942. Heating curves - theory and practical application. Ind. Eng. Chem. 34; 337.
- Patashnik, M. 1953. A simplified procedure for thermal process evaluation. Food Technol. 7; 1.
- Pflug, I. J. 1968. Evaluating the lethality of heat process using a method employing Hicks table. Food Technol. 22; 1153.
- Pflug, I. J. e Esselen, W. B. 1953. Development and application of an apparatus for study of thermal resistance of bacterial spores and thiamine at temperatures above 250°F. Food Technol. 7; 237.
- Powers, J. J., Pratt, D. E., Carmon, J. L., Somaatmadja, D. e Fortson, J. C. 1962. Application of extreme value methods and other statistical procedures to heat penetration data. Food Technol. 16(3); 80.
- Quashou, M., Nix, G. H., Vachon, R. I. e Lowery, G. W. 1970. Thermal conductivity values for ground beef and chuck. Food Technol. 24; 493.
- Rahn, O. 1945. Physical methods of sterilization of microorganisms. Bacteriol. Revs. 9; 1.
- Schack, W. R., Greenberg, R. A., Blodgett, G. A. e Silliker, J. H. 1958. Thermal processing characteristics of canned non-comminuted meats. Food Res. 24; 112.
- Schultz, O. T. e Olson, F. C. W. 1940. Thermal processing of foods in thin containers. III - Recent improvements in the general methods of thermal process calculations - a special coordinate paper and methods of converting initial and retort temperatures. Food Res. 5; 399.
- Shapton, D. A., Lovelock, D. W. e Laurita-Longo, R. 1971. The evaluation of sterilization and pasteurization processes from temperature measurements in degree Celsius. Jour. Appl. Bacteriol. 34; 491.
- Stiles, M. E. e Witter, L. D. 1965. Thermal inactivation, heat injury, and recovery of *Staphylococcus aureus*. Jour. Dairy Sci. 48; 677.

- Stumbo, C. R. 1948. Bacteriological considerations relating to process evaluation. Food Technol. 2; 115.
- Stumbo, C. R. 1949. Further considerations relating to evaluation of thermal processes for foods. Food Technol. 3; 126.
- Stumbo, C. R. 1965. "Thermobacteriology in Food Processing" Academic Press, New York, N. Y., U.S.A.
- Stumbo, C. R. e Longley, R. E. 1966. New parameters for process calculation. Food Technol. 20; 341.
- Stumbo, C. R., Murphy, J. R. e Cochran, J. 1950. Nature of thermal death time curves for P.A. 3679 and *Clostridium botulinum*. Food Technol. 4; 321.
- Teixeira, A. A., Dixon, J. R., Zahradnik, J. W. e Zinsmeister, G. E. 1969. Computer determination of spore survival distributions in thermally processed conduction-heated foods. Food Technol. 23; 352.
- Teixeira, A. A., Dixon, J. R., Zahradnik, J. W. e Zinsmeister, G. E. 1969a. Computer optimization of nutrient retention in the thermal processing of conduction-heated foods. Food Technol. 23; 845.
- Timbers, G. E. e Hayakawa, K. 1967. Mass average sterilizing values for thermal process - Comparison of existing procedures. Food Technol. 21; 1069.
- Townsend, C. T., Esty, J. R. e Baselt, F. C. 1968. Heat resistance studies on spores of putrefactive anaerobes in relation to determination of safe processes for canned foods. Food Res. 3; 323.
- Vas, K. 1970. Problems in thermal processing. Jour. Appl. Bacteriol. 33; 157.
- Vas, K. e Proszt, G. 1957. Observations on the heat destruction of spores of *Bacillus cereus*. Jour. Appl. Bacteriol. 20; 431.
- Viljoen, J. A. 1926. Heat resistance studies. 2. The protective effect of sodium chloride on bacterial spores in pea liquor. Jour. Infectious Dis. 39; 286.
- Yen, Y., Manson, J. E., Stumbo, C. R. e Zahradnik, J. M. 1971. A procedure for estimating sterilization of and quality

factor degradation in thermally processed foods. Jour.
Food Sci. 36; 692.

Yokoya, F. e York, G. K. 1965. Effect of several environment on
the "thermal death rate" of aerobic thermophilic bacteria. Appl. Microbiol. 13; 993.