

SISTEMA DE SUPERVISÃO DE PROCESSO E AQUISIÇÃO DE DADOS APLICADO A UM PROTÓTIPO DE AUTOCLAVE ESTACIONÁRIA

Rubens Gedraite

Leo Kunigk

Ricardo Calvo Costa

Professores do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia

Abstract

In this work it is performed a study about the thermal processing of food products heated by conduction. The development of a computational algorithm, to be executed in a PC computer, that considers the operational conditons of an stationary retort, is presented. The computational algorithm is employed to calculate the thermal difusivity of the food product studied in this work.

Resumo

Neste trabalho realiza-se um estudo do processamento térmico de produtos alimentícios aquecidos pelo mecanismo da condução. Apresenta-se o desenvolvimento de algoritmo computacional, para ser executado num microcomputador do tipo PC, que leve em consideração as condições de operação do protótipo de autoclave estacionária, com o objetivo de calcular o valor da propriedade de transporte de calor denominada difusividade térmica.

Palavras-Chaves: Esterilização, difusividade térmica, autoclave estacionária.

1. INTRODUÇÃO

O processamento térmico de alimentos industrializados consiste no aquecimento do produto alimentício acondicionado em embalagens metálicas em autoclaves pressurizadas, que podem ser estacionárias ou rotativas, verticais ou horizontais, contínuas ou descontínuas. O processamento térmico deve ser especificado por especialistas que, para cada sistema equipamento/embalagem/alimento, definem as condições de processo: tempo de processo, temperatura de processo, temperatura mínima inicial do alimento, perfil de pressão e programa de desaeração da autoclave”.

Diante desses requisitos de qualidade e de segurança, grande cuidado é tomado no cálculo desses tempos de processamento, assim como no controle do tempo e da temperatura vigentes durante eles, para evitar que o alimento seja submetido a um subprocessamento ou a um sobreprocessamento.

“Embora os processos possam ser criteriosamente definidos, a sua aplicação no dia-a-dia da produção industrial foge da idealidade. Problemas operacionais como a falta de energia, queda na geração de vapor de água e falha nos sistemas de controle ocorrem com bastante freqüência e causam desvios de processo pela flutuação da temperatura do meio de aquecimento. Outros desvios de processo podem ocorrer quando há alteração de parâmetros básicos de processo, tais como: temperatura inicial do produto, tempo de processo mais curto e temperatura do meio de aquecimento uniformemente mais baixa. Quando estes desvios acontecem, o lote - em geral - é reprocessado ou segregado para análise dos registros por um especialista que deve tomar decisões quanto à liberação deste ou o seu descarte. Estes procedimentos são dispendiosos, demorados e quando a opção é feita pelo reprocessamento, resultam num comprometimento da qualidade do alimento” (GERMER, 1997).

O objetivo deste trabalho é o de apresentar um modelo matemático, desenvolvido para ser executado em tempo real, e que leve em consideração as condições de operação de uma autoclave estacionária. Este modelo deverá ser empregado em conjunto com o sistema de

controle da autoclave, com a finalidade de garantir o nível de letalidade previamente estabelecido para microorganismos.

2. DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO DE AUTOCLAVE USADO NO PROCESSO DE ESTERILIZAÇÃO DE ALIMENTOS ENLATADOS

Para a realização deste trabalho foi empregada uma autoclave de pequeno porte com capacidade aproximada de 20L e aquecida eletricamente. Essa autoclave – no início dos trabalhos – apresentava algumas particularidades que a diferenciavam daquelas tipicamente encontradas em aplicações industriais, a saber: *(i)* presença obrigatória de água no estado líquido dentro da mesma, pois o resistor irá aquecer esta água para produzir o vapor correspondente, que será usado como agente de aquecimento; *(ii)* ausência de bocais de entrada e de saída para a conexão das tubulações empregadas para o transporte do fluido de resfriamento; *(iii)* ausência de bocal de entrada para a conexão de tubulação empregada no transporte de ar comprimido para a equalização de pressão interna do vaso no início da etapa de resfriamento e *(iv)*- ausência de elemento sensor de temperatura que enviasse sinal remotamente para um controlador e indicador eletrônico de temperatura.

Neste contexto, foi necessário realizar as adaptações requeridas para a sua readequação às necessidades do processamento térmico tipicamente empregado na indústria alimentícia. Inicialmente, foi providenciada a instalação de bocal para a fixação de elemento sensor de temperatura denominado termopar do tipo K. Com a finalidade de evitar a perfuração excessiva do casco do vaso de pressão e, também, em função das características construtivas da autoclave, optou-se pelo desenvolvimento de um adaptador especialmente projetado para alojar o elemento sensor de temperatura a ser instalado e o manômetro/termômetro bem como a respectiva válvula de segurança originalmente existente. Na Figura 1 apresentam-se as modificações realizadas no tampo do equipamento.

Posteriormente, foi providenciada a instalação dos bocais para a fixação das tubulações de água de resfriamento e de ar-comprimido no corpo da autoclave. Por se tratar de vaso de pressão, foi necessária a realização de teste hidrostático visando assegurar que aquele equipamento atendia às normas de segurança estabelecidas para esse tipo de situação. Na Figura 2 apresentam-se os detalhes dessas modificações.



Figura 1 - Tampa da autoclave com a adaptação realizada (à esquerda) e detalhe dessa adaptação (à direita).

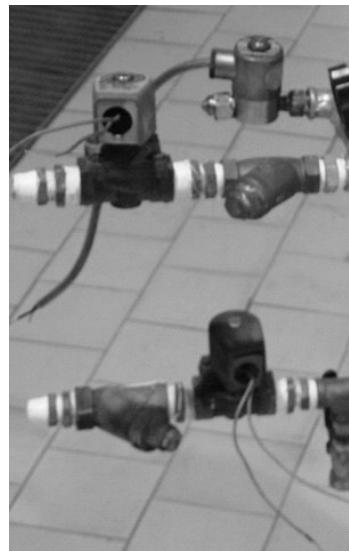


Figura 2 - Detalhe de localização das tubulações e respectivas válvulas solenóides na parede lateral da autoclave.

A tubulação inferior é usada para introduzir a água de resfriamento no interior da autoclave, ao passo que a tubulação superior é usada tanto para a retirada da água de resfriamento alimentada como para a introdução do ar comprimido necessário na etapa inicial do resfriamento para a equalização das pressões interna e externa do produto alimentício. Os diâmetros das tubulações foram dimensionados com base em WHITE (1999), tendo sido utilizados tubos de aço carbono, com diâmetro de 3/16 polegadas.

O sistema de controle instalado no protótipo de autoclave é composto por um controlador e indicador eletrônico de temperatura que permite a troca de informações com um microcomputador. A temperatura interna da autoclave é enviada para o controlador a partir de um termopar do tipo K. Este controlador executa o cálculo da ação corretiva necessária e envia o sinal de correção para um transdutor que atua sobre o resistor de aquecimento instalado na autoclave. Foi instalado um sistema de ventilação e dissipação de calor aplicado ao relê de estado sólido para que ele não desarme por sobre-aquecimento. Simultaneamente, o sinal de temperatura é enviado pelo controlador para o *software* supervisório que permite a sua visualização na tela do microcomputador. O controle seqüencial da operação está baseado na relação tempo-temperatura estabelecida para o processamento térmico em estudo, sendo programado no controlador automático de temperatura. O controlador de temperatura foi montado em painel elétrico, como se mostra na Figura 3.



Figura 3 - Detalhe do painel de controle do protótipo de autoclave aquecida eletricamente.

O controlador utilizado neste trabalho possibilitou a programação da mudança do valor do *set-point* na forma de um degrau durante a etapa de aquecimento e na forma de uma rampa na etapa de resfriamento, assim como a programação dos alarmes de eventos para o acionamento das válvulas solenóides. A programação empregada para o controlador usado neste trabalho teve por premissa os seguintes pontos: **(i)** o ciclo de operação foi iniciado com o valor de referência igual a 25 °C, permanecendo neste valor durante um minuto; **(ii)** transcorrido esse intervalo de tempo, provocou-se uma variação no valor de referência, em degrau, para 121°C sendo mantida por 60 minutos; **(iii)** findo o intervalo de tempo estabelecido na etapa anterior, tem início a etapa de resfriamento, em que a variação do valor de referência foi feita em rampa, com duração de um minuto, atingindo o valor de 20°C. Em seguida, foi realizado – de forma automática – o acionamento das válvulas solenóides. Inicialmente, faz-se o acionamento simultâneo das válvulas de água de resfriamento e de ar-comprimido. O fornecimento de ar-comprimido é interrompido após um segundo do acionamento já citado; **(iv)** por fim, após um minuto do início do resfriamento, é executado de forma automática o acionamento da válvula de dreno para a circulação de fluido de resfriamento. A autoclave utilizada neste trabalho é apresentada na Figura 4.

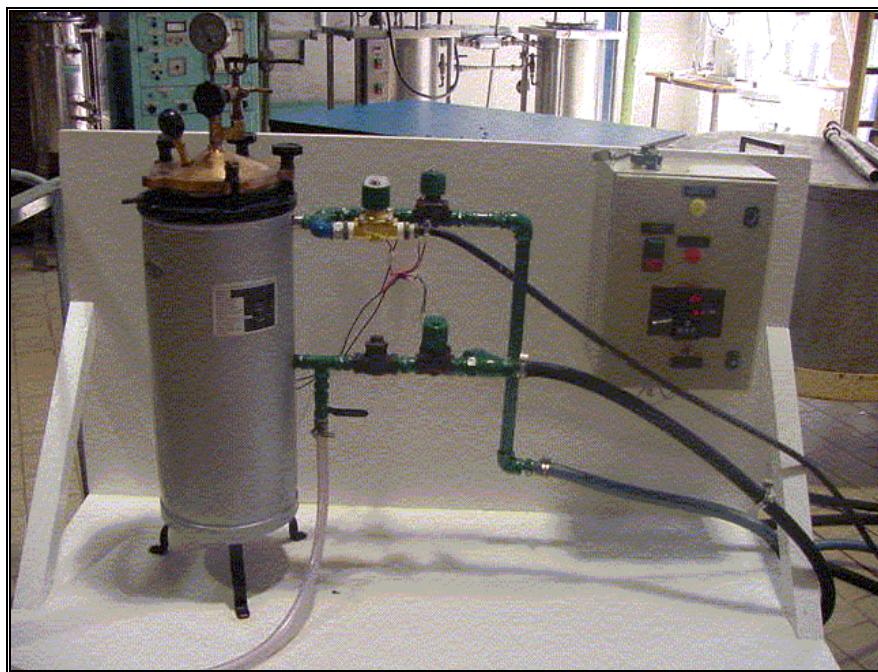


Figura 4 - Protótipo de autoclave aquecida eletricamente montado sobre suporte de madeira.

3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO E CONTROLE USADO NO PROTÓTIPO DE AUTOCLAVE ESTUDADO

O sistema de controle da autoclave estacionária usada no desenvolvimento deste trabalho é apresentado no fluxograma da Figura 5.

Para que a esterilização seja bem-sucedida, é de fundamental importância o controle da temperatura à qual o alimento será exposto e do tempo de exposição àquela temperatura. O controlador e indicador de temperatura apresenta o recurso de aceitar a variação de seu valor de referência em patamares e rampas, permitindo ajustar o período de duração deles, de acordo com as necessidades do processo. Ele permite, também, a associação de alarmes aos eventos preestabelecidos de transição nesses patamares e rampas. Assim, uma vez alcançado o tempo de processamento desejado, o controlador produz um sinal discreto que é usado para interromper a etapa de aquecimento e, em seguida, iniciar a etapa de resfriamento, abrindo as válvulas solenóides que comandam a injeção de água e de ar-comprimido no interior da autoclave.

A contagem do tempo requerido para o período de exaustão é feita de forma manual devido ao fato de a autoclave utilizada apresentar um volume útil pequeno, dispensando por isso a necessidade do uso de recursos mais sofisticados. O período de manutenção na temperatura necessária à letalidade dos microorganismos indesejáveis é controlado por meio de

temporizadores configurados no controlador e indicador de temperatura, atrelados ao valor de referência da temperatura, como citado.

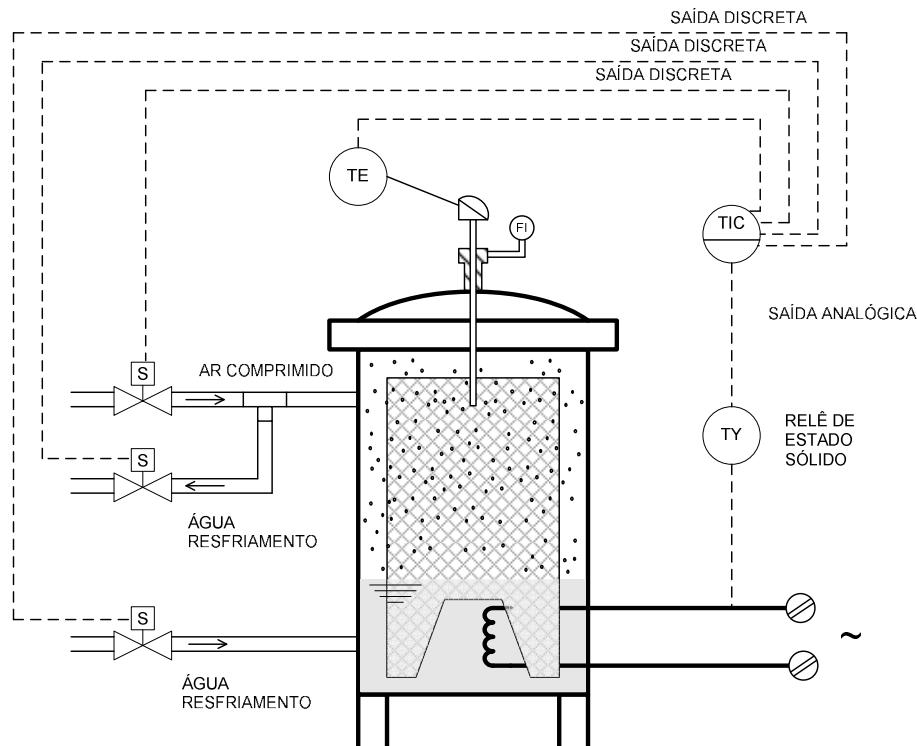


Figura 5 - Fluxograma do processo de esterilização na autoclave.

Uma vez alcançada a esterilização desejada, deve-se proceder ao resfriamento da autoclave por meio da injeção de água. Nesta etapa do processo é muito importante o controle da pressão no interior da autoclave, para evitar que os recipientes que contêm o alimento sejam danificados. O controle da etapa de resfriamento e da pressão no interior da autoclave é realizado por meio da introdução de água de resfriamento e de ar comprimido no interior da autoclave em estudo, atuando o controlador e indicador de temperatura sobre as válvulas solenóides instaladas nas respectivas tubulações mostradas na Figura 2.

O controle regulatório da pressão no interior da autoclave é realizado em malha aberta. Para a medição da pressão foi instalado um manômetro local sobre a tampa da autoclave, que opera em conjunto com uma válvula reguladora de pressão auto-operada.

O software de monitoração, utilizado no microcomputador do tipo PC, permite a configuração de telas do tipo sinótico que apresentarão: a evolução das variáveis de processo de interesse; a geração de gráficos de tendência; o acompanhamento do estado dos sinais de saída discretos etc. Na Figura 6 apresenta-se o hardware utilizado para executar o controle do protótipo de autoclave estacionária deste trabalho.

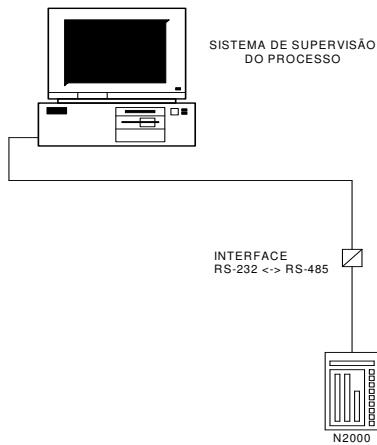


Figura 6 - Sistema de automação existente.

Uma vez implementado no microcomputador, o algoritmo computacional executa o ajuste do parâmetro difusividade térmica usando como critério de validação o perfil de temperatura no centro do recipiente que contém o produto alimentício. Comparando-se o resultado obtido com o modelo matemático usado para a predição da temperatura do alimento, e aquele obtido com o sensor virtual, será ajustado o valor da propriedade de difusividade térmica.

Para o ajuste dos parâmetros, pretende-se transformar o cálculo da propriedade difusividade térmica num problema de otimização, no qual se procurará minimizar o erro total, expresso como o somatório dos quadrados do erro, calculado para cada uma das temperaturas.

O diagrama de blocos apresentado na Figura 7 mostra o fluxo da informação verificado no algoritmo computacional (GEDRAITE, 1999).

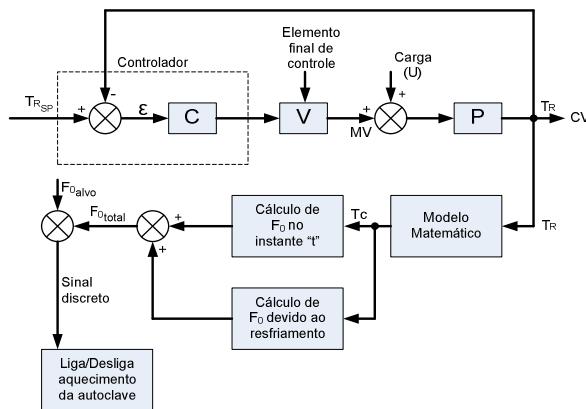


Figura 7 – Diagrama de blocos genérico usado na predição da temperatura do alimento.

4. DESCRIÇÃO DO ALGORITMO COMPUTACIONAL IMPLEMENTADO PARA O CÁLCULO DO VALOR DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA

A dificuldade em se encontrarem dados sobre a difusividade térmica na literatura especializada em Engenharia de Alimentos justificou o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa. A contribuição inédita deste trabalho para o campo de estudo abordado é o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para estimar-se o valor da difusividade térmica de produtos alimentícios industrializados. A evolução deste trabalho aponta para a implementação prática de sensores virtuais na indústria de alimentos, que poderão contribuir de forma significativa para a melhoria da qualidade da indústria alimentícia. Para se alcançar este objetivo será implementado o algoritmo computacional descrito a seguir.

O diagrama de blocos correspondente ao algoritmo computacional implementado está na Figura 8. Esse algoritmo computacional foi desenvolvido para ser executado de forma descontínua, com uma intervenção do operador humano responsável pela operação da autoclave, com o objetivo de

garantir que o nível de letalidade desejado seja alcançado e que o valor da propriedade térmica de difusividade térmica seja calculado.

O algoritmo computacional desenvolvido é executado num microcomputador, interligado em rede com o microcomputador dedicado a executar o “software” de supervisão do processo, parte integrante do sistema de controle da autoclave. Na Figura 9 apresenta-se a arquitetura básica do sistema de controle implementado no protótipo de autoclave estacionária utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

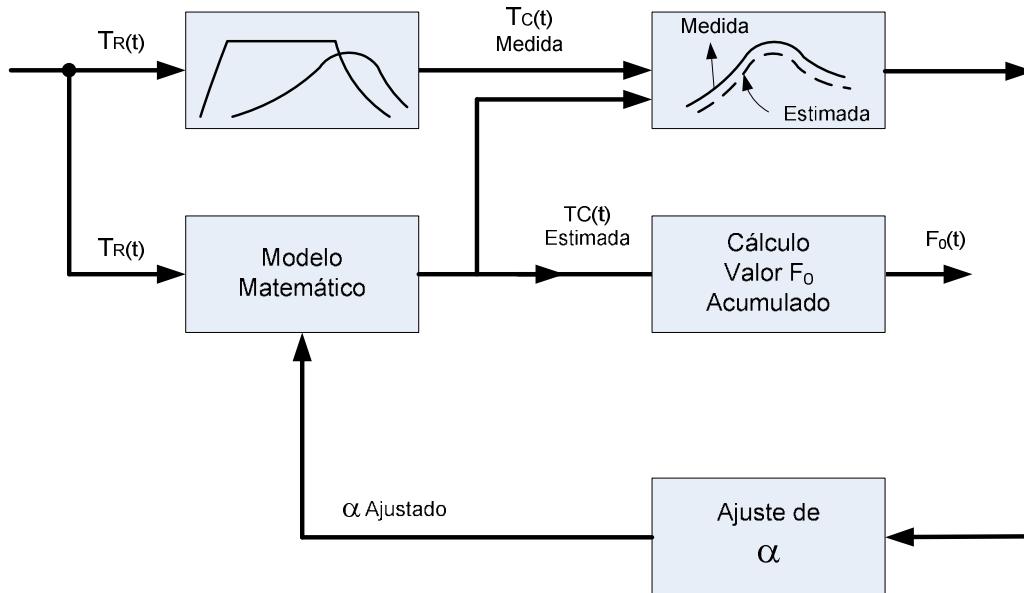


Figura 8 – Diagrama de blocos do algoritmo computacional implementado.

Para calcular o valor das temperaturas no nó central do produto alimentício em estudo, em função do tempo, o algoritmo computacional desenvolvido utiliza o valor da propriedade física denominada difusividade térmica. Na área de Fenômenos de Transporte, essa propriedade é calculada pelo quociente entre o valor da condutividade térmica do meio e o valor do produto da densidade do material pelo calor específico dele. Fisicamente, ela representa a habilidade que o meio estudado possui em transferir a energia térmica através de si.

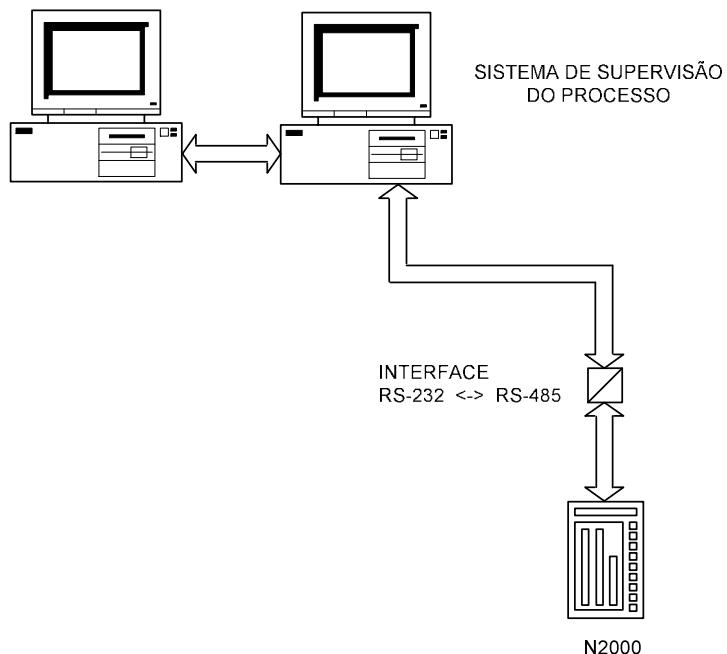


Figura 9 – Arquitetura básica do sistema de controle otimizado da autoclave utilizando-se o algoritmo computacional.

O operador humano alimenta o programa com as seguintes informações: **(i)**tempo (expresso em segundos); **(ii)** temperatura do protótipo da autoclave em cada instante (expressa em °C); **(iii)** temperatura central do produto alimentício ensaiado, medida experimentalmente em cada instante (expressa em °C); **(iv)** temperatura preliminar do produto alimentício, em cada instante, estimada com base no modelo matemático implementado por GEDRAITE (1999) (expressa em °C); **(v)** valor preliminar da propriedade de difusividade térmica (expressa em m²/s) e **(vi)** valor preliminar da função erro acumulado, em cada instante (expresso em °C).

Esses dados são introduzidos no programa por intermédio de uma tabela de interpolação em tabela de entrada de dados usada pelo código computacional EES (*Lookup Table*). O intervalo de tempo abrangido pela tabela de interpolação contempla o tempo requerido para a execução do ciclo completo de esterilização do produto alimentício.

O operador humano executa, então, o programa AUTOMATE®, que gerencia todos os comandos necessários para executar os programas EES e EXCEL®, transferindo os dados do programa EES para o programa EXCEL® e vice-versa.

O cálculo da alteração do valor do parâmetro de difusividade térmica será realizado com base no índice de mérito conhecido como função erro acumulado (FEA), determinado por meio da equação (1).

$$FEA = \frac{1}{\Delta T} \int_0^{t_f} (T_{experimental} - T_{modelo}) \cdot dt \quad (1)$$

O cálculo O novo valor da difusividade térmica é calculado no programa EXCEL®, por meio do emprego da planilha eletrônica denominada "recursão.xls". Nesta planilha, verifica-se se o valor da variável função erro acumulado é positivo. Caso essa condição seja verdadeira, executa-se a alteração no valor da difusividade térmica, decrementando o valor da difusividade térmica e vice-versa. Na Figura 10 apresenta-se um diagrama esquemático que explica como a alteração do valor da difusividade térmica é executado.

A amplitude do valor incrementado e/ou decrementado na difusividade térmica é igual ao último valor da propriedade em questão acrescida algebricamente de fator de incremento fixo. Este incremento fixo foi definido na planilha eletrônica denominada "recursão.xls", sendo igual a 1,0E-8 m²/s. Neste trabalho, o incremento fixo foi multiplicado por um fator de ajuste igual a 0,95, com a finalidade de permitir um ajuste mais preciso no valor da difusividade térmica.

Ainda na planilha eletrônica denominada "recursão.xls", o valor da variável função erro acumulado também é comparado com um outro valor previamente definido pelo operador humano. Se ele for menor ou igual ao valor definido como valor-alvo, a execução do algoritmo é interrompida, caso contrário, ele continua a ser executado. O valor arbitrado como valor-alvo para a função erro acumulado foi igual à unidade.

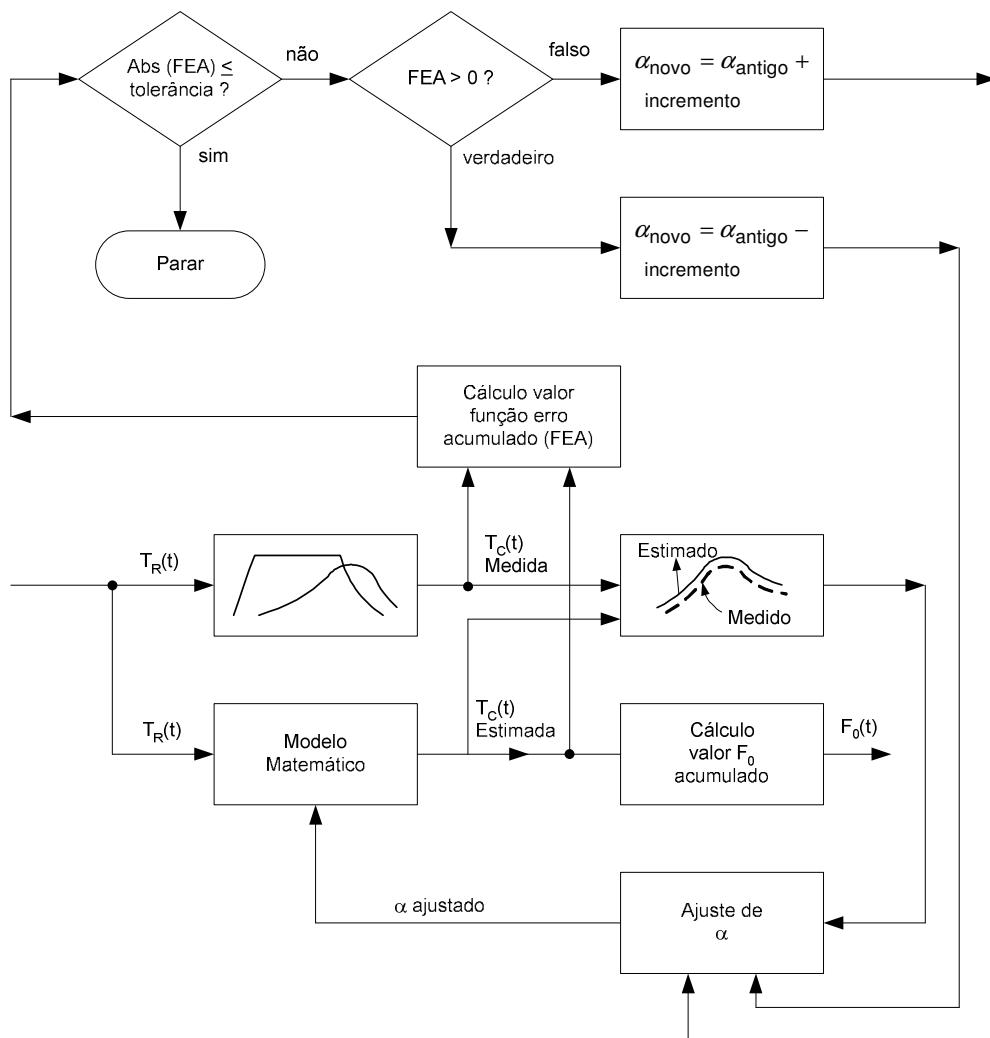


Figura 10 – Diagrama de blocos do algoritmo computacional implementado, contemplando-se a alteração do valor da difusividade térmica.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho utilizou-se a metodologia proposta por TEIXEIRA & BALABAN (1996) para a abordagem do comportamento dinâmico do processo de esterilização térmica de alimentos acondicionados em embalagens de geometria cilíndrica e aquecidos pelo mecanismo de transmissão de calor por condução.

O principal objetivo foi o de desenvolver um algoritmo computacional que permitisse a avaliação do valor da propriedade de transporte de calor denominada difusividade térmica, aplicando-se a citada metodologia, visando à melhoria do desempenho do sistema de controle existente em autoclaves estacionárias típicas.

Com base nos resultados obtidos com a aplicação do algoritmo computacional desenvolvido neste trabalho, pôde-se verificar que é possível contribuir para a melhoria da qualidade do processamento térmico aplicado a produtos alimentícios industrializados que dele necessitem, garantindo que o nível de letalidade desejado para o microorganismo de referência presente neles seja alcançado. Esse algoritmo, no entanto, depende do desenvolvimento de um aplicativo mais geral que execute a troca de informações com sistemas de controle tipicamente encontrados no mercado.

Os dados obtidos neste trabalho permitem as seguintes conclusões: (i) o algoritmo computacional implementado é adequado para calcular o valor da propriedade de transporte difusividade térmica, visando ao controle otimizado da operação da autoclave; (ii) os desvios verificados entre os

valores das temperaturas dos produtos alimentícios ensaiados, medidas experimentalmente, e daquelas calculadas com base no valor ajustado da difusividade térmica – com base em simulação computacional – são pouco significativos e (*iii*) a análise de sensibilidade sobre o número de elementos de volume (nós) utilizados no modelo matemático sugere que esse parâmetro não exerce influência importante nos resultados fornecidos pelo referido modelo.

Os autores pretendem implementar esse modelo matemático num algoritmo computacional que será usado para otimizar a operação de autoclave estacionária. Esse algoritmo deverá ser executado em tempo real, num microcomputador do tipo PC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- GEDRAITE, R. Desenvolvimento e Implementação de Algoritmo Computacional para garantir um determinado nível de Letalidade Acumulada para Microorganismos presentes em Alimentos Industrializados. 1999, São Paulo. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- GERMER, S. P. M. Avaliação dos desvios no processamento térmico de alimentos em conserva. Informativo FRUTHOTEC, v. 3, n.º 2, p. 2-3, 1997.
- KLEIN, S. A., ALVARADO, F. L. Engineering Equation Solver. Middleton, WI, 2003. Manual do Usuário, F-Chart Software.
- LEONHARDT, G. F. CONTRIBUIÇÃO AO CÁLCULO DA TEMPERATURA DE ALIMENTOS QUE SE AQUECEM POR CONDUÇÃO: Cálculo da Temperatura Central e da Temperatura Média para os casos de Latas Cilíndricas e Paralelepípedicas. São Paulo, 1973. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- TEIXEIRA A.A. & BALABAN, M. Notas de Aula do Curso Computer Applications in Thermal Processing of Canned Foods. ITAL, Campinas, 1996.