

1 Introdução

Este trabalho tem por objetivo desenvolver uma análise termodinâmica e de emissões em uma planta de geração de vapor para a secagem de fermento. O enfoque maior deste estudo está em reduzir as emissões pela redução do uso de combustível fóssil, o óleo BPF¹, pela otimização energética de uma planta de geração de vapor para secagem de fermento. Para tanto, será desenvolvida uma análise energética e exergética da planta de geração de vapor e a verificação do funcionamento da mesma, através de um modelo termodinâmico, em regime permanente, utilizando-se da primeira lei e da segunda lei da termodinâmica.

A análise energética tem como objetivo verificar os pontos da planta onde ocorrem as maiores perdas térmicas através da primeira lei, assim como a análise exergética, verificar onde acontecem as maiores irreversibilidades pela segunda lei da termodinâmica.

1.1

Breve histórico

Nossa atmosfera é um delicado manto de ar protetor envolvendo a terra. O ar está conosco desde o nosso nascimento e não podemos nos separar dele. Ao ar livre podemos nos deslocar por milhares de quilômetros em qualquer direção horizontal, mas se nos deslocarmos apenas por uns oito quilômetros acima da superfície, nos sufocaremos.

Podemos sobreviver sem comida por algumas semanas, ou sem água por alguns dias, mas sem nossa atmosfera, não sobreviveremos mais do que por alguns minutos.

Assim como os peixes estão confinados ao seu meio, que é a água, nós estamos confinados ao nosso oceano de ar. Em qualquer lugar que queiramos ir, ele tem de ir conosco.

¹ BPF – Baixo Ponto de Fluidez

A terra sem atmosfera seria inimaginavelmente fria à noite e desagradavelmente quente durante o dia.

Vivendo na superfície da terra, nós estamos tão adaptados ao nosso meio atmosférico que as vezes esquecemos quão importante é esta substância (Silva, 1998).

1.1.1

Visão Geral da Atmosfera Terrestre

A atmosfera da terra é um fino invólucro gasoso composto principalmente de nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2), com pequenas quantidades de outros gases, tais como vapor d'água (H_2O) e dióxido de carbono (CO_2).

Esse fino manto de ar protege constantemente a superfície e seus habitantes da perigosa radiação ultra-violeta do sol.

1.1.2

Composição da atmosfera

A atmosfera é composta de nitrogênio, que ocupa 78% do volume total e de oxigênio, com cerca de 21% desse volume.

Além do nitrogênio e oxigênio, encontram-se presentes na atmosfera outros gases, como o vapor d'água (gás invisível) e o dióxido de carbono (CO_2), um componente natural da atmosfera que ocupa uma porcentagem pequena, mas importante do volume de ar.

O dióxido de carbono (CO_2) entra na atmosfera principalmente a partir do decaimento da vegetação, mas ele vem também das erupções vulcânicas, da exalação da vida animal, da queima de combustíveis fósseis (tais como carvão e óleo) e do desflorestamento.

A remoção do CO_2 da atmosfera ocorre durante a fotossíntese quando as plantas consomem esse gás para produzir matéria verde.

O dióxido de carbono é importante gás do efeito estufa, assim como o vapor d'água, porque absorvem uma porção da energia infravermelha radiante proveniente da terra.

Podemos definir o efeito estufa como um fenômeno natural de manutenção do calor da terra. Conseqüentemente, como a concentração de CO_2 está

umentando, assim também ocorre com a média global da temperatura do ar à superfície.

A maioria dos experimentos com modelos matemáticos que prevêem as condições atmosféricas futuras estimam que se dobrar a quantidade de (CO_2), isto irá resultar num aquecimento global do ar à superfície de 2º a 5ºC.

O dióxido de carbono e o vapor d'água não são os únicos gases de efeito estufa. Outros gases como o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O), e os clorofluorcarbonos (CFC's) também estão presentes na atmosfera em pequena quantidade e são conhecidos como "gases traço", (Silva, 1998).

Entretanto, o homem está alterando esse quadro, despejando na atmosfera enormes quantidades desses gases todos os anos, por duas principais atividades: a queima de combustíveis fósseis e destruição de florestas, o que pode poderá agravar o efeito estufa e aquecer o planeta além do normal.

Como consequência desta poluição atmosférica podemos destacar ainda a destruição da camada de ozônio pelos gases clorofluorcarbonos (CFC's) e a chuva ácida pela combinação do dióxido de enxofre (SO_2) e o ar. Quando a atmosfera está suficientemente úmida, o SO_2 pode se transformar em finas gotas diluídas de ácido sulfúrico. A chuva que contém ácido sulfúrico corrói metais e superfícies pintadas e torna a água ácida. A chuva ácida é um dos maiores problemas do meio ambiente, principalmente na trajetória dos ventos que vêm das principais regiões industriais.

Em complemento, altas concentrações de SO_2 produzem sérios problemas respiratórios para os seres humanos, tais como bronquites e efizemas e tem efeitos adversos nas plantas.

Podemos definir, então, poluição atmosférica como sendo a presença no ar de substâncias poluentes que possam interferir na saúde do homem, na vida animal ou vegetal, propriedades, nas construções, como prédios, casas, monumentos históricos e no lazer. (Gomes, 2001)

Combater essa ameaça significa eliminar, ou pelo menos diminuir drasticamente, as emissões desses gases. Em outras palavras, a sociedade precisa, de um lado queimar menos petróleo e outros combustíveis fósseis e de outro, parar com o desmatamento no planeta.

A preocupação, portanto, deste trabalho será dada ao efeito estufa como um tema da poluição atmosférica.

Estratégias, como por exemplo a otimização energética de uma planta industrial, devem ser adotadas para reduzir as emissões de carbono para a atmosfera.

O intuito deste trabalho é desenvolver estudos relativos à redução de emissões de gases do efeito estufa CO_2 em chaminés, através do aumento da eficiência térmica da planta de geração de vapor, em caldeiras operando com óleo combustível.

O estudo, como já citado anteriormente, envolve um projeto termodinâmico com base na primeira lei e segunda lei da termodinâmica para a otimização energética e exergética visando a eficiência térmica da planta de produção de vapor de uma indústria para a produção de fermento.

1.2

Revisão bibliográfica

Neste item será apresentada uma revisão bibliográfica sobre plantas de produção de vapor, seus componentes e aplicações.

Costa (1986), apresentou um estudo baseado na segunda lei da termodinâmica onde conceitos de disponibilidade e irreversibilidade são aplicados a trocadores de calor. Foram desenvolvidas equações e aplicadas a vários casos relacionando a irreversibilidade à efetividade do trocador de calor, assim como estabelecidas relações entre o decréscimo de irreversibilidade e custos operacionais. O autor mostrou que não é sempre verdadeiro que o trocador de calor em contra-correntes é menos reversível que o trocador de calor em correntes paralelas devido a um critério baseado na mínima perda de disponibilidade. Este critério indicou, para os dois tipos de trocadores de calor qual deles teve a irreversibilidade mínima. Foi verificado também que a irreversibilidade do trocador tem um ponto máximo, a efetividade do trocador de calor, e não depende do tipo do trocador de calor. Assim, com a utilização da primeira e segunda lei da termodinâmica, foi possível encontrar expressões, através de uma análise teórica, que forneceram a irreversibilidade em trocador de calor. Essa perda de disponibilidade foi conseguida para o caso de ocorrer mudança de fase quando existe condensação e vaporização em função da efetividade, da razão de temperaturas na entrada e da razão entre as taxas de capacidades térmicas. A perda de disponibilidade foi relacionada também a menor área de troca de calor para os trocadores de calor trabalharem de forma mais econômica possível.

Fontoura (1990), desenvolveu a análise exergetica, pela segunda lei da termodinâmica, com o objetivo de promover uma análise mais realista em relação à identificação dos pontos com maiores possibilidades de aperfeiçoamento.

O autor cita que no passado, a análise pela segunda lei foi conhecida como análise de disponibilidade, ou seja, das trocas de energia disponível. Atualmente, verifica-se a predominância da nomenclatura relacionada à propriedade exergia.

A abordagem pela segunda lei permitiu estudar o grau de disponibilidade de cada forma de energia, identificando assim as formas mais utilizáveis e as menos utilizáveis. Esta comparação levou a considerações econômicas, a também chamada análise termoeconômica, em que o custo de cada produto é associado ao respectivo fluxo de exergia.

A análise exergetica neste contexto foi utilizada como uma ferramenta de grande valor por ter sido capaz de localizar os pontos mais fracos do processo, onde ocorreram as maiores perdas de energia disponível e conseqüentemente onde houve mais prejuízo. Este estudo motivou reduzir os rejeitos do combustível por questões ecológicas. Esta redução de emissões foi obtida através do uso otimizado dos recursos energéticos.

A segunda lei determina que em qualquer processo, uma certa parcela de exergia é perdida.

Segundo o autor, não foi necessário saber se o processo é irreversível – já que todos os processos reais o são – mas o grau de irreversibilidade envolvido no processo, reconhecendo os pontos com maior potencial para aperfeiçoamento. Estes pontos justificam maiores investimentos.

Estudos sobre análises energética e exergetica vem sendo realizadas com o intuito de contribuir com um melhor gerenciamento de sistemas já em funcionamento.

Nebra e Silva (1997), desenvolveram um trabalho baseado principalmente nos trabalhos de Kotas (1985) e Szargut et al (1988).

Neste trabalho, foi realizada uma análise de eficiência térmica baseada na segunda lei da termodinâmica pela qual foi permitido conhecer os equipamentos nos quais as melhorias de projeto tenderam a ser mais significativas. O pré-calcinador apresentou maior eficiência térmica comparado aos demais processos industriais de produção de clínquer, ao qual recebeu 60% do calor do forno necessário ao processo. Na etapa de calcinação a geração de

irreversibilidade diminuiu (Silva e Nebra, 1994a), (Silva e Nebra, 1994b) devido a intensa troca de calor dos gases com os sólidos em suspensão no pré-calcinador. Verificou-se que o sub-sistema constituído pelo forno rotativo foi a parte do processo onde ocorreram as maiores irreversibilidades. A maior eficiência racional (exergia) foi obtida no processo com forno rotativo dotado de pré-aquecedor de ciclones, quando se utilizou um combustível com maior teor de cinzas. O mesmo ocorreu com o forno dotado de pré-calcinador alcançando-se níveis maiores de exergia. Desta maneira, foi constatado que os fornos de via seca são os mais apropriados para o uso de combustíveis com maior teor de cinzas.

Nebra *et al* (1998) desenvolveram uma descrição do sistema de cogeração de uma usina açucareira, calculando, além das propriedades termodinâmicas dos diferentes fluxos do sistema, os balanços de massa, energia e exergia.

Uma comparação das eficiências de primeira lei e segunda lei mostrou a utilidade desta última como elemento importante na decisão de melhorias dos esquemas térmicos ao evidenciar os equipamentos de maiores irreversibilidades e conseqüentemente a perda de oportunidades de maior produção e eficiência.

Foi realizada neste trabalho, uma análise de primeira lei e segunda lei no sistema de cogeração da usina visando contribuir com um melhor gerenciamento de sistemas já em funcionamento identificando as fontes de maiores irreversibilidades do sistema.

Um resultado obtido neste trabalho, considerado importante no gerenciamento deste sistema, mostra que a eficiência das caldeiras é de grande importância no desempenho global onde uma alta eficiência é condição necessária (primeira lei). As eficiências de segunda lei obtidas limitam o nível de pressão da caldeira para gerar energia elétrica. Um aumento significativo na geração só poderá ser obtido com a elevação dos níveis de pressão exercidos. As baixas eficiências dos acionamentos mecânicos com relação a questão das perdas energéticas e exergéticas sugerem a substituição por acionamentos elétricos de boa eficiência. Finalmente, é necessário uma análise do processo de fabricação de açúcar e álcool visando reduzir o consumo de vapor, com objetivo de a energia elétrica ser um produto a mais da planta.

Balestieri *et al* (1999) apresentam uma revisão do estado da arte no Brasil e no mundo que abordou temas de metodologias de análise, incluindo a análise exergética, termoeconômica e otimização de sistema, mencionando o software

comercial EES² para a aplicação das metodologias. Este trabalho apresenta reflexões sobre o ensino e aplicação dos conceitos de exergia e termoeconomia em cursos de graduação, pós-graduação e educação continuada, como ferramenta de análise e otimização de processos de conversão de energia. As metodologias para análise de sistemas energéticos destacam como ferramenta a associação dos fundamentos da segunda lei com elementos de análise econômica dando origem à análise termoeconômica. Esta abordagem, baseada ou não no emprego de modelos de otimização pode ter como objetivo minimizar os custos operacionais, a emissão de poluentes ou as irreversibilidades do sistema. Um software comercial disponível para aplicação neste tipo de análise é o EES que permite cálculos rápidos de um grande número de equações e é muito usado em cursos de graduação, pós-graduação e extensão. Da experiência acumulada em análise exérgica e termoeconômica de plantas industriais podemos destacar a possibilidade que esta análise fornece de se identificarem os equipamentos -componentes- do processo que são os principais responsáveis pela ocorrência de ineficiências na planta industrial; a dificuldade de levantamento e determinação de parâmetros de operação- nominais ou efetivos- tais como pressão, temperatura, composição dos fluxos nos pontos necessários para a realização das análises requeridas. Em relação ao ensino de conceitos de exergia e termoeconomia a dedicação dada aos cursos de graduação de termodinâmica à conceituação e aplicação da propriedade de entropia e aos balanços entrópicos é menor que aquela dada aos balanços de energia. Talvez, por este motivo, a utilidade da segunda lei continua sendo um ponto obscuro para a grande maioria dos engenheiros. A grande vantagem do emprego do conceito de exergia é que através da quantificação da exergia destruída, podemos evidenciar as ineficiências dos processos em reduzir a utilidade dos insumos energéticos utilizados numa planta industrial. O interesse pelo conceito de exergia será aumentado à medida que for associado à quantificação do impacto ambiental provocado pelos rejeitos de processos ambientais. No Brasil, as aulas de termodinâmica do professor Richard Bran, já buscavam apresentar o conceito de exergia e foram estes os primeiros passos nesta metodologia termodinâmica.

Em relação à energia na agricultura, Leal *et al* (2000) apresentaram a aplicação da metodologia de avaliação dos processos psicrométricos utilizando a

² Engineering Equation Solver

definição combinada das primeira e segunda leis da termodinâmica para gerar processos psicrométricos.

Para efetuar as análises energética e exergética em cada processo gerado pelo sistema gerador de processos psicrométricos, variaram-se as vazões e as potências elétricas requeridas pelos diferentes sistemas de condicionamento do ar e as temperaturas do bulbo seco e de bulbo úmido de pontos estratégicos dentro e fora do volume de controle.

Foi provado que é tecnicamente viável esta metodologia de avaliação pela primeira e segunda lei da termodinâmica. Foi constatado que a avaliação baseada na primeira lei da termodinâmica, avaliação energética, em quase todos os processos gerados pelo sistema gerador, apresentou resultados menos abrangentes que a avaliação exergética. Pode-se concluir também que os equipamentos acoplados ao sistema gerador apresentaram alto índice de irreversibilidade porque foram dimensionados apenas para a finalidade de atingir condição psicrométrica específica e não de serem eficientes do ponto de vista termodinâmico.

Como discussão deste trabalho, em quase a totalidade dos processos psicrométricos, a eficiência energética foi sempre superior à eficiência exergética. Pode-se concluir que mesmo correta a avaliação energética foi menos eficaz na identificação da real capacidade de um sistema de realizar trabalho indicando que processos e sistemas operavam com altas eficiências, não requerendo melhorias técnicas. Porém, quando se fazia a análise exergética se verificava a distância de uma eficiência satisfatória. A conclusão principal deste trabalho é que a metodologia de avaliação de sistemas e processos baseados na primeira e segunda leis da termodinâmica combinadas foi adequada para analisar processos psicrométricos gerados pelo sistema.

Quando da avaliação exergética, os processos psicrométricos gerados pelo sistema, na sua maioria apresentaram valores elevados de irreversibilidade. Estes valores foram atribuídos ao fato de que os equipamentos de aquecimento e resfriamento do ar foram super dimensionados para gerar condições psicrométricas precisas do ar e não com intuito de serem eficientes do ponto de vista termodinâmico. Por fim, pode-se concluir que as avaliações energéticas e exergéticas podem ser perfeitamente aplicadas em estudos com produtos agrícolas sem qualquer prejuízo para ambas as metodologias.

Nebra (2001), apresentou análise de um sistema constituído por uma caldeira de vapor, um secador de bagaço e um pré-aquecedor de ar. Os cálculos

incluíram todas as propriedades termodinâmicas dos fluxos envolvidos, assim como os balanços de massa, energia e exergia.

A obtenção da eficiência pelo sistema permitiu determinar o consumo de bagaço em cada caldeira durante a safra.

A determinação detalhada das eficiências das caldeiras visou a formulação de estratégias para melhor aproveitamento do combustível e a determinação da eficiência do sistema permitiu determinar o consumo de combustível.

Nebra e Modesto (2001), desenvolveram um estudo sobre a análise energética e exérgica global da planta e dos equipamentos principais que a compõem para um sistema de cogeração de potência com aproveitamento de gases siderúrgicos. Foram indentificados as possíveis fontes de irreversibilidades do sistema através dos balanços de massa, energia e exergia possibilitando uma avaliação do desempenho térmico da planta, permitindo identificar os pontos para melhorias e aumento da eficiência.

As conclusões obtidas neste estudo verificaram a alta eficiência energética das caldeiras bem como das turbinas. Nos demais componentes, como trocadores de calor, condensadores etc, verificou-se uma eficiência energética satisfatória.

Em relação à geração de irreversibilidades, os resultados mostraram que a caldeira foi o principal responsável seguido das turbinas e o restante da irreversibilidade do sistema foi destinado ao condensador.

Em relação à exergia, foi permitido avaliar, baseado na segunda lei da termodinâmica, o quanto de energia foi perdida em relação à energia que entra (Kotas, 1995; Bejan et al; 1995).

Modesto *et al* (2001) desenvolveram um trabalho sobre otimização de um sistema de cogeração com turbina a gás com caldeira de recuperação, para um pólo industrial na região nordeste. Os ciclos simples e Stig produziam energia elétrica e vapor para ser injetado na câmara de combustão, atendiam a demanda térmica interna e vendiam o excedente a consumidores potenciais. A operação do sistema foi maximizada através da otimização da função objetivo - receita * despesa, venda da energia elétrica e vapor foram consideradas receita e como despesa, o custo do combustível e água desmineralizada de reposição.

Os resultados apresentaram soluções ótimas para os dois ciclos (simples e Stig). A solução ótima para o ciclo simples foi limitada pela vazão máxima de ar no compressor, enquanto no Stig, pela disponibilidade de água de reposição. Essas diferentes limitações resultaram em um lucro maior para o ciclo simples. Essa

solução ótima se refere à quantidade de energia elétrica para a venda praticamente idêntica ao consumo de combustível. O ciclo simples obteve maior lucro pela solução ótima devido ao excedente de vapor disponível a venda no ciclo simples ter sido maior que o ciclo Stig.

Se a disponibilidade da água de reposição fosse maior implicaria maior produção de vapor podendo atingir níveis maiores, a quantidade de energia elétrica e vapor para a venda seriam maiores e o lucro bruto também. Já o ciclo simples está limitado pela vazão máxima de ar no compressor que está limitado pelas restrições do equipamento ao qual impossibilita mudanças operacionais.

Prieto *et al* (2001), analisando o custo exergético do sistema de cogeração de uma usina açucareira, determinaram as perdas de exergia e apontaram a importância da eficiência da segunda lei da termodinâmica na decisão de melhoras no esquema térmico apontando os equipamentos de maior irreversibilidade. Neste trabalho foram identificadas as fontes de maiores irreversibilidades do sistema através de uma análise de segunda lei como passo prévio à avaliação de custos exergéticos dos principais produtos do sistema e os fluxos internos. Como análise de resultados do custo exergético, a introdução do sistema de extração como um volume de controle mereceu destaque, por não ter sido tratado anteriormente (Barreda, 1999). Como tratamento metodológico, a determinação da eficiência da primeira lei da termodinâmica para caldeira, junto com uma análise energética do sistema de geração de vapor é explicada em detalhes por Sanchez *et al* (2001). Foi considerado o sistema de geração de vapor subdividido em seus equipamentos componentes: secador de bagaço, caldeira e pré-aquecedor de ar e esta divisão facilita determinar os valores de eficiência da primeira lei e segunda lei para cada caldeira, fato que inclui a determinação da exergia do bagaço. Considerando a extração dentro do volume de controle e os produtos desse controle como bagaço produzido e o caldo para a produção de açúcar, uma equação mostrou a igualdade dos custos exergéticos unitários destes produtos cujo resultado está acima da unidade. O custo exergético unitário da água de alimentação está bem acima do custo do vapor devido a fatores como as perdas de carga e calor em todo circuito de vapor que fazem o retorno de condensado carregar as perdas; o alto custo exergético unitário do vapor, tanto na saída da válvula redutora de refino, quanto na válvula redutora de fabricação; as irreversibilidades inerentes ao desareador e as bombas de retorno de condensado e de alimentação respectivamente.

O equipamento de geração de energia mecânica apresenta elevados valores de custo exergético unitário devido fundamentalmente às irreversibilidades próprias destes turbomecanismos. Algumas partes da tubulação dos turboexaustores da caldeira não têm isolamento e favorecem à perda de calor para o meio ambiente que reverte nos custos exergéticos das potências produzidas nos turboexaustores. O custo exergético do vapor na saída da válvula redutora torna mais caro o vapor que por fim vai para processo. Este trabalho permitiu uma avaliação termodinâmica de um sistema de cogeração de uma usina sucro-alcooleira em funcionamento e da análise de custos exergéticos que possibilitaram determinar o custo por unidades de potência dos principais fluxos da planta e fluxos internos. Esta análise resultou no ponto de partida para uma avaliação econômica mais aprimorada que permita encontrar o custo dos principais produtos do sistema em termos monetários. A análise exergética permitiu determinar o custo exergético do combustível utilizado em cada caldeira. Assim, no nível de geração de vapor, foi possível determinar as diferenças entre os custos exergéticos unitários do vapor produzido e os que podem ser consequências de um inadequado regime de operação ou devido a outras irreversibilidades, como a caldeira 3, cujo custo exergético é superior aos correspondentes das caldeiras 1 e 2.

Carril *et al* (2001), apresentam uma análise termodinâmica do sistema de geração de vapor de uma usina açucareira brasileira que é auto-abastecida de energia elétrica e vapor para processo. O sistema é constituído por uma caldeira de vapor, um secador de bagaço e um pré-aquecedor de ar.

Este trabalho apresentou uma metodologia para determinação experimental da eficiência do sistema ao qual permite determinar o consumo de bagaço na caldeira. Todas as propriedades termodinâmicas dos fluxos envolvidos foram incluídas nos cálculos para cada equipamento separadamente, assim como os balanços de massa, energia e exergia. Foi determinada a eficiência de primeira e de segunda lei de cada equipamento assim como os custos exergéticos de cada um dos fluxos. Foi enfatizada a importância do custo exergético de cada fluxo, analisando a relação entre o custo exergético do bagaço e o ar pré-aquecido com o vapor gerado. Os métodos mais comuns para determinar a eficiência de um processo de conversão de energia são aqueles baseados na primeira lei da termodinâmica, porém o resultado seria uma relação entre energias e nem toda energia presente na entrada de um processo é utilizável (Torres, 1999). É por isso que a aplicação da segunda lei, através da

análise exergética, permite uma verdadeira avaliação do desempenho termodinâmico de um processo de conversão energética. Nesta divisão de cada equipamento, os resultados indicam, em relação às eficiências de primeira e segunda leis, que a caldeira 2 apresenta melhores índices de desempenho. O secador de bagaço desta caldeira destaca-se também com bom desempenho, com o melhor aproveitamento energético de gases. Já o pré-quecedor de ar apresenta deficiências. A caldeira 3 apresenta alta irreversibilidade devido a perda de calor para o meio que implica um aumento do custo exergético unitário dos gases. O nível de secagem deficiente no secador da caldeira 3 é a causa do aumento do custo exergético do bagaço na saída do secador. Conclui-se que a divisão efetuada nos geradores de vapor pode ser uma ferramenta de muita utilidade nas usinas sucro-alcooleiras. A aplicação da segunda lei e a utilização do conceito de custo exergético permitiram uma avaliação mais completa das perdas envolvidas na geração de vapor, assim como os insumos da caldeira como ar quente e o bagaço e do desempenho dos componentes que integram o gerador de vapor.

Sanches *et al* (2002), apresentaram resultados de uma análise termoeconômica para o sistema de cogeração de uma usina de açúcar brasileira, onde o bagaço de cana foi usado como óleo combustível e a eficiência exergética foi avaliada. A exergia foi calculada a partir do custo exergético de cada um dos fluxos no processo. Dois tipos de avaliação de custos foram considerados para o bagaço, um interno, baseado na exergia de cada fluxo e um externo baseado no preço de mercado do bagaço. Por fim, foram apresentadas as influências do preço de mercado do bagaço no custo financeiro da energia mecânica e elétrica assim como o processo de calor e o caldo da cana de açúcar.

Como resultados deste trabalho destacam-se:

- A análise exergética envolvendo elementos econômicos para avaliar as diferenças entre resultados exergético e monetário para o vapor produzido em cada boiler indicam que o regime operacional não adequado no bagaço seco e o coeficiente de ar excessivamente alto como fatores que tornaram pior este resultado, principalmente no terceiro aquecedor.

- A inclusão do sistema de extração do caldo do açúcar nas análises exergética e monetária permite uma real avaliação de todo sistema de cogeração. Os resultados obtidos para o custo do bagaço são diferentes do preço de mercado.

- O uso de duas válvulas de redução implicam um maior custo de vapor usado no processo de fabricação de açúcar. Esses aumentos são devido a irreversibilidade envolvida com a passagem de vapor através das válvulas de redução. Aumentos similares podem ser observados nos custos associados com a energia produzida no turbomecanismo do difusor, aos quais são conseqüências direta das baixas eficiências.

1.3

Objetivos

Este trabalho tem por objetivo desenvolver uma análise termodinâmica e de emissões em uma planta de geração de vapor para a secagem de fermento. Será feita a otimização energética da planta de geração de vapor no intuito de reduzir as emissões através da redução do uso do óleo combustível BPF, contribuindo dessa forma com a diminuição dos gases poluentes que contribuem para o efeito estufa. A planta de geração de vapor será mostrada no capítulo 2.

Este trabalho visa analisar os componentes da planta de produção de vapor para a secagem do fermento, em relação à eficiência térmica, verificando os componentes da planta que possuem maiores irreversibilidades e sugerir melhorias em condições de operacionalização. A planta de geração de vapor é constituída de um resfriador à base de salmoura, um secador de *spray* de brometo de lítio, dois trocadores de calor, um secador de leito fluidizado um exaustor e uma caldeira, conforme esquema apresentado na Figura 2.1.

Foi utilizado o programa de computador EES, para a realização da análise termodinâmica da planta, considerando-se como fluido de trabalho, o ar atmosférico (ar seco e vapor d'água) e o vapor de água produzido na caldeira.

1.4

Conteúdo do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos.

No capítulo 2 deste trabalho é apresentada a descrição da instalação. São descritos os equipamentos utilizados no ciclo tais como resfriador, secador de

spray de brometo de lítio, pré-aquecedor, aquecedor, secador de leito fluidizado e exaustor.

São também levantadas informações sobre a instrumentação da planta assim como a descrição do processo de secagem de todo o ciclo de vapor (ar seco mais vapor d'água).

No capítulo 3 é descrita a análise energética e exergética da planta. São empregadas as equações de conservação de energia - primeira lei da termodinâmica, a conservação de massa - equação da continuidade e a equação da segunda lei da termodinâmica e é apresentado o cálculo das propriedades termodinâmicas da mistura ar seco e vapor d'água.

No capítulo 4, são apresentados os resultados medidos na planta e outros calculados com a análise teórica desenvolvida no capítulo anterior.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.