

## **ADEQUAÇÃO DE UM SISTEMA PARA DESAERAÇÃO ALTERNATIVA DE AUTOCLAVES OPERADAS SOB PRESSÃO DE VAPOR**

FABIO H. MIYAKE<sup>1</sup>; MICHELE N. BERTELI<sup>2</sup>; MARIA ISABEL BERTO<sup>3</sup>; ALFREDO A. VITALI<sup>3</sup>

Nº 11221

### **RESUMO**

O processo de esterilização em autoclaves consiste em aplicar calor ao alimento hermeticamente embalado por um período de tempo e temperatura suficientes para garantir sua esterilidade comercial. Em autoclaves que operam sob pressão de vapor, é o vapor o meio responsável por aquecer o produto até sua temperatura de esterilização. Esta classe de autoclaves requer o uso do equipamento isento de ar para garantia de processamento seguro. Durante a eliminação do ar, na operação denominada de desaeração, grandes quantidades de vapor são gastas. Dentro deste contexto vem sendo estudada uma alternativa ao processo de desaeração visando redução do uso de vapor. Foi montado um Sistema Autoclave – Bomba – Tanque para avaliar a viabilidade da utilização de água para o deslocamento do ar em substituição ao processo convencional de desaeração por vapor. Entretanto, o Sistema Autoclave - Bomba - Tanque ainda necessitou de alguns ajustes. O presente estudo teve como objetivo o ajuste do Sistema Autoclave – Bomba – Tanque, para uma adequada execução da desaeração por água da autoclave carregada. Ao Sistema foi implementado um controle de *set point* variável para comando da bomba e foi feito o levantamento da vazão da linha de vapor que serviu de subsídio à compra de uma placa orifício e calibração de um transmissor de pressão. O Sistema ajustado mostrou-se adequado para a continuação do estudo de desaeração por água da autoclave carregada.

### **ABSTRACT**

The sterilization process in retorts consists in the application of heat to the hermetically sealed food for a determined period or time and temperature in order to guarantee its commercial sterility. In still retorts operating under steam pressure, the steam is the mean responsible for heating the product until it reaches the sterilization temperature. This class of retorts requires the use of air free equipment to ensure a safe processing.

<sup>1</sup> Bolsista CNPq: Graduação em Eng. de Alimentos, Unicamp, Campinas-SP, fabio.miyake@gmail.com.

<sup>2</sup> Orientadora: Pós-doutoranda, GEPC/ITAL, Campinas-SP.

<sup>3</sup> Colaboradores: Pesquisadores, GEPC/ITAL, Campinas-SP.

During the air elimination in the operation called venting, high quantities of steam are spent. Within this context, an alternative to the venting process is being analyzed, aiming at the reduction of steam use. A Retort – Pump – Tank system was devised in order to evaluate the use of water for air displacement in substitution to the conventional steam venting process. Nevertheless, the Retort – Pump – Tank system still required some adjustments. The present study seeks to adjust the Retort – Pump – Tank system in order to obtain proper water venting in a loaded retort. A variable set point control was implemented to control the pump, and the statistics of the steam line flow were obtained, to serve as a subsidy to the purchase of an orifice plate and calibration of a pressure transmitter. The adjusted system was shown to be adequate to the continuing of the water venting study in the loaded retort.

## INTRODUÇÃO

Equipamentos operando com imersão total em água, cascata ou spray de água ou mistura ar/vapor vêm surgindo no mercado com o objetivo de processar embalagens flexíveis semi-rígidas e/ou reduzir o consumo de energia utilizado no processo convencional a vapor de água. Entretanto, autoclaves que operam sob pressão de vapor são as de concepção mais antiga e ainda as mais utilizadas nas indústrias que processam alimentos embalados em recipientes metálicos. Para seu perfeito funcionamento e garantia de processamento seguro, esta classe de autoclaves que operam a vapor requer o uso de vapor puro (isento de ar) como meio de aquecimento (Food Processors Institute, 1990). Esta condição é obtida pela operação denominada desaeração, que tem por finalidade a remoção total do ar do interior do equipamento por meio de seu arraste por injeção de vapor.

Para a eficiência do processo, a saída da mistura ar/vapor deve ocorrer com o mínimo de resistência. A desaeração acontece antes do início do processo de esterilização. A retirada do ar do interior do equipamento ocorre com a injeção de vapor por uma extremidade da autoclave e a expulsão do ar pela outra extremidade.

A garantia do mesmo valor do coeficiente de transferência de calor por convecção ( $h$ ) é fundamental para a reprodutibilidade do processo. O valor de  $h$  para vapor com 6% de ar chega a diminuir este coeficiente em 10 vezes quando comparado ao vapor puro (Fellows, 2009). Estima-se que 10% de volume em ar em uma autoclave podem reduzir a temperatura do processo em 3°C (May, 2004).

Ainda que de relativa curta duração, a vazão de vapor demandada nesta fase constitui de 25 a 50% do total consumido durante todo o processo térmico. A situação

se agrava em instalações com várias autoclaves onde duas ou mais podem estar no ciclo de desaeração ao mesmo tempo, necessitando de uma grande demanda de vapor (Lopez, 1981).

O crescimento do custo do petróleo verificado nas últimas décadas e, conseqüentemente, do óleo combustível utilizado na produção de vapor nas indústrias processadoras de alimentos autoclavados é cada vez mais um fator agravante no custo de produção.

O histórico do preço crescente do barril de petróleo, limitações de outras fontes de combustível e ainda o grande problema de impacto ambiental devido à emissão de gases poluentes são os motivos que impulsionam e justificam o estudo da viabilidade de uma metodologia alternativa para o processo de desaeração.

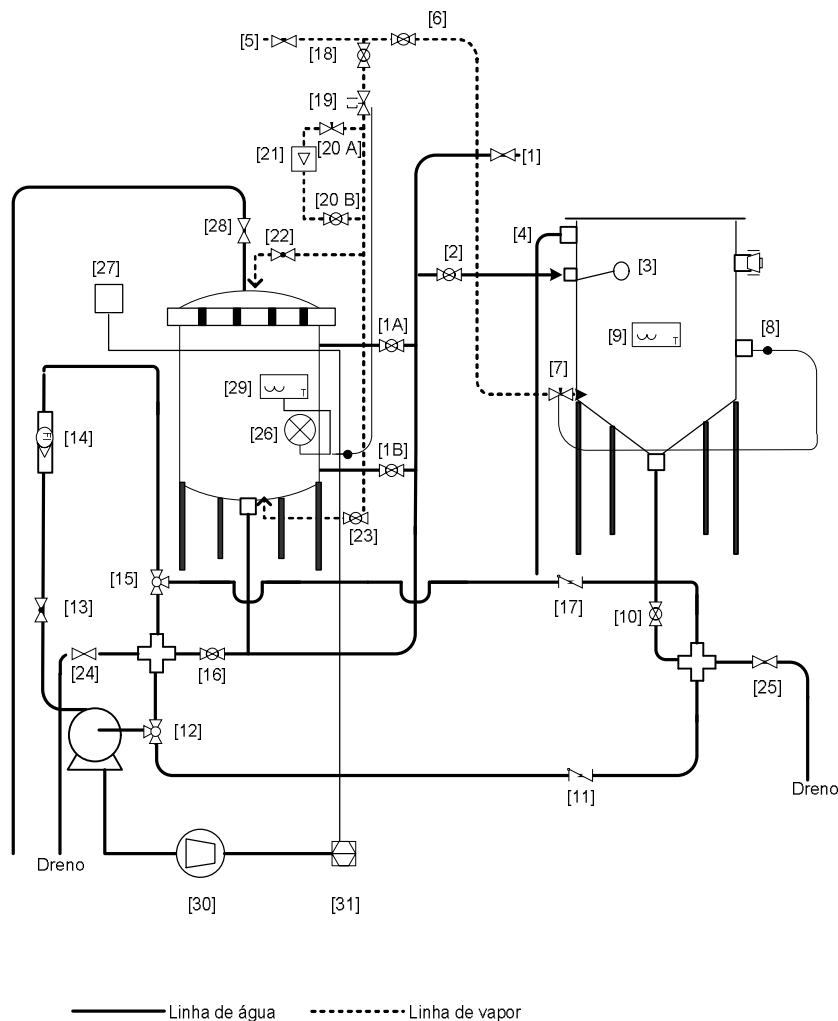
A abordagem alternativa em que este trabalho está baseado consiste na utilização de água para deslocamento do ar em substituição ao processo convencional de desaeração em autoclaves operadas sob pressão de vapor. O estudo teve como objetivo o ajuste de um Sistema Autoclave – Bomba – Tanque já existente para uma adequada execução da desaeração por água da autoclave carregada com carga máxima, conforme especificado nos protocolos internacionais (Institute for Thermal Processing Specialists).

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Sistema Autoclave – Bomba - Tanque**

A desaeração por água na montagem inicial, ou seja, sem os ajustes no Sistema Autoclave – Bomba – Tanque, ocorreu conforme metodologia descrita a seguir. Foi utilizada uma autoclave vertical a vapor de 0,65 m de diâmetro, 0,84 m de altura e 0,11 m de altura o abaulamento dos tampos, existente na planta piloto de operações unitárias do Grupo de Engenharia e Pós-colheita – GEPC – ITAL. A água de desaeração foi armazenada em um tanque cilíndrico de aço inoxidável com fundo cônico, de 1 m de altura e 0,75 m de diâmetro, com bocais para entrada de vapor, ligado a uma cruzeta de tubos perfurados, e entrada para água. À autoclave e ao tanque foi conectada uma bomba centrífuga (KSB Hydrobloc modelo C700) com selo mecânico para temperatura até 90°C. A função da bomba é auxiliar a saída da água da autoclave e também proporcionar a sua reutilização em outros processos de desaeração. O sistema montado e instrumentado com os equipamentos descritos acima está apresentado na Figura 1.

O tanque de estocagem de água está ligado à linha de água da rede [1] através da válvula [2], o seu nível é mantido por uma bóia de latão [3]; em caso de excesso de água no tanque, esta flui por meio de um ladrão [4]. O tanque está também conectado à linha de vapor [5] para o aquecimento da água de desaeração. A temperatura da água é controlada através de uma válvula de ação direta [7] acionada por um termostado [8], podendo ser também conferida por um termômetro bimetálico, escala 0 a 120°C, divisões de 2°C (Instrucamp) [9], situado à meia altura do tanque.



**FIGURA 1.** Esquema Sistema Autoclave – Bomba – Tanque: [1] linha de água (A) entrada pela parte superior da autoclave e (B) entrada pela parte inferior; [2] válvula esfera; [3] bóia de latão; [4] ladrão; [5] linha de vapor; [6] válvula esfera; [7] válvula controladora de temperatura por ação direta; [8] sensor de temperatura da válvula controladora; [9] termômetro; [10] válvula esfera; [11] válvula de retenção; [12] válvula de três vias; [13] válvula globo; [14] rotâmetro; [15] válvula de três vias; [16] válvula esfera; [17] válvula de retenção; [18] válvula esfera; [19] válvula posicionadora para controle da temperatura da autoclave; [20] válvula agulha (A) e esfera (B); [21] medidor de vazão de vapor tipo Vortex; [22] válvula globo; [23] válvula esfera; [24] dreno da autoclave; [25] dreno do tanque; [26] manovacuômetro; [27] transmissor de pressão; [28] válvula de desaeração e sangradores; [29] termômetro; [30] inversor de frequência; [31] computador.

Para a etapa de enchimento da autoclave, a água do tanque, na temperatura estabelecida, é aspirada pela bomba centrífuga, depois de ter sido direcionada por uma válvula de três vias [12]; na descarga da bomba a vazão da água pode ser regulada por uma válvula globo [13] e é medida pelo rotâmetro [14] (Matec Flow, modelo RP-50-1500-RI) com calibração de 1 a 10 m<sup>3</sup>/h, em divisões de 0,2 m<sup>3</sup>/h; a água passa por outra válvula de três vias [15] e o fluxo é direcionado para dentro da autoclave pela sua parte inferior com a abertura da válvula [16]. Quando ocorre o transbordamento da água pelas válvulas de desaeração e sangradores [28], a válvula de entrada da autoclave [16] é fechada, assim como todas as válvulas de transbordamento e a bomba desligada.

Na etapa de desaeração, simultaneamente à saída da água da autoclave pela sua parte inferior, deve-se entrar com o vapor pela parte oposta. Para isso, a válvula de entrada de vapor pela parte superior da autoclave [22] e a válvula de saída de água da autoclave [16] são abertas e a bomba religada. Para o esvaziamento a água passa novamente pela válvula de três vias [12], já posicionada no sentido autoclave – bomba, é aspirada pela bomba, passa pelo rotâmetro e pela válvula de três vias [15], também já posicionada no sentido bomba-tanque de estocagem. Para evitar retornos, duas válvulas de retenção [11] e [17] foram instaladas. Após a saída de toda a água da autoclave os sangradores são parcialmente abertos e inicia-se a etapa de esterilização. Na esterilização, a temperatura da autoclave é regulada por uma válvula posicionadora (Bürkert, Positioner 1067) [19], ligada a um sensor de temperatura PT-100, posicionado no nicho da autoclave ao lado de um termômetro de mercúrio [29]. A pressão da autoclave é lida por um manovacuômetro tipo Bourdon, escala -1 a 5 bar, em divisões de 0.5 bar, (Farmabrás)[26], posicionado também no nicho da autoclave. No mesmo ponto foi instalado um transmissor de pressão [27], ligado a um registrador de dados para aquisição do valor da leitura da pressão da autoclave.

O sistema montado mostrou-se adequado para a desaeração da autoclave sem carga. Entretanto, durante o estudo de desaeração da autoclave carregada, conforme é especificado pelos protocolos internacionais, houve cavitação da bomba centrífuga.

A autoclave estava com carga máxima, 188 latas do tipo atum (83 mm x 38 mm e espessura da folha 0,17 mm) preenchidas com água, posicionadas dentro de um cesto. A cavitação ocorreu porque, ao contrário dos testes realizados com a autoclave vazia, a carga de produto também foi aquecida pelo vapor, atuando como um “heat sink”. Com a autoclave vazia, o vapor a 3 bar de pressão manométrica durante o esvaziamento da autoclave trocou calor apenas com a superfície da água da

autoclave. Já nos testes com a autoclave carregada, quando o vapor, sempre a 3 bar, entrou no equipamento, além de aquecer a água da autoclave, foi necessário aquecer também a água presente em todas as latas que estavam dentro da autoclave. Com isso, a pressão positiva do vapor que auxiliava na aspiração na bomba não foi mais suficiente, como durante os testes com a autoclave sem carga. Desta forma, quando a bomba foi acionada, assim que o valor da pressão na sucção da bomba atingiu os valores da pressão de vapor da água nas temperaturas específicas dos testes, ocorreu a cavitação.

Para a uma adequada execução da desaeração da autoclave carregada foram necessários ajustes no sistema Autoclave – Bomba – Tanque. Os ajustes, estudados neste trabalho estão apresentados a seguir.

### **Controle da vazão da água de esvaziamento**

Para o controle da vazão de esvaziamento foi conectada à bomba centrífuga um inversor de frequência, Siemens Vector 6SE3221-0CC40, (30, Fig. 1) modulado de acordo com a pressão lida no nicho da autoclave (27, Fig. 1). O controle do sinal do inversor foi feito por um controlador HI ZAP 500 e o programa codificado em Labview 7.1 (NI, 2001) (31, Fig. 1).

Foi estudado o melhor tipo de controle para atuar na frequência do inversor e com isso regular a rotação da bomba centrífuga de deslocamento da água da autoclave, sem que ocorresse cavitação da bomba. Durante a desaeração a autoclave estava carregada com carga máxima de latas do tipo atum, preenchidas com água e sem espaço livre. As latas foram fechadas em uma recravadeira a vácuo, John Heine, modelo 71D, series 2.

### **Estimativa da vazão da linha de vapor**

Na continuação deste estudo será feita uma avaliação da eficiência da desaeração da autoclave baseada no consumo de vapor gasto nas duas metodologias, a desaeração convencional com arraste do ar por vapor e a desaeração proposta com arraste do ar por água. Portanto, será implantado ao Sistema Autoclave – Bomba – Tanque um conjunto de medição de vazão de vapor, composto por uma placa de orifício e um transmissor de pressão. No Sistema atual existe um medidor de vazão do tipo Vortex (21, Fig.1), calibrado para atuar em vazões de 5 a 50 kg/h. Entretanto, baseados em testes experimentais, verificou que esta faixa de vazão é insuficiente para desaerar a autoclave de maneira eficiente (Berteli et al, 2011).

Foi feita então uma estimativa da vazão da linha de vapor da planta piloto do GEPC para o dimensionamento de uma placa de orifício e calibração de um transmissor de pressão.

A estimativa foi feita baseada em testes termodinâmicos, onde na autoclave fechada, preenchida com uma massa conhecida de água, foi adicionado vapor durante um tempo estipulado. A temperatura da água inicial na autoclave e durante a injeção de vapor foi acompanhada por três termopares distribuídos na autoclave. A pressão da linha de vapor foi anotada antes de cada experimento.

A partir da Eq. 1 foi calculada a quantidade de calor que a água presente na autoclave recebeu do vapor,  $Q_{\text{água}}$  (kcal):

$$Q_{\text{água}} = m_{\text{água}} \cdot C_{p_{\text{água}}} \cdot (T_f - T_0) \quad [\text{Eq. 1}]$$

E pela Eq. 2 foi calculada a quantidade de calor cedido do vapor para a água,  $Q_{\text{vapor}}$  (kcal).

$$Q_{\text{vapor}} = m_{\text{vapor}} \cdot \lambda_{\text{vapor}} \quad [\text{Eq. 2}]$$

Sendo:

$m_{\text{água}}$  = massa da água calculada a partir do volume inicial da água autoclave, kg;

$C_{p_{\text{água}}}$  = 1 kcal/kg°C;

$T_f$  = temperatura final da água após injeção de vapor, °C;

$T_0$  = temperatura inicial da água, °C;

$m_{\text{vapor}}$  = massa de vapor calculada a partir da diferença de volume na autoclave antes e após a injeção de vapor, kg;

$\lambda_{\text{vapor}}$  = calor latente de vaporização (kcal/kg) na pressão da linha.

Comparando os valores das Eqs. 1 e 2 foi possível verificar a confiabilidade da estimativa da vazão de vapor calculada a partir da  $m_{\text{vapor}}$  dividida pelo tempo de duração de injeção na autoclave. A quantidade de calor recebida pela água deve ser semelhante a aquela cedida pelo vapor.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Controle da vazão da água de esvaziamento

O primeiro controle testado durante a desaeração por água da autoclave carregada foi o controle *Proporcional-Integral-Derivativo* (PID), com o objetivo de controlar a pressão da autoclave através da rotação da bomba de água. Para evitar a cavitação foi configurada a pressão de set-point de 1 bar. A duração da etapa de desaeração é muito curta, cerca de 3 a 8 minutos, dependendo da temperatura da



água de desaeração. Este fator comprometeu a auto-sintonia do PID e os parâmetros do controlador tiveram que ser sintonizados em função da análise da cavitação ou não da bomba centrífuga. Após alguns ajustes, os valores dos parâmetros sintonizados para o processo foram  $K_c=1$ ,  $\tau_i=1$  e  $\tau_d=0$ . O controle foi testado durante a desaeração da autoclave com água a temperatura ambiente (cerca de 20°C), condição crítica para a cavitação da bomba devida a grande troca térmica entre o vapor e a água presente na autoclave. O sistema funcionou, a autoclave com a água na temperatura crítica de cavitação (ambiente) foi desaerada em 8 min, sem ocorrer cavitação da bomba. Porém, no primeiro minuto de processo a bomba ficou praticamente desligada, apenas entrando vapor na autoclave, pois logo que a bomba era acionada a pressão da autoclave atingia níveis abaixo do *set point*, de 1 bar.

Foi então testado um controle do tipo rampa, com as seguintes condições:

**TABELA 1:** Condições controle tipo rampa

Intervalo tempo (min)	% rotação inversor	Frequência (Hertz)
0-2	42	25
2-3	58	35
3-4	75	45
4-5	100	60

A temperatura da água de desaeração foi ambiente. Com o controle tipo rampa o sistema funcionou, a bomba não cavitou e a autoclave foi desearada em cerca de 4 min. Entretanto, uma nova rampa deveria se desenvolvida para cada temperatura da água de desaeração estudada.

Como é a pressão da autoclave que rege todo o sistema, um controle de *set point* variável foi desenvolvido, desta vez baseado na leitura da pressão da autoclave em tempo real. A frequência do inversor foi fixada baseada nos valores da pressão da autoclave. Após alguns testes preliminares, os valores encontrados para o bom funcionamento do controle estão apresentados na Tabela 2.

**TABELA 2:** Condições controle *set point* variável

Intervalo pressão (bar)	% rotação inversor	Frequencia (Hertz)
Até 0,85	20	12
0,86 a 0,99	42	25
1,00 a 1,15	75	45
Acima 1,15	100	60

Os testes foram desenvolvidos com água a temperatura ambiente e a 70°C. O sistema funcionou bem, a bomba não cavitou e a autoclave foi desearada em cerca de 3,8 min e 2,5 min, nas temperatura ambiente e 70°C, respectivamente.



### Estimativa da vazão da linha de vapor

As respostas obtidas e calculadas durante os testes termodinâmicos estão apresentadas na Tabela 3. Antes de iniciar os testes a linha de vapor era aberta com a autoclave ainda vazia, para eliminar o excesso de condensado que se forma na linha. Este procedimento foi adotado com exceção do Teste 2, o que apresentou o maior erro na comparação entre valores calculados de  $Q$  da água e do vapor, sendo de 38%. Baseado nesta resposta foi concluído que eliminar o excesso do condensado antes dos testes era fundamental, pois estando parte do vapor já condensada, este condensado aumenta a  $m_{\text{vapor}}$  dentro da autoclave depois da injeção do mesmo, porém já não possui calor latente de vaporização, apenas o calor sensível, o que gera erros no cálculo de  $Q_{\text{vapor}}$ .

**TABELA 3:** Respostas obtidas pelos testes termodinâmicos

Teste	$m_{\text{água}}$ (kg)	$m_{\text{vapor}}$ (kg)	$t_{\text{injeção}}$ (min)	$T_0$ (°C)	$T_f$ (°C)	$Q_{\text{água}}$ (kcal)	$Q_{\text{vapor}}$ (kcal)	Erro*	$V_{\text{vapor}}$ (kg/h)
1	126,03	14,92	4,0	20,0	68,0	6049,5	7471,4	24	223,9
2	126,03	14,92	4,0	20,0	63,0	5419,4	7471,4	38	223,9
3	126,03	13,60	4,0	20,0	68,0	6049,5	6844,6	13	204,0
4	126,03	20,56	5,5	20,0	90,0	8822,2	10240,4	16	224,3
5	126,03	18,24	5,5	20,0	84,0	8066,0	9181,8	14	199,0
6	126,03	20,56	5,5	20,0	87,0	8381,1	10240,4	22	224,3
7	155,88	13,93	4,0	20,5	62,0	6469,1	6973,3	8	208,9
8	155,88	13,60	4,0	20,0	60,0	6235,3	6807,2	9	204,0
9	155,88	19,24	5,5	20,0	72,0	8105,8	9629,7	19	209,8
10	155,88	18,90	5,5	20,0	72,0	8105,8	9463,7	17	206,2
11	155,88	24,87	7,0	20,0	86,0	10288,2	12452,3	21	213,2

\*referente à diferença entre o valor do  $Q_{\text{água}}$  e do  $Q_{\text{vapor}}$ .

Nos três primeiros testes foram mantidas as mesmas condições iniciais,  $m_{\text{água}}$  na autoclave de 126,03kg e tempo de injeção de vapor igual a 4 min. Nos Testes 4, 5 e 6 a massa de água foi mantida em 126,03 kg, porém o tempo de injeção de vapor aumentou para 5 minutos, o que gerou um aumento na temperatura final da água (84 a 90°C). A diferença das temperaturas monitoradas pelos 3 termopares distribuídos em diferentes pontos da autoclave durante todos os testes foi inferior a 1°C.

Os testes que apresentaram um menor erro entre os valores de  $Q$  calculados para a água e vapor foram os Testes 7 e 8, com erros de 8 e 9%, respectivamente. Nestes ensaios a massa de água na autoclave foi de 155,88 kg e o tempo de injeção de 4 min, o que gerou uma temperatura final da água menor, de 62 e 60°C. Como a autoclave não é isolada, temperaturas mais altas podem acarretar troca térmica com o ambiente maior e com isso aumentar o erro do experimento.

Os valores das vazões de vapor calculados ficaram na mesma ordem de grandeza em todos os testes, na faixa de 200 kg/h.

Apesar dos erros inerentes a este tipo de experimento, os testes foram realizados com o objetivo de eliminar o máximo possível das interferências que poderiam prejudicar as repostas. Concluiu-se que, baseada na comparação do balanço energético feito nos Teste 7 e 8, a estimativa da vazão da linha de vapor de 200 kg/h era coerente e, portanto, foi solicitada uma placa de orifício e um transmissor de pressão calibrados para operar em um intervalo de vazão de 50 a 300 kg/h.

## **CONCLUSÃO**

Através dos resultados obtidos neste trabalho foi possível ajustar o Sistema Autoclave – Bomba – Tanque para executar de maneira adequada a desaeração por água da autoclave carregada, sem que haja cavitação da bomba de deslocamento e fazer o levantamento da vazão da linha de vapor. Este trabalho serviu de subsídio para a continuação de uma pesquisa de tema exploratório, cuja metodologia gerou um pedido de registro de patente de número PI 0803045-6.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao CNPQ – PIBIC, pela bolsa concedida, à Fapesp pelo financiamento do projeto e ao GEPC – ITAL, pela oportunidade de estágio.

## **REFERÊNCIAS**

1. BERTELI, M. N, VITALI, A. A., MARSAIOLI, Jr., A. & BERTO, M. I. The analysis of an alternative approach to the venting process in retort operating under steam pressure Journal of Food Engineering, 2001. Artigo submetido à publicação.
2. FELLOWS, P. J. Heat processing, Food processing technology: principles and practice, CRC Press, Boca Raton, 2009, 3rd ed., pp. 339-429.
3. FOOD PROCESSORS INSTITUTE. Alimentos enlatados. Princípios de controle do processo térmico, acidificação e avaliação do fechamento de recipientes. Campinas: ITAL (Tradução de Canned Foods - Principles of Thermal Process Control, Acidification and Container Closure Evaluation). 1990. 239.p.
4. INSTITUTE FOR THERMAL PROCESSING SPECIALISTE, file:///C:/iftps/protocols/td\_protocol.htm (7 of 7)6/5/2004 8:28:31 AM.
5. LOPEZ, A. A complete course in canning: Basic information on canning. Baltimore, Maryland USA: The caning trade Inc., 1981a. v.I, 556p.
6. MAY, N. S. Retort technology. In Richardson, P (Ed.), Thermal technologies in food processing. CRC Press, Boca Raton, 2004, pp. 7-28.