

Análise termodinâmica de um sistema de refrigeração por absorção utilizando-se mistura LiBr - H₂O para um silo para armazenamento de grãos

THERMODYNAMICS ANALYSIS OF AN ABSORPTION REFRIGERATION SYSTEM UTILIZING LiBr - H₂O MIXTURE FOR A GRAIN SILO

Luiz Carlos Martinelli Júnior
José Luz Silveira
Universidade Estadual Paulista - UNESP
Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá - FEG

RESUMO

A principal dificuldade na conservação de grãos armazenados está em preservar suas propriedades nutricionais e mantê-los livres de insetos, fungos e suas conseqüências. O controle de insetos tem sido realizado mediante a utilização de inseticidas a despeito da existência de resíduos tóxicos, mas outras perdas como fungos, insetos e atividades metabólicas são controladas por aeração. Em más condições, o grão de soja consome-se e promove o aquecimento da massa. A condição ideal de conservação ocorre em baixas temperaturas (14°C), em que a atividade metabólica é reduzida e a presença de fungos e insetos não é observada. Como sistemas de armazenamento de grãos possuem secadores que queimam lenha e como Sistemas de Refrigeração por Absorção (ARS) utilizam como principal fonte de energia o calor residual de processos ou da combustão de vários combustíveis, este artigo aplica a Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica para estudar um ARS, operando com uma mistura de LiBr-H₂O para um silo de armazenamento de soja.

PALAVRAS CHAVE

Absorção. Refrigeração. Silo. Grãos. Soja.

ABSTRACT

The main difficulty in grain conservation is in the preservation of their nutritional properties and keep them free of insects, fungus and consequences. The insects control have had realize by insecticide in spite of toxics residuals, but the other losses, how the fungus and metabolic activity are controlled by aeration. In

bad conditions, the soybean grain consume yourself and further heating in the mass. The ideal conditioning occur in low temperatures (14°C), where the metabolic activity is reduced and the fungus and insects don't appear. How the grain storage systems have dryers burning firewood and the ARS works using as main source the residual heat of processes or of the combustion of several fuels, in this paper is applied the First and Second Law of Thermodynamics to study an Absorption Refrigeration System (ARS) operating with LiBr-H₂O mixture to a soybean grain silo.

KEYWORDS

Absorption. Refrigeration. Grains. Silo. Soybean.

INTRODUÇÃO

A aeração convencional tem como objetivo a manutenção dos grãos armazenados, sem prejuízo da qualidade e da quantidade da massa armazenada, por meio de um sistema de ventilação, insuflando ar à temperatura ambiente pelos de ventiladores para dentro de silos armazenadores. Essa técnica vem se tornando ultrapassada, em virtude de diversos fatores que acarretam diretamente na vantagem da utilização desse procedimento. Uma das desvantagens da utilização dessa técnica diz respeito ao número prolongado de horas necessárias à realização da insuflação de ar com temperatura ambiente para dentro dos silos armazenadores, apenas com o intuito da conservação da massa de grãos a médias temperaturas, que ficam entre 20°C e 25°C. Esse número de horas de aeração convencional pode-se estender durante todo o período

do em que os grãos estiverem armazenados, se as condições climáticas do meio não favorecerem essa técnica.

A dependência das condições climáticas (temperatura ambiente e umidade relativa do ar) da região onde se está armazenando os grãos, é outra crescente desvantagem da utilização do sistema de aeração convencional. Em função das distorções climáticas constantes, em várias regiões brasileiras, está se tornando difícil a manutenção dos grãos na área restrita de boa conservação (A), conforme a Fig. 1, diagrama de conservação de cereais, estabelecido por Burges e Burrell (1964), na Inglaterra, que indica a natureza dos riscos em função da umidade e da temperatura dos grãos armazenados.

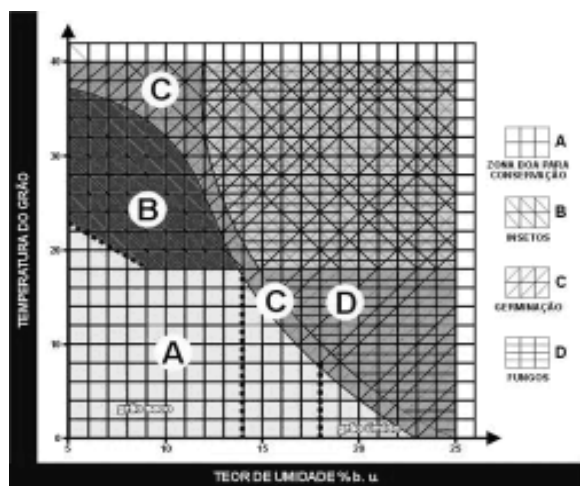


Figura 1 - Diagrama de conservação de cereais.

Essa falta de condições climáticas favoráveis torna-se onerosa aos produtores quando não há tempo para que isso venha a ocorrer. Como se sabe, a mecanização agrícola no Brasil vem crescendo muito nos últimos anos, e isso faz com que a safra de grãos ocorra com uma rapidez mais eficaz, restando pouco tempo para a obtenção de boas médias de temperatura e umidade relativa do ar para a armazenagem. Esse fator torna-se preocupante, como se observa na Tab. 1, elaborada por Lasserran (1981), que mostra o tempo teórico em horas para obter uma elevação de 5°C na massa de grãos armazenados a granel. Verifica-se que, para grãos acima de 20% de base úmida, com 15°C de temperatura, bastam 10 a 15 dias, dependendo dos grãos, para aumentar 5°C, ocasião em que, necessitarão apenas de 5 a 10 dias para aumentar mais 5°C. Nessa oportunidade, estarão atingindo a perigosa casa dos 25°C, para, então, a cada um ou dois dias, aumen-

tar mais 5°C, liquidando a massa de grãos pela deterioração do produto pelo excesso de aquecimento.

Tabela 1 - Tempo em horas para obter uma elevação de 5°C na massa de grãos.

Grãos	Umidade %Bu	Temperatura Inicial - °C				
		5	10	15	20	25
Milho	16	1.500	750	400	170	100
	20	540	270	145	60	36
	24	360	180	100	40	24
	35	175	90	150	20	12
Trigo e Cevada	16	4.100	2.000	1.000	480	240
	20	1.200	600	300	145	72
Colza	10	11.500	2.000	700	170	50

REFRIGERAÇÃO EM ARMAZENAMENTO DE GRÃOS

A agricultura mecanizada no Brasil surgiu no Rio Grande do Sul, e posteriormente foi se expandindo para o resto do país. Esse estado tem a característica de proporcionar ponto de colheita mais tarde que outros estados, geralmente entre abril e maio. Nesses meses, as temperaturas externas já começam a cair, proporcionando excelentes condições de armazenagem de grãos e sementes. Esse aspecto tem dado ao Rio Grande do Sul um poder competitivo muito grande, pois é suficiente um bom trabalho de campo para logo armazenar a matéria-prima por longo período de tempo a temperaturas mais baixas. Isso não ocorre nas demais regiões do Brasil, onde a colheita geralmente ocorre mais cedo, entre fevereiro e março. Muitas vezes, os grãos colhidos das lavouras chegam às unidades armazenadoras com até 36°C de temperatura. Com a utilização das técnicas convencionais de aeração, essa temperatura irá reduzir no máximo 10°C e, nessas condições, degradando sistematicamente as qualidades de conservação do grão armazenado, inclusive podem ocorrer ataques fúngicos ou processos de aquecimento, o que piora ainda mais as condições de armazenagem.

O grão é um ser vivo e, como tal, mesmo desligado biologicamente da planta desde o momento de sua maturação, respira, libera gás carbônico (CO₂), água (H₂O) e calor. Em função da umidade do grão, esse processo ocorre de forma mais ou menos intensa, podendo ser o calor liberado determinado e quantificado em laboratório. A Tab. 2 mostra os valores para o grão sorgo em função da sua temperatura e umidade. Pode-

se notar que quanto maior a umidade dos grãos, maior será a liberação de calor.

Tabela 2 – Calor em kcal, liberado pela respiração de uma tonelada de sorgo em 24 horas (Marsans, 1987).

Umidade %Bu	Temperatura Inicial - °C			
	5	16	27	38
12,4	0	0	0	7
14,6	0	3	7	62
18,0	20	100	1.920	2.440
21,0	120	2.060	7.300	-

A qualidade dos grãos armazenados também é comprometida pelo ataque de insetos e fungos, que, em uma massa com excesso de umidade e calor, encontram o ambiente ideal para a sua proliferação, e há conseqüente deterioração quantitativa e qualitativa da massa armazenada. Grãos com baixa umidade (secos) e armazenados com baixas temperaturas, possuem as suas moléculas de água fortemente ligadas a sua massa por forças denominadas de van der Waals, situação na qual os fungos não as rompem e, sem água, não se desenvolvem e não sobrevivem. A Tab. 3, elaborada por Lázari (1993), demonstra as condições que favorecem o desenvolvimento de fungos na armazenagem, em função do seu teor de umidade e da temperatura.

Tabela 3 – Condições de Umidade e Temperatura que favorecem o desenvolvimento fúngico

Teor de Umidade (%B.U)	Desenvolvimento Fúngico	Temperatura (°C)	Desenvolvimento Fúngico
< 13	Lento	< 15	Lento
13 - 16	Rápido	20 - 30	Rápido
> 16	Explosivo	40 - 55	Explosivo

A técnica de refrigeração em grãos armazenados em silos consiste, basicamente, em insuflar ar a baixas temperaturas (em média 10°C) pelos dos canais de aeração, fazendo com que esse ar frio circule por toda a massa de grãos armazenados. Com isso, removem-se todos os focos de aquecimentos existentes, oriundos do processo respiratório do grão após a colheita, homogeneiza-se a temperatura da massa, o que faz com que esta permaneça em estado de latência (sem aumentos de temperatura) por vários meses, li-

vre de fungos e ataques de insetos. A Fig. 2 exemplifica como a frente de resfriamento avança no processo de refrigeração de silos armazenadores de grãos.

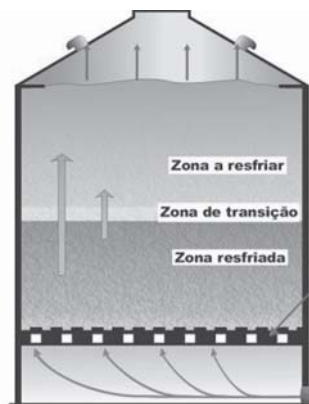


Figura 2 – Frente de resfriamento no processo de refrigeração de grãos em silos verticais.

A refrigeração de grãos armazenados tem como objetivo principal a criação de uma nova região ótima para a conservação de grãos, baseada na proposta de Burges e Burrell (1964), conforme pode ser visto na região em destaque na Fig. 3, em que a temperatura do grão armazenado permanece inferior a 20°C, com umidade entre 11%B.u até 17%B.u., obtendo-se assim todas as vantagens anteriormente mencionadas relacionadas à qualidade do grão armazenado.

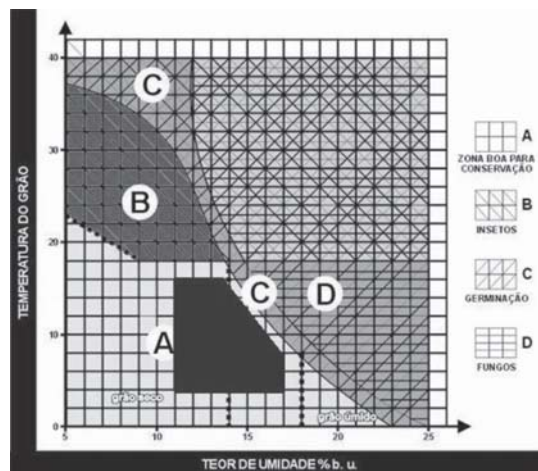


Figura 3 – Proposta de armazenagem de grãos refrigerados.

CARGA TÉRMICA

Segundo Navarro e Calderon (1982), a capacidade de refrigeração necessária para o resfriamento de uma massa de grãos deve levar em consideração diversos fatores, como a energia calorífica desprendida pela

massa de grãos em função da sua temperatura armazenada, a energia calorífica liberada pela massa de grãos em função do seu processo respiratório e outros fatores de associação direta com as condições do ar ambiente, como a variação de entalpia do ar em função do sistema de refrigeração e da própria massa de grãos. A equação proposta para o cálculo da carga térmica será:

$$CR = \frac{Q_1}{t \cdot \left(\frac{\Delta Hg}{\Delta Ha} \right)} + Q_2 \quad (1)$$

em que:

CR – capacidade de refrigeração (kcal/h).

Q1 – energia calorífica liberada pelo grão em função de sua temperatura (kcal).

Q2 – energia calorífica liberada pelo grão em função do seu processo respiratório por unidade de tempo (kcal/h).

t – tempo de resfriamento da massa de grãos (h).

ΔHa – diferença de entalpia entre a temperatura do ar de entrada e a temperatura do ar de saída do sistema de refrigeração (kcal/kg).

ΔHg – metade da diferença de entalpia entre a temperatura máxima do ar na massa de grãos e o ar de saída do sistema de refrigeração (kcal/kg).

Com base nos parâmetros anteriormente especificados, pode-se calcular a energia calorífica liberada pela massa de grãos de soja armazenada em um silo com um teor de umidade de 14%B.u, para uma redução de temperatura de 30°C para a temperatura ideal de armazenagem de 14°C.

A massa de grãos armazenada no silo estudado, considerando o talude de grãos emparelhado até a altura máxima do corpo cilíndrico deste silo (conforme ilustrado pela Fig. 2), é de 2.613.750kg (Broch Kuhn, 2004).

A capacidade frigorífica necessária para a redução da temperatura de 30°C para 14°C em uma massa de soja armazenada é:

$$Q_e = \frac{61,270 \cdot 10^{+6}}{612 \cdot 10^{+3} \cdot \left(\frac{27,5}{50} \right)} + 13,644 = 195,43kW \left(168.474,93 \left(\frac{kcal}{h} \right) \right) \quad (2)$$

que é equivalente a 668.559,06 BTU/h ou 55,71TR (Broch Kuhn, 2004). Neste trabalho, adota-se como uma capacidade frigorífica de 32kW para cada equipa-

mento de refrigeração. Utilizando-se essa distribuição, é possível o funcionamento parcial do sistema, quando as condições requeridas não sejam críticas.

SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO

O sistema de refrigeração por absorção possui algumas características em comum com os ciclos de compressão de vapor, mas diferencia-se em dois detalhes importantes: a natureza do processo e a necessidade de se retirar o vapor de refrigerante da solução líquida. No primeiro, em vez de se comprimir o vapor entre o evaporador e o condensador, o refrigerante de um sistema de absorção é absorvido por uma substância secundária chamada solução absorvente de modo a formar uma solução líquida. Esse processo ocorre no absorvedor (Fig. 4). Essa solução líquida é, em seguida, bombeada para um nível mais elevado de pressão. Como o volume específico médio da solução líquida é muito menor que o do vapor do refrigerante, uma quantidade significativamente menor de trabalho é requerida, necessitando assim de uma menor potência de acionamento em comparação com os sistemas de compressão de vapor. A segunda diferença é que deve ser introduzido nos sistemas de absorção um mecanismo (gerador – Fig. 4) para a retirada do vapor de refrigerante da solução líquida antes que o refrigerante entre no condensador. Esse processo envolve uma transferência de calor de uma fonte que esteja a uma temperatura relativamente alta e abundante.

O condensador, a válvula de expansão do refrigerante e o evaporador são semelhantes aos utilizados em ciclos de refrigeração por compressão de vapor. Com a finalidade de melhorar a eficiência do sistema, acrescenta-se ainda um trocador de calor. O mesmo tem como função aquecer a mistura que está sendo bombeada para o gerador, utilizando-se da energia da solução pobre, que retorna para o absorvedor.

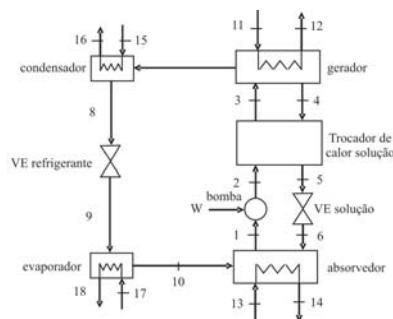


Figura 4 - Esquema do sistema de refrigeração por absorção.

ANÁLISE ENERGÉTICA

Para um regime permanente, o balanço energético do ciclo é dado:

Bomba

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{W} = \dot{m}_2 h_2 \quad (3)$$

Trocador de Calor

$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_5 h_5 \quad (4)$$

Válvula de Expansão da Solução

$$h_5 = h_6 \quad (5)$$

Absorvedor

$$\dot{Q}_{abs} + \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{10} h_{10} = \dot{m}_1 h_1 \quad (6)$$

Gerador

$$\dot{Q}_{ger} + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_7 h_7 \quad (7)$$

Condensador

$$\dot{Q}_{cond} + \dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_8 h_8 \quad (8)$$

Válvula de Expansão de Água

$$h_8 = h_9 \quad (9)$$

Evaporador

$$\dot{Q}_{evap} + \dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_{10} h_{10} \quad (10)$$

ANÁLISE EXERGÉTICA

O método da análise exergética consiste na avaliação qualitativa das perdas por meio da análise pela 2ª Lei da Termodinâmica. Uma tendência que se observa pela atuação de diversos pesquisadores é de que esse tipo de avaliação vem gradualmente assumindo papel relevante nos processos de análise de sistemas térmicos, sem, no entanto, desprezar a análise de 1ª Lei (balanço energético), antes complementando-a e reforçando-a. A expressão exergia é dada às parcelas da energia efetivamente transformáveis em trabalho, quando se desprezam as variações de energia cinética e potencial de um sistema aberto. Mediante tal conceito é possível expressar a energia como sendo com-

posta de duas parcelas, a primeira delas possível de ser transformada em trabalho, a exergia, e a outra que não pode ser transformada em trabalho, que se denominou anergia - Nogueira et al. (1989).

Quando um sistema estiver em equilíbrio com o meio, não ocorrerá nenhuma reação espontânea de estado e o sistema não será capaz de realizar o trabalho. Portanto, se um sistema, num dado estado, sofre um processo inteiramente reversível até atingir um estado em que ele esteja em equilíbrio com o meio, o sistema terá realizado o máximo de trabalho reversível.

Se um sistema está em equilíbrio com o meio, ele deve certamente estar em equilíbrio de pressão e temperatura este meio, isto é, à pressão P_0 e temperatura T_0 . Também deve estar em equilíbrio químico com o meio, o que implica não ocorrer mais alguma reação química. O equilíbrio com o meio requer que o sistema tenha velocidade zero e energia potencial mínima. Exigências análogas são estabelecidas em relação aos efeitos magnéticos, elétricos e de superfícies, se eles forem relevantes num dado problema.

Segundo Silveira e Lacava (1992), a exergia inclui, além das parcelas relacionadas ao equilíbrio termodinâmico, parcelas devidas à diferença de concentração entre espécies químicas, ao potencial químico associado às reações, etc., segundo a Eq. 11.

$$ex_i = (h_i - h_0) - T_0 (s_i - s_0) + \frac{V_i^2}{2} + gz + \Delta G_f^0 + RT_0 \sum_{i=1}^n v_i \ln x_i^0 + \dots \quad (11)$$

De acordo com Wall (1990) e Ebinuma, Silveira e Balestrieres. (1990), para o sistema energético apresentado é suficiente considerar apenas a parcela referente ao equilíbrio termodinâmico, ou seja:

$$ex_i = (h_i - h_0) - T_0 (s_i - s_0) \quad (12)$$

em que:

ex_i - exergia de cada ponto do sistema (kJ/kg)

h_0 - entalpia do estado de referência (kJ/kg)

h_1 - entalpia de cada ponto do sistema

s_0 - entropia do estado de referência (kJ/kg.K)

s_1 - entropia de cada ponto do sistema

T_0 - temperatura de referência (ambiente) (K)

$$ex = c_p [(T_{ar} - T_0) - T_0 \ln(T_{ar}/T_0)] - R \ln(P/P_0) \quad (13)$$

RESULTADOS OBTIDOS

Partindo de uma potência frigorífica de 195,43 kW, carga térmica de um silo, determina-se o fornecimento mínimo de energia necessário para o gerador e as energias a serem rejeitadas ao ambiente pelo absorvedor e condensador respectivamente, seguindo-se a análise energética explicitada anteriormente.

$$\dot{Q}_{ger} = 36,131kW \quad (14)$$

$$\dot{Q}_{abs} = 35,572kW \quad (15)$$

$$\dot{Q}_{cond} = 32,559kW \quad (16)$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{Q}_{ger}} = 0,886 \quad (17)$$

Na Tab. 4 são apresentadas as condições físicas de cada ponto do ciclo de absorção proposto. A partir da energia dos gases de combustão do secador foram calculadas as porcentagens de degradação exergética associadas às irreversibilidades e geração de entropia.

Tabela 4 - Valores do balanço energético e exergético para o sistema proposto.

	P [kPa]	T [°C]	X [% LIBr]	s [kJ/kg.K]	h [kJ/kg]	m [kg/s]	ex [kJ/kg]
1	1,993	37,0	48,8	0,2811	74,1	0,0500	33,18
2	10,869	37,0	48,8	0,2811	74,1	0,0500	33,18
3	10,869	61,2	48,8	0,4471	127,9	0,0500	83,74
4	10,869	85,2	56,6	0,5167	191,4	0,0431	145,8
5	10,869	54,4	56,6	0,336	128,8	0,0431	86,86
6	1,993	51,2	56,6	0,3166	128,8	0,0431	87,24
7	10,869	70,3	0,0	8,25	2630,2	0,0069	49,38
8	10,869	47,5	0,0	8,119	198,7	0,0069	26,34
9	1,993	17,4	0,0	8,723	198,7	0,0069	-2,237
10	1,993	17,4	0,0	8,723	2.532,5	0,0069	-2,238
11	100,00	100,0		6,357	419,1	1,5000	35,25
12	100,00	96,8		6,349	405,7	1,5000	33,62
13	100,00	25,0		10,15	104,8	0,2800	4,368
14	100,00	41,6		10,25	174,1	0,2800	19,51
15	100,00	25,0		10,15	104,8	0,2800	4,368
16	100,00	39,4		10,24	165,0	0,2800	17,46
17	100,00	25,0		10,15	104,8	5,4000	4,368
18	100,00	24,3		10,15	101,8	5,4000	3,736

Na Tab. 5, apresenta-se o balanço exergético dos componentes do sistema de refrigeração por absorção estudado.

Tabela 5 - Balanço exergético dos componentes do sistema.

Componentes	I	ε	ψ
Gerador	7,725	0,325	0,707
Absorvedor	0,934	0,546	0,871
Evaporador	0,760	0,406	0,556
Trocador de Calor	0,395	0,591	0,969
Condensador	0,197	0,643	0,751
Bomba	0,007	0,999	0,998

Os parâmetros ε e ψ são denominados eficiência exergética e racional, respectivamente. O primeiro relaciona a variação da exergia do produto com a variação da exergia dos insumos utilizados no processo. O segundo parâmetro, também denominado eficiência de Bosnjakovic, relaciona a saída de exergia pela entrada da mesma no equipamento. O parâmetro I denomina a irreversibilidade do componente estudado.

REFERÊNCIAS

BROCH KUHN, J. M.; MARTINELLI JR., L.C. *Cálculo da carga térmica para um silo de armazenamento de grãos*. Curitiba: MERCOFRIO, 2004

BURGES, H.D.; BURREL, N.J. *Cooling Bulk Grain in the British climate to control storage insects and to improve keeping quality*. New York: McGraw-Hill, 1964.

EBINUMA, C. D., SILVEIRA, J. L., BALESTIERI, J. A. P. Análise exergética para a determinação do desempenho ótimo de uma bomba de calor. In: SEMINÁRIO DA ADUNESP, 11., Guaratinguetá. *Anais...Guaratinguetá*. p. 355-361.

LAZZARI, F. A. *Umidade, fungos e micotoxinas na qualidade de sementes, grãos e rações*. Curitiba, 1993.

LASSERAN, J. C. *Aeração de Grãos*. Viçosa: Centreinar, 1981.

MARSANS, G. J. *Manejo y conservación de granos*. Buenos Aires: Hemisfério Sur, 1987.

NAVARRO, S.; CALDERON, N. Aeration of grains in subtropical climates. *Agricultural Services Bulletin*, Roma nº 52, 1982.

NOGUEIRA, L. A. et al. Análise Exegética da Unidade 1 da Termoelétrica Piratininga. In: SNPTEE, 10., 1989, Curitiba. *Anais...* Curitiba, 1989. p. 1-6.

SILVEIRA, J. A. AND LACAVA, P. T. Análise exergética de sistema de congelação aplicado à fabricação de papel e celulose. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA MECÂNICA NORTE-NORDESTE, 3., 1992, João Pessoa. *Anais...* João Pessoa, 1992. p. 242-250.

WALL, G. Optimization of refrigeration machinery. *International Journal of Refrigeration*, v. 14, p. 336-340.