

ENERGIA NA AGRICULTURA

AVALIAÇÃO EXERGÉTICA DE PROCESSOS PSICROMÉTRICOS¹

Paulo Martins Leal², Luís A. B. Cortez³ & Sílvia A. Nebra⁴

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo principal a aplicação da metodologia de avaliação dos processos psicrométricos utilizando os conceitos definidos pela combinação das 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica, num sistema adaptado para a geração dos processos psicrométricos. Com equipamentos e instrumental adequados variaram-se, basicamente, em cada processo gerado pelo Sistema Gerador de Processos Psicrométricos (SIGEP), as vazões e as potências elétricas requeridas pelos diferentes sistemas de condicionamento do ar e as temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido de pontos estratégicos, dentro e fora do volume de controle, a fim de se efetuar as análises energéticas e exergética. Pode-se concluir que a metodologia de avaliação pela 1ª e 2ª Lei da Termodinâmica aplicada em processos psicrométricos é tecnicamente viável. Comprovou-se, ainda, através dos resultados obtidos, que a avaliação baseada exclusivamente na 1ª Lei da Termodinâmica (avaliação energética), em quase a totalidade dos processos gerados pelo SIGEP, é menos abrangente que a avaliação exergética. Pode-se concluir, também, que os equipamentos, acoplados ao SIGEP apresentaram um alto índice de irreversibilidade devido ao fato de terem sido dimensionados, exclusivamente, com a finalidade de atingir uma condição psicrométrica específica e não, de serem eficientes, do ponto de vista termodinâmico.

Palavras-chave: exergia, eficiências, processos psicrométricos

EXERGETIC EVALUATION OF PSYCHROMETRIC PROCESSES

ABSTRACT

This research had, as its principal objective, the application of the methodology to evaluate psychrometric processes through the use of theory which combines the First and Second Principles of Thermodynamics into an adapted system of generating psychrometric processes. With the Psychrometric Processes System Generator (SIGEP) and other appropriate equipment, where air flow and electrical power from different systems of air conditioning were the most important variables. It was feasible to obtain data of dry and wet bulb temperature, from different locations of the SIGEP's control volume. These variables, plus the local atmospheric pressure, were enough to determine the state of the air inlet and outlet, which made possible the energetic and exergetic analysis. It was possible to conclude that the methodology based on the evaluation through the First and Second Principle of Thermodynamics was technically viable on the analysis of psychrometric processes. It can be observed that energetic evaluation, in almost every process generated by the SIGEP, provided less rigorous criteria than exergetic analysis. It can be also concluded that the equipments attached to the SIGEP had a high level of irreversibility due to the fact they were designed to meet a specific psychrometric condition, regardless of the level of efficiency at that time.

Key words: exergy, efficiencies, psychrometric processes

Recebido em 10/05/1999, Protocolo 047/99

¹ Parte da Tese de Doutorado, do primeiro autor, apresentada à FEAGRI/UNICAMP

² Prof. Dr. DCONRU/FEAGRI – UNICAMP. CP 6011, CEP 13083 - 970 Campinas, SP. Fone: (0xx19) 3788 1037.
E-mail: pamleal@agr.unicamp.br

³ Prof. Livre-Docente. DCONRU/FEAGRI – UNICAMP. e-mail: cortez@agr.unicamp.br

⁴ Prof. Adjunto. DE/FEM – UNICAMP. E-mail: sanebra@fem.unicamp.br

INTRODUÇÃO

Na agricultura, o uso de processos psicrométricos é intenso no condicionamento do ar para fins de preservação de produtos agrícolas e na tentativa de manter instalações agropecuárias dentro de um padrão mínimo aceitável.

O objetivo da maioria dos sistemas de condicionamento de ar é levar o ar úmido (mistura de dois componentes: ar seco + vapor de água) a um estado no qual a temperatura e a composição diferem da condição encontrada no ambiente real do ar atmosférico.

Os processos psicrométricos podem, em sua quase totalidade, ser divididos em três grandes grupos: aquecimento, resfriamento e mistura de duas correntes de ar, com desdobramentos de cada um, de acordo com o tipo de equipamento construído ou a finalidade desejada.

A análise, de cada processo psicrométrico e do respectivo sistema utilizado pode ocorrer valendo-se dos conceitos da 1ª Lei da termodinâmica, conhecido como avaliação energética ou, através do conhecimento do uso combinado dos conceitos das 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica, denominado avaliação exergética. Ambas as avaliações buscam, por diferentes caminhos, a redução das perdas ou, conseqüentemente, uma otimização dos processos; acredita-se, porém, que a avaliação exergética leva a resultados mais exatos e identifica com mais clareza, dentro de cada sistema, os equipamentos menos eficientes termodinamicamente.

Com a finalidade de tornar a metodologia de avaliação exergética mais acessível aos pesquisadores e técnicos da área agrária desenvolveu-se um equipamento capaz de gerar os seguintes processos psicrométricos: aquecimento, resfriamento e mistura de duas correntes de ar, a fim de comparar ambas as avaliações: energética e exergética; explicitar as facilidades e dificuldades de cada metodologia e verificar as vantagens e desvantagens de cada uma.

Segundo Borel (1979) a teoria da exergia é, largamente reconhecida e extremamente fecunda, pois discorre sobre uma compatibilidade energética que engloba a primeira e a segunda Lei da Termodinâmica; só esta forma de compatibilidade permite avaliar quantitativamente o que é chamado, qualitativamente, de degradação de energia e permite, portanto, calcular-se com precisão as conseqüências dos diversos fenômenos de irreversibilidade termodinâmica e conseqüentemente, avaliar, de maneira correta as perdas termodinâmicas de um sistema. Borel (1979) afirma que só esta forma de análise é conveniente para definir propriamente um rendimento termodinâmico, visto exprimir quantitativamente a degradação qualitativa no uso da energia.

No projeto de um novo sistema que envolva geração ou uso de energia, o método exergético fornecerá informações sobre a melhor seleção dos componentes do projeto e sobre o melhor procedimento de operação. Essas informações poderão ser expressas com base no custo inicial ou operacional das instalações, conservação de energia, versatilidade de uso de combustíveis e poluição (Borel, 1979; Ahern, 1980).

Para se analisar exergeticamente um sistema, o primeiro passo é determinar o local em que ocorrem as perdas de trabalho disponível, a magnitude dessas perdas e quais delas, quando corrigidas, podem efetivamente melhorar a eficiência do sistema (Borel, 1979; Ahern, 1980).

Nos dias atuais, torna-se cada vez mais difundida a técnica da avaliação exergética em sistemas e em processos termodinâmicos (Moran, 1982; Kotas, 1985; Szargut et al., 1988 e Bejan, 1988). No Brasil, já se verifica um gradativo interesse em se aplicar esta técnica (Bahia, 1985; Cortez, 1990; Gallo, 1990; Gallo & Milanez, 1990; Silva & Nebra, 1993; Larson & Cortez, 1995 e Leal, 1997) apesar da dificuldade de sua aceitação, a exemplo do que já ocorrera em outros países.

Na avaliação exergética reúnem-se os valores quantitativos (1ª Lei da Termodinâmica) e qualitativos (2ª Lei) dos fluxos energéticos permitindo, com isto, seu uso como importante ferramenta para otimização técnica e econômica e, portanto, mais consistente do ponto de vista termodinâmico, em processos e sistemas no meio rural.

A Exergia (Ex) mede a capacidade que um fluxo ou sistema tem de realizar trabalho; quantifica o potencial de causar mudança; não é conservada, mas é irreversivelmente destruída enquanto “alimenta” qualquer processo real. Portanto, é a exergia, não a energia, que possui o valor. Ineficiências são conseqüências da destruição da “energia disponível” (= exergia) ou perdas dos resultantes; entretanto, a eficiência energética, que em alguns casos pode dar uma aproximação da “verdadeira” eficiência, tem sido erroneamente utilizada para otimizar processos.

Do ponto de vista termodinâmico a capacidade de realizar trabalho provém de um desequilíbrio que pode ocorrer com qualquer “produto” com potencial (isto é, diferença de voltagem, pressão, temperatura, afinidade química) em realizar um processo. Por razões históricas, esta, que é a propriedade mais consistente, não tem sido utilizada como ferramenta nas análises.

Exergia é não só um parâmetro de avaliação termodinâmica mas, também, de otimização. Um processo é termodinamicamente ideal se a exergia se conserva, conseqüentemente, perda de exergia ou irreversibilidade, como é denominada, significa distanciamento do ideal e do ótimo. Desta maneira, a otimização de um processo termodinâmico implica não exatamente na análise pela conservação de energia (1ª Lei), mas pelo grau de destruição de exergia (1ª e 2ª Lei, juntas). Vem daí que, num determinado processo, o objetivo técnico-econômico não é o de se determinar as “perdas” de energia (até porque energia não se perde) mas as perdas ou destruição de exergia (e esta, sim, se perde, isto é, perda de exergia = irreversibilidade); determinar as fontes e as magnitudes das perdas de exergia é, em última análise, quantificar as perdas de capital. É importante mencionar, ainda, que perdas de exergia (ou irreversibilidade) ocorrem em processos, tais como, de transferência de calor (condução, convecção e radiação), variação de pressão (atrito, expansão, compressão) e reações rápidas, tais como combustão, Cortez (1990).

No Brasil, é utilizada uma grande quantidade de energia (óleos combustíveis, GLP, lenha, eletricidade etc.) na conservação e preservação dos alimentos, na forma in natura ou processados, empregando-se processos psicrométricos, tais como: aquecimento, resfriamento, secagem e/ou desumidificação, resfriamento evaporativo e/ou umidificação e mistura adiabática; todavia, com a crescente preocupação de se minimizar os efeitos causados ao meio ambiente, quer pela devastação das matas nativas como pela emissão de gases poluentes e, também, pelo

aumento no preço do barril do petróleo, já citado anteriormente, houve uma mudança substancial do uso da energia e dos projetos de sistemas e processos em plantas agrícolas e de processamento de alimentos.

Basicamente, existem dois tipos principais de critérios de desempenho tradicionalmente aplicados em sistemas térmicos; a saber: taxa de conversão de energia, tal como a eficiência térmica global e os coeficientes de desempenho, os quais são usados para a determinação do desempenho de geradores de potência e taxas envolvendo rendimento real e rendimento ideal, geralmente aplicados aos componentes de uma planta agroindustrial; e como exemplo, pode-se citar as eficiências isoentrópicas, as relações térmicas e as eficiências mecânicas, entre outras. Ao se formular tais critérios, todas as formas de energia, mesmo estando em diferentes temperaturas, são assumidas como equivalentes e, portanto, não há nenhuma referência feita à 2ª Lei da Termodinâmica (Kotas, 1985).

Recentes desenvolvimentos na análise exergética permitem a definição de um novo critério de desempenho que oferece algumas vantagens sobre os critérios tradicionais, baseados somente na 1ª Lei da Termodinâmica. Vários pesquisadores propuseram um critério geral baseado no conceito da exergia, definindo eficiências exergéticas para um grande número de sistemas térmicos e sistemas de combustão.

Kotas (1985) apresenta técnicas gerais, utilizando o conceito de exergia para a formulação de critérios de desempenho para uma variedade de sistemas térmicos.

Bullock (1973) volta a analisar exergeticamente os processos psicrométricos através de problemas teóricos, determinando os parâmetros através de cartas psicrométricas e tabelas de propriedades do ar úmido, retirados da ASHRAE (1981).

Wepfer et al. (1979) introduzem equações mais genéricas para a exergia do ar úmido; todavia, com maior precisão daquelas obtidas por Bullock (1973) na solução de exemplos teóricos.

Bejan (1988) tratou de descrever as exergias do ar seco, do ar úmido e da água, através de equações que facilitam o uso de cálculos via computador.

A análise de sistemas térmicos é usualmente feita por meio de balanços energéticos e avaliações de eficiências energéticas. A eficiência energética (η) de um sistema térmico, obtida a partir da 1ª lei da Termodinâmica, é dada pela relação:

$$\eta = \frac{[\text{trabalho útil}]}{[\text{energia térmica fornecida}]} \quad (1)$$

As desvantagens de se utilizar apenas o conceito de eficiência definido pela primeira Lei são:

- considerações apenas do aspecto quantitativo das energias envolvidas;
- estabelecimento de uma simples equivalência entre trabalho e calor, sem considerar a qualidade de energia e as condições em que ele é realizado;
- falta de uma definição minuciosa da grandeza, localização e tipo das perdas envolvidas no processo.

Para superar as limitações das análises através unicamente da 1ª lei da Termodinâmica, desenvolveu-se o conceito de exergia, ou disponibilidade energética. Com base nas 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica, exergia é definida como o trabalho

máximo disponível numa massa, fluida ou sólida, como resultado de sua condição de não-equilíbrio, relativa a uma condição de referência.

A medida de eficiência mais adequada é, portanto, baseada no princípio do trabalho disponível:

$$\varepsilon = \frac{[\text{trabalho útil}]}{[\text{trabalho disponível}]}$$

ou

$$\varepsilon = \frac{[\text{trabalho disponível} - \text{trabalho perdido}]}{[\text{trabalho disponível}]} \quad (2)$$

Assim, a minimização do trabalho perdido originará um sistema mais eficiente e é nisto que se baseia o método de análise exergética.

A utilização do conceito de eficiência exergética (ε) permite:

- a qualificação da energia, possibilitando selecionar, de forma absoluta, a fonte energética mais eficiente para determinado processo;
- a identificação dos locais de perda (irreversibilidade) exergética e, em consequência, as condições para melhoria dos processos;
- visto embasar-se nas 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica, a otimização dos processos, pela quantificação e qualificação da energia;
- finalmente, o levantamento exergético de uma planta industrial conduz à detecção de falhas no sistema, relacionadas do mau uso da energia.

A avaliação energética, que está intimamente ligada à 1ª Lei da Termodinâmica: "Princípio de conservação de energia aplicado aos fenômenos, tais como, envolvendo a produção e absorção de calor", tem a ver com a equivalência da transferência de trabalho e calor, como possíveis formas de interações de energia.

Partindo-se da Eq. (1), pode-se determinar, nas avaliações energéticas, as eficiências de cada processo, como a relação entre o trabalho útil e a energia térmica fornecida, através da seguinte formulação genérica:

$$\eta = \frac{w}{q} \quad (3)$$

Enuncia-se a 2ª Lei da Termodinâmica para a análise de um sistema, através de formulação, como sendo:

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \frac{\delta W_p}{T} \quad (4)$$

donde:

- dS - variação de entropia
- δQ - calor total transferido
- δW_p - trabalho total perdido
- T - temperatura absoluta.

Um outro conceito interessante e necessário na avaliação exergética é o da irreversibilidade (I). Pode-se definir a Irreversibilidade como a diferença entre o trabalho reversível W_{rev} e o trabalho realizado no volume de controle, $W_{v.c.}$, então,

$$I = W_{rev} - W_{v.c.} \quad (5)$$

A irreversibilidade é nula quando os processos ocorrem de maneira totalmente reversível.

Em função do já exposto é possível, agora, se definir eficiências com base na combinação das 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica, a fim de se avaliar sistemas e processos de interesse na Engenharia Agrícola; para tanto, pode-se definir dois tipos de eficiências exergéticas (ϵ), uma denominada tradicional (ϵ_T) e outra baseada nos desenvolvimentos realizados por Kotas (1985) denominada eficiência racional (ϵ_K).

Têm-se, portanto, as seguintes expressões:

$$\epsilon_T = \frac{EX_{produzida}}{EX_{fornecida}} \quad (6)$$

em que:

$$EX_{produzida} = EX_{fornecida} - EX_{destruída} - EX_{perdida}$$

e

$$\epsilon_K = \frac{\sum \Delta \dot{E}x_s}{\sum \Delta \dot{E}x_e} = 1 - \frac{\dot{I}}{\sum \Delta \dot{E}x_e} \quad (7)$$

sendo:

$\sum \Delta \dot{E}x_s$ - somatório das transferências de exergia deixando o sistema

$\sum \Delta \dot{E}x_e$ - somatório das transferências de exergia entrando no sistema

I - irreversibilidades internas na região de controle.

Este aspecto de razão entre duas quantidades faz a Eq. (7) ser particularmente adequada para servir como critério do grau termodinâmico de perfeição de um processo. Logo, a diferença $1 - \epsilon_K$ é, claramente, a fração de transferência de exergia de entrada, perdida através das irreversibilidades internas do processo e, comumente denominada “imperfeição da eficiência racional”, segundo Kotas (1985).

Este trabalho tem como finalidade principal a aplicação da metodologia de avaliação de processos psicrométricos (aquecimento do ar por resistências elétricas, aquecimento e umidificação do ar por água quente e umidificação e aquecimento do ar; resfriamento do ar por expansão direta, resfriamento do ar por água gelada e resfriamento evaporativo do ar e, finalmente, a mistura adiabática de duas correntes de

ar) utilizando os conceitos definidos pela combinação do 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica: exergia e irreversibilidade, num sistema gerador de processos psicrométricos.

Os objetivos secundários são: primeiro, comparar as eficiências energéticas com as exergéticas em cada processo realizado; segundo, tornar familiar, no campo da Engenharia Agrícola, o uso de avaliações que possibilitem a otimização de processos e sistemas, do ponto de vista técnico-econômico.

MATERIAL E MÉTODOS

Para se atender aos objetivos propostos, fez-se necessário a adaptação de um sistema de geração de condicionamento de ar através de uma unidade de refrigeração completa, fornecendo uma capacidade de refrigeração de 552 a 2202 J s⁻¹, com duas válvulas de serviço para mudança de fluxo, duas válvulas de expansão, sendo uma para o evaporador de resfriamento da água tipo serpentina com 14,40 m de comprimento de tubulação de cobre de diâmetro de 19,05 mm e a outra para o evaporador de resfriamento do ar, tipo aletado, com área de contato de 6,4 m²; acoplada a dois conjuntos distintos de resistências elétricas. O primeiro é do tipo aletado, permitindo a ligação independente de uma resistência de 616 W, duas resistências totalizando 1518 W e, finalmente, duas resistências com total de 1672 W, localizadas numa câmara de condicionamento de ar de 24,6 cm³, anterior ao plenum de ventilação; o segundo é do tipo cilíndrico, em forma de arco, permitindo a ligação individual de uma resistência de 396 W, uma de 132 W e outra de 1276 W, localizadas na parte inferior do tanque de inox, sobre o evaporador, submerso em água; já o sistema de umidificação era composto de uma bomba hidráulica centrífuga de 1,0 cv de potência com tubulação flexível em latão com 25,4 mm de diâmetro e três registros para circulação e desvio da água do tanque e sistema de umidificação por aspersão da água, através de um conjunto de 11 microaspersores com vazão total média de 52,2 L h⁻¹ numa pressão de trabalho de 122.578,0 Pa, em tubulação de aço inoxidável, com diâmetro de 19,05 mm. O tanque de aço inox possuía, ainda, placas defletoras transversais, a fim de aumentar a área de contato ar-água possibilitando, com isto, maior percurso do ar e melhor eficiência na transferência de calor-massa. O sistema de circulação de ar possuía um ventilador centrífugo de pás retas, com 350 mm de diâmetro, em duralumínio e acoplamento por chaveta, motor de corrente contínua de 90 VCC e 11,2 A, conversor de corrente alternada para corrente contínua, tipo: ponte tiristorizada, semi-controlada com alimentação de 100 a 130 V/60 Hz e tubulação de PVC, com 150 mm de diâmetro, isolada com poliestireno de 50 mm de espessura e revestido por folha de alumínio corrugado de 1,2 mm de espessura, no comprimento total de 8,50 m.

Câmaras de condicionamento: O SIGEP possui cinco câmaras distintas de condicionamento, sendo duas para condicionamento dos produtos e três para o ar.

Quanto às câmaras para condicionamento dos produtos, uma foi construída para armazenar produtos deterioráveis (grãos, sementes etc.) sendo composta por três cilindros paralelos de PVC com diâmetro externo de 150 mm e altura útil de 300 mm, possuindo, todas, uma porta de 200 mm por 240 mm, isolada com 50 mm de espessura de poliestireno, em forma de canaleta, revestida com alumínio corrugado de 1,2 mm de espessura.

A segunda câmara de condicionamento de produtos foi construída para armazenar produtos perecíveis (frutas, hortaliças, flores etc.) em alumínio de 3 mm de espessura com 540 mm de comprimento por 410 mm de largura e 400 mm de altura, perfazendo um volume útil de 88.560,0 cm³, sendo isolada externamente por placas de polietileno expandido de 20 mm de espessura e revestida por papel alumínio corrugado de 1,2 mm de espessura, possuindo uma porta com 435 mm de comprimento por 405 mm de altura e 25 mm de espessura. Possui, internamente, duas bandejas suspensas para colocação dos produtos, instalados no centro geométrico da câmara, logo após o evaporador aletado.

A primeira câmara de condicionamento do ar encontrava-se na parte posterior do SIGEP, construída em aço inoxidável na parede interna possuindo 0,90 m de comprimento por 0,40 m de largura e 0,60 m de altura propiciando um volume útil de 0,22 m³ isolada, externamente, com poliuretano expandido de 25 mm de espessura mínima e revestida, também na parte externa, por chapa galvanizada de 1,0 mm de espessura. No interior desta câmara encontravam-se os evaporadores tipo serpentinos e, logo acima deste, as três resistências elétricas blindadas tipo arco, ambos submersos em água, atingindo uma altura máxima de 210 mm. No topo desta câmara localizava-se o sistema de aspersão de água, que percorria um caminho definido pelas placas defletoras, que estavam encaixadas nas paredes laterais, cuja tampa foi feita de chapa galvanizada de 1,0 mm de espessura com isolamento de poliestireno de 50 mm de espessura, vedada nas bordas com borracha preta expandida de 10 mm; a parte superior esquerda tinha uma abertura de 150 mm de diâmetro, para sucção e/ou circulação do ar e na, parte lateral direita, havia uma abertura quadrada de 215 mm, que permitia a passagem para a segunda câmara de condicionamento de ar.

A segunda câmara de condicionamento de ar localizava-se logo após a primeira, anterior ao plenum de ventilação, com as

seguintes dimensões: 280 mm por 215 mm por 310 mm, parede externa de aço inoxidável de 1,0 mm de espessura e parede interna de chapa galvanizada de 1,2 mm, recheada com isolamento de poliuretano expandido de 25 mm de espessura; a abertura lateral esquerda tinha as mesmas dimensões que a abertura da primeira câmara possuindo, nesta interface uma tela dupla de arame, recheada com manta acrílica de 5 mm de espessura, enquanto a abertura lateral direita tinha diâmetro de 230 mm na parede interna e externa de chapa galvanizada de 1,0 mm, com isolamento interno e externo de borracha expandida rígida preta de alta densidade, de 15 mm de espessura, revestida externamente por chapa de alumínio corrugado de 1,2 mm de espessura; já a abertura posterior, que fazia comunicação com a câmara de produtos perecíveis, possuía diâmetro de 150 mm.

A terceira e última câmara de condicionamento do ar encontrava-se na lateral esquerda do sistema, após os cilindros de produtos deterioráveis e anterior à câmara de condicionamento dos produtos perecíveis; com abertura de 150 mm de diâmetro, localiza-se no centro da parede anterior e apresentava 320 mm de comprimento por 410 mm de largura e 400 mm de altura, sendo confeccionada e isolada com os mesmos materiais da câmara de condicionamento de produtos perecíveis, além do evaporador de ar; comunicava-se com a parte anterior, através de tubulação já descrita, e com a parte posterior (câmara de produtos perecíveis) através de uma abertura de 410 mm por 400 mm, separada por tela de arame de aço inoxidável.

Sistema de acionamento e controle: O SIGEP possuía três painéis ou compartimentos, onde se encontravam todas as chaves de acionamento e controle, além do instrumental para monitoramento e variação dos parâmetros de cada processo; tais painéis localizavam-se na parte frontal do SIGEP (Figura 1).

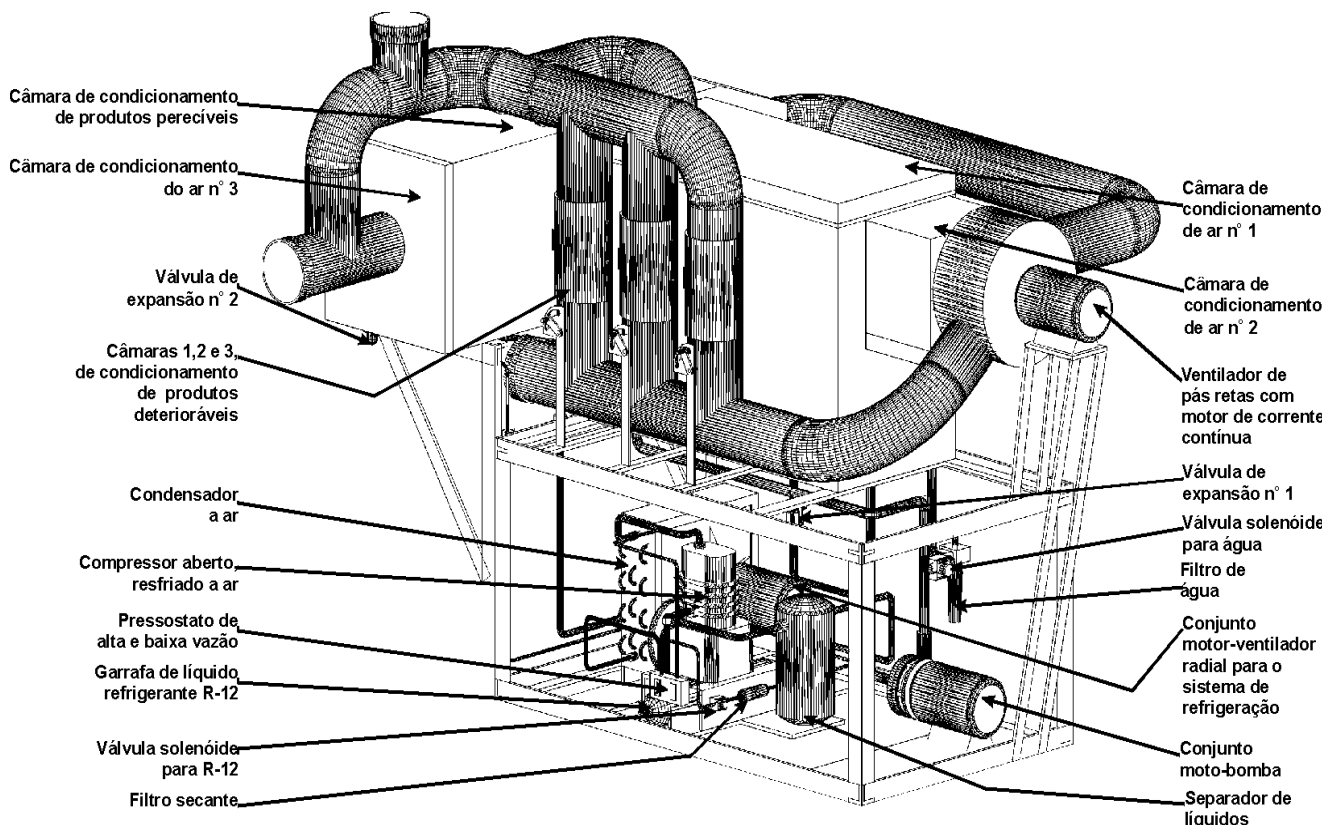


Figura 1. Vista geral fronto-lateral do SIGEP, em 3D, sem os painéis frontais, mas com a indicação dos componentes principais

Acoplado ao SIGEP encontrava-se um sistema de aquisição de dados, ao qual estavam conectados 29 termopares e bainhas apropriadas, tipo J, K e T, para medida de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido do ar, temperatura da água, temperatura de contato em diferentes superfícies e localizações do SIGEP, devidamente calibrados. O sistema de aquisição de dados enviava a um microcomputador PC-486, por programas específicos os dados para visualização na tela, a cada segundo, ou armazenamento em disco rígido, de tempos em tempos, dependendo de cada processo em operação.

A metodologia utilizada para se realizar as avaliações energéticas e exergéticas dos processos psicrométricos, gerados pelo SIGEP, baseia-se na 1ª Lei e na combinação das 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica, respectivamente, definidos em Bejan (1988); portanto, para a avaliação energética utilizou-se dos balanços de massa de ar seco (B.M.A.), de massa de vapor de água (B.M.V, quando aplicável) e da energia (B.E) culminando com o cálculo da eficiência energética (E.E); já, para a avaliação exergética usou-se o balanço exergético (B.Ex.) e o cálculo da eficiência exergética tradicional (E.Ex.) todos definidos de acordo com cada um dos processos psicrométricos utilizados através, principalmente, da variação, do monitoramento e registro da velocidade do ar e da potência elétrica fornecida pelos equipamentos obtendo-se, como parâmetros de cálculo, as temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido do ar ambiente, de entrada e de saída do volume de controle do sistema; velocidade do ar e potência elétrica requerida por cada um dos equipamentos envolvidos nas análises, além de outros parâmetros pertinentes. A título de exemplo apresenta-se, a seguir, o equacionamento completo do processo de aquecimento do ar por resistências elétricas e para os demais processos, utilizam-se os mesmos procedimentos, respeitando as características intrínsecas de cada processo e de cada balanço, ASAE (1986), ASHRAE (1981), Gallo & Milanez (1990), Reynolds (1979) e Wepfer et al. (1979).

$$\text{B.M.A.} \therefore \dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a \quad (8)$$

$$\text{B.M.V.} \therefore \dot{m}_a W_1 = \dot{m}_a W_2 \quad (9)$$

$$\text{B.E.} \therefore \dot{q} + \dot{m}_a (h_{a1} + W_1 h_{v1}) = \dot{m}_a (h_{a2} + W_2 h_{v2}) \quad (10)$$

$$\text{E.E.} \therefore \varepsilon = \frac{\dot{m}_a [(h_{a2} + W_2 h_{v2}) - (h_{a1} + W_1 h_{v1})]}{P.E._{RAR}} \quad (11)$$

ou:

$$\text{E.E.} \therefore \varepsilon = \frac{\dot{q}}{P.E._{RAR}} \quad (11')$$

$$\text{B.Ex.} \therefore \dot{E}x_2 = \dot{E}x_1 + \dot{E}x_q - \dot{I} \quad (12)$$

em que:

$$\begin{aligned} \dot{E}x_2 = & \dot{m}_a (C_{Pa2} + W_2 C_{Pv2}) T_0 \left(\frac{T_2}{T_0} - 1 - \ln \frac{T_2}{T_0} \right) + \\ & (1 + \tilde{W}_2) R_a T_0 \ln \frac{P_2}{P_0} + \\ & R_a T_0 \left[(1 + \tilde{W}_2) \ln \frac{1 + \tilde{W}_0}{1 + \tilde{W}_2} + \tilde{W}_2 \ln \frac{\tilde{W}_2}{\tilde{W}_0} \right] \quad (13) \end{aligned}$$

$$\dot{E}x_1 = 0 \quad (14)$$

$$\dot{E}x_q = P.E._{RAR} \quad (15)$$

$$\dot{I} = f(\dot{E}x_2, \dot{E}x_1, \dot{E}x_q) \quad (16)$$

$$\text{E.Ex.} \therefore \varepsilon_T = \frac{\dot{E}x_2}{\dot{E}x_1 + \dot{E}x_q} \quad (17)$$

definidos como sendo:

$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a$ - fluxos de massa de ar seco, dos pontos 1 e 2, em kg s^{-1}

$W_1, W_2, \tilde{W}_0, \tilde{W}_2$ - umidades absolutas, dos pontos 1, 2 e 0, em que o estado de referência (0) coincide com o estado do ponto (1), em kgv kga^{-1} e kmolv kmola^{-1}
 $h_{a1}, h_{a2}, h_{v1}, h_{v2}$ - entalpias do ar seco e do vapor de água, em kJ kga^{-1} e kJ kgv^{-1} , respectivamente

\dot{q} - fluxo energético da fonte de aquecimento, em kJ s^{-1}

ε - eficiência energética, adimensional ou %

$\dot{E}x_1, \dot{E}x_2, \dot{E}x_q$ - fluxos exergéticos do ar, nos pontos 1 e 2 e da fonte de aquecimento, em kJ s^{-1}

$P.E._{RAR}$ - potência elétrica fornecida pelas resistências de aquecimento do ar, kJ s^{-1}

\dot{I} - irreversibilidades do sistema e processo, kJ s^{-1}

C_{pa2}, C_{pv2} - calores específicos do ar seco e do vapor de água, no ponto 2, em kJ kga^{-1} e kJ kgv^{-1} , respectivamente

P_2, P_0 - pressão atmosférica local, nos pontos 0=1 e 2, em kPa

R_a - constante universal do ar seco, em $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

$T_0 = T_1, T_2$ - temperaturas absolutas, nos pontos 0=1 e 2, em K

ε_T - eficiência exergética tradicional, adimensional ou em %.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio dos parâmetros, de todos os balanços e equações dos processos gerados pelo SIGEP, obtiveram-se os seguintes resultados (Tabela 1) para as eficiências energéticas e

Tabela 1. Valores das eficiências energéticas e exergéticas mínimas e máximas e, do coeficiente de relação médio para os diferentes processos psicrométricos realizados pelo SIGEP

| Eficiências Processos | Energéticas Mín.(%) | Exergéticas Mín.(%) | V (m s ⁻¹) e Pe (J s ⁻¹) | Energéticas Max.(%) | Exergéticas Máx.(%) | V (m s ⁻¹) e Pe (J s ⁻¹) | $\bar{\gamma} = \frac{\bar{\eta}}{\bar{\epsilon}_T}$ |
|--|------------------------|------------------------|--|------------------------|------------------------|--|--|
| Processos psicrométricos | | | | | | | |
| Aquecimento por resistências elétricas | 7,11 | 0,42 | 0,10 e 616 | 44,54 | 2,50 | 3,00 e 2332 | 15,00 |
| Aquecimento por água quente | 9,54 | 0,34 | 0,25 e 1401 | 23,75 | 1,23 | 1,50 e 1799 | 30,00 |
| Umidificação e aquecimento | 6,12 | 0,68 | 0,25 e 1658 | 55,38 | 6,61 | 1,50 e 3282 | 8,69 |
| Resfriamento por expansão direta | 14,75 | 1,57 | 0,25 e 1050 | 77,40 | 4,65 | 1,50 e 1050 | 15,30 |
| Resfriamento por água gelada | 4,33 | 0,20 | 0,25 e 2050 | 73,29 | 2,68 | 1,50 e 2050 | 23,83 |
| Resfriamento Evaporativo do Ar | 0,10 | 0,36 | 0,25 e 1025 | 0,53 | 2,10 | 1,50 e 1025 | 0,24 |
| Mistura adiabática Caso A | 43,89 | 5,34 | | 55,54 | 17,17 | | 5,06 |
| Mistura adiabática Caso B | 94,94 | 41,16 | | 98,99 | 49,12 | | 2,20 |

Fonte: Leal (1997) e Leal et al. (1997)

exergéticas e para o coeficiente de relação médio (γ) entre as respectivas eficiências médias.

Em quase a totalidade dos processos psicrométricos, a eficiência energética foi sempre muito superior à eficiência exergética; em vista disto, pode-se concluir que a avaliação energética, embora correta, foi menos eficaz na identificação da real capacidade de um sistema em realizar trabalho proporcionando, às vezes, a impressão de que processos e sistemas operavam com altas eficiências, não requerendo, portanto, melhorias técnicas; todavia, ao se olhar este mesmo processo ou sistema através das “lentes” da avaliação exergética, descobria-se quão distante se estava de uma eficiência satisfatória.

De todos os processos analisados, quer na fase dos processos psicrométricos propriamente ditos quer na fase de utilização de alguns desses processos, para a conservação do produto perecível (tomate cereja) ou para a preservação do produto deteriorável (sementes de soja) a maior eficiência energética obtida foi de 98,99 % para o experimento com mistura adiabática de duas correntes de ar (caso B); da mesma maneira, a máxima eficiência exergética produzida pelo SIGEP foi encontrada, também, no processo de mistura adiabática de duas correntes de ar (caso B) com 49,12%, seguida, todavia, pelo processo de mistura adiabática de duas correntes de ar (caso A) com 17,17%; já quando se procuram os processos psicrométricos menos eficientes, tanto do ponto de vista energético quanto do exergético, encontram-se os valores de 0,10% para a eficiência energética do processo de resfriamento evaporativo do ar e de 0,20% para a eficiência exergética do processo de resfriamento do ar por água gelada.

CONCLUSÕES

1. A principal conclusão que se pode retirar deste experimento é que a metodologia de avaliação de sistemas e processos, utilizando-se dos conceitos combinados das 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica, foi adequada para analisar processos psicrométricos gerados pelo SIGEP.

2. Quanto aos processos psicrométricos gerados pelo SIGEP que, na sua maioria, apresentaram valores elevados de irreversibilidade, quando se procedeu à avaliação exergética; tais valores, embora não quantificados ou qualificados por equipamentos ou componentes devem, todavia, ser atribuídos

ao fato de que os respectivos equipamentos ou componentes foram previamente, dimensionados, não com o intuito de serem eficientes do ponto de vista termodinâmico mas, sim, para atender aos objetivos inicialmente propostos, de gerar condições psicrométricas precisas do ar, o que levou a um projeto de super dimensionamento dos principais equipamentos de aquecimento e resfriamento do ar.

3. As avaliações energéticas e exergéticas podem ser aplicadas perfeitamente em estudos com produtos agrícolas, sem qualquer prejuízo para ambas as metodologias.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de S. Paulo (94/01854-0).

Ao FAEP/UNICAMP Fundo de Apoio ao Ensino e a Pesquisa (0355/94).

Ao CNPq Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (840376/96-0 e 840618/97-2).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHERN, J.E. The exergy method of energy systems analysis. New York: John Wiley & Sons, 1980. 295p.

ASAE. Psychrometric data. Standards of the ASAE - D 271.2. American Society of Agricultural Engineers - ASAE, p.32-34. St. Joseph, MI. 1986

ASHRAE. Handbook of fundamentals. Atlanta, GA: American Society of Heating, Ventilating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers - ASHRAE, 1981. 967p.

BAHIA, E.T. Análise energética e exergética de indústrias de laticínios. Viçosa: UFV, 1985. 94p. Dissertação Mestrado

BEJAN, A. Advanced engineering thermodynamics. New York, NY: John Wiley & Sons, 1988. 758 p.

BOREL, L. Economic energetique et exergetique. Lausanne: École Polytechnique Fédérale du Lausanne, 1979. 42p.

BULLOCK, C.E. The application of availability analysis to psychrometric processes. ASHRAE. American Society of Heating, Ventilating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers. Symposium Paper - LO.73 (4), p.5-16, Atlanta, GA, 1973.

- CORTEZ, L.A.B. Introdução ao uso da avaliação exergetica em problemas de Engenharia Agrícola: O caso da combustão para geração de potência e da refrigeração por compressão mecânica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 19, 1990, Piracicaba. Anais Piracicaba: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1990. p.203-225.
- GALLO, W.L.R. Análise exergetica de motores a gasolina e álcool. Campinas: UNICAMP, 1990. 258p. Tese Doutorado
- GALLO, W.L.R.; MILANEZ, L.F. Choice of a reference state for exergetic analysis. *Energy*, Oxford, v.15, n.2, p.113-121. February, 1990.
- KOTAS, T.J. The exergy method of thermal plant analysis. London, England: Butterworths Academic Press, 1985. 296p.
- LARSON, D.L.; CORTEZ, L.A.B. Exergy analysis: Essential to effective energy management. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.38, n.4, p.1173-1178, 1995.
- LEAL, P.A.M. Avaliação energética e exergetica de um sistema gerador de processos psicrométricos. Campinas: UNICAMP, 1997. 268p. Tese Doutorado
- LEAL, P.A.M.; CORTEZ, L.A.B.; PARK, K.J. Construção de um sistema gerador de processos psicrométricos. In: CONGRESO IBEROAMERICANO DE AIRE ACONDICIONADO Y REFRIGERACIÓN, 4, 1997, Santiago, Chile. Anais Ditar/CCRC-A.G., 1997. p.203-208.
- MORAN, M. Availability analysis: A guide to efficiency energy use. Englewoods Cliff, NJ: Prentice-Hall, 1982. 260p.
- REYNOLDS, W.C. Thermodynamic properties in SI.. Stanford, CA: DME-Stanford University, 1979. 173p.
- SILVA, R.J. da; NEBRA, S.A. Exergetic analysis of clinker burning process in cement industry. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY SYSTEMS AND ECOLOGY, ENSEC'93, 1993, Cracow. Proceedings... Cracow, Poland, 1993. v.2. p.739-745.
- SZARGUT, J.; MORRIS, D.R.; STEWARD, F.R. Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes. New York: Hemisphere Publishing Co, 1988. 332p.
- WEPFER, W.J.; GAGGIOLI, R.A.; OBERT, E.F. Proper evaluation of available energy for HVAC. *ASHRAE*. *Transactions of the ASHRAE*, Atlanta, GA, v. 85 n.1, p.214-230. January 1979.