

Estudo Exergético do Sistema de Vapor de uma Indústria de Celulose

Márcio Luís Doracio Mendes¹ e José Vicente Hallak d'Angelo²

1 - Departamento de Produção de Celulose – Ripasa Celulose e Papel S.A.

Caixa Postal 254 – CEP: 13465-000 – Americana – SP – Brasil

Telefone: (19) 2108-3274 – email: marciomendes@am.ripasa.com.br

2 - Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos, Faculdade de Engenharia Química –

Universidade Estadual de Campinas – Caixa Postal: 6066 – CEP: 13083-852 – Campinas – SP –

Brasil. Telefone: (19) 3521-3950 – Fax: (19) 3521-3894 – email: dangelo@feq.unicamp.br

RESUMO – A indústria brasileira de celulose e papel tem grande destaque no cenário internacional e vive um momento de implantação de grandes projetos de novas unidades e também de expansão da capacidade produtiva já existente. O custo energético tem grande influência no custo de produção da celulose e uma análise da qualidade da distribuição da energia é muito importante na avaliação do desempenho do processo, a qual pode ser feita por meio de um estudo da distribuição (balanço) de exergia no processo. Assim, este trabalho tem como objetivo desenvolver um estudo para avaliar o desempenho exergético do sistema de vapor de uma fábrica brasileira de celulose e papel, visando a identificação de perdas no processo e a busca de alternativas que minimizem estas perdas e também o custo agregado ao consumo energético. A metodologia adotada consistiu em obter dados industriais reais, que foram tratados adequadamente, para então desenvolver uma simulação do processo industrial, utilizando um simulador comercial (Hysys, versão 3.2 da Aspen Technology Inc.), validando esta simulação com os dados reais, em seguida foi feita uma análise exergética do sistema de vapor e realizadas simulações a fim de identificar e quantificar as perdas de exergia.

ABSTRACT – Brazilian pulp and paper industry has great emphasis on the international scene and lives a time of deployment of large projects of new units and also the expansion of existing productive capacity. The energetic cost has great influence on the cost of pulp production and an analysis of the quality of energy distribution is very important in evaluating process performance. This analysis may be performed by means of an exergetic analysis (exergy balance). This paper aims to develop a study to evaluate exergetic performance of a steam system of brazilian pulp and paper mill, in order to identify exergetic losses in the process, searching for alternatives that minimize these losses and also the cost associated with energy consumption. The methodology used consisted in obtaining real industrial data, that were adequately treated and then a simulation of the industrial process was developed, using a commercial simulator (Hysys, version 3.2 from Aspen Technology Inc.), validating this simulation with real data and then an exergetic analysis of the system vapor was performed to identify and quantify the exergetic losses in the process.

Palavras-chave: celulose; exergia; simulação, vapor, energia.

Keywords: cellulose; exergy; simulation; vapor; energy.

1. INTRODUÇÃO

A indústria brasileira de celulose possui grande destaque no cenário internacional, com tecnologia de ponta e grande vantagem competitiva em relação aos seus competidores devido ao baixo custo de sua principal matéria-prima, a madeira de eucalipto. Segundo dados de 2006 da Bracelpa (Associação Brasileira de Celulose e Papel) o Brasil é o 6^o maior produtor mundial de celulose produzindo atualmente 11,2 milhões de ton/ano. Em termos energéticos, a indústria de celulose brasileira consome aproximadamente 11% do total do consumo industrial (Ministério de Minas e Energia, 2006).

A quantidade de energia consumida no setor é bastante significativa, sendo o custo da energia térmica relevante na composição do custo do produto final. A fim de manter o atual ritmo de crescimento e desenvolvimento, a indústria nacional precisa investir cada vez mais em processos que operam de modo otimizado, principalmente no que diz respeito ao uso adequado de matrizes energéticas e dos sistemas térmicos, de forma a reduzir o custo operacional, conseqüentemente, tornando o produto final ainda mais competitivo no mercado internacional.

Buscando alternativas que otimizem o processo, este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho do sistema de vapor da Ripasa Celulose e Papel, procurando estudar a forma de distribuição da qualidade da energia nos equipamentos e correntes que compõem este sistema, identificando e quantificando os principais pontos de perda de qualidade dessa energia (exergia). O sistema de vapor estudado neste trabalho considerou duas caldeiras, uma de gás natural e outra de biomassa e também os coletores de calor e turbinas que compõem o sistema, buscando levantar alternativas para redução do consumo de combustível na planta e também para redução de perdas exérgicas em equipamentos do sistema.

2. DESCRIÇÃO DO PROCESSO

O processo kraft de produção de celulose no Brasil tem como principal matéria-prima a madeira de eucalipto, que passa por vários processos consecutivos, onde as fibras de celulose contidas na madeira são separadas entre si, lavadas, branqueadas e extraídas na forma de pasta a 90% de teor seco. Nas diversas etapas de produção há consumo de vapor como fonte de energia térmica e, além disso, sistemas de vapor (caldeira, coletores e turbinas) são utilizados não só para gerar vapor de processo, mas principalmente para gerar energia elétrica e recuperar produtos químicos que são reciclados no processo. Este trabalho concentra-se no sistema de vapor de duas caldeiras do processo: gás natural e biomassa e a seguir é apresentada uma descrição mais detalhada desses sistemas.

2.1. Sistema de Geração de Vapor (Caldeira a Gás Natural)

O sistema de geração de vapor da caldeira a gás natural é descrito de acordo com o esquema apresentado na Figura 01. A corrente [16] de água tratada para caldeiras é bombeada, gerando a corrente [01] de água a alta pressão, a qual é pré-aquecida no condensador de topo (TC01) por uma corrente de vapor saturado [03], proveniente do balão de vapor. A corrente de água pré-aquecida [02] alimenta o balão de vapor, sendo uma pequena parte [5] purgada do sistema para a descarga de impurezas do balão de vapor e o restante transforma-se em uma corrente de vapor saturado [15]. A corrente de condensado de vapor [4] formada no condensador de topo-TC01 é usada para ajuste de temperatura do vapor superaquecido [07] no dessuperaquecedor, formando a corrente [08] de vapor da caldeira. Na fornalha ocorre a combustão de gás natural [09] com uma corrente de ar atmosférico [12] que é pré-aquecida no aquecedor de ar (TC02), formando a corrente [11] que alimenta a fornalha. Esse pré-aquecimento é feito pela corrente [10] de gases da combustão provenientes da fornalha [14], que passam pelo superaquecedor [17] e balão de vapor, e alimentam o TC02, formando em seguida uma corrente [13] de gases resfriados que são enviados para a atmosfera. Uma parcela do vapor saturado produzido no balão de vapor [03] é usada para pré-aquecer a água de caldeira [01] e a maior parte dessa corrente de vapor é enviada para o superaquecedor [06].

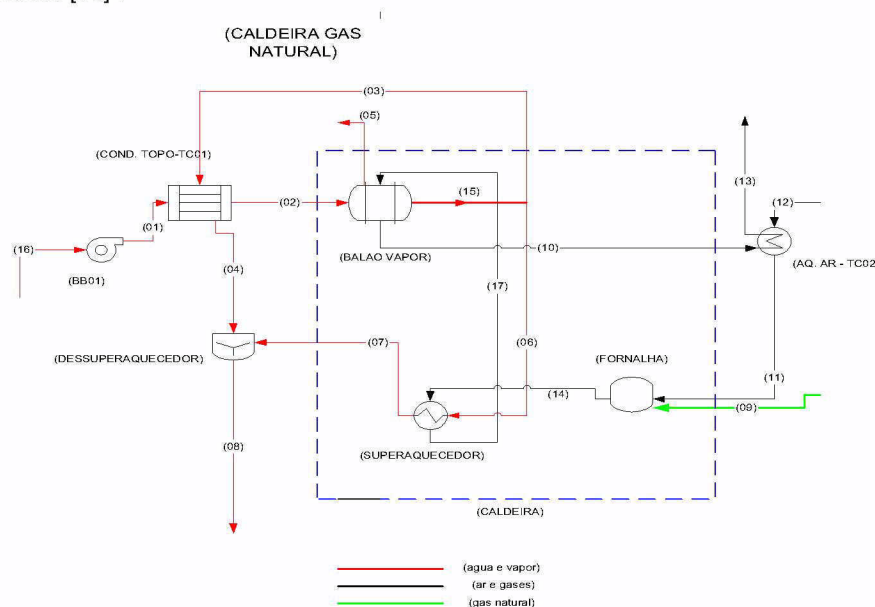


Figura 1 - Sistema de Geração de Vapor (Caldeira a Gás Natural).

2.2. Sistema de Geração de Vapor (Caldeira a Biomassa)

O sistema de geração de vapor da caldeira de biomassa é descrito de acordo com o esquema apresentado na Figura 2. A corrente [71] de água tratada para caldeiras é bombeada, constituindo a corrente [23] a qual é pré-aquecida no condensador de topo (TC04) por uma corrente de vapor saturado [26], proveniente do balão de vapor. A corrente de água pré-aquecida [24] alimenta o economizador e o balão de vapor da caldeira, sendo uma pequena parte purgada [31] do sistema para a descarga de impurezas do balão de vapor e o restante transforma-se em uma corrente de vapor saturado [70]. A corrente de condensado de vapor formado no condensador de topo-TC04 [27] é usada para ajuste de temperatura do vapor superaquecido [30] no dessuperaquecedor, formando a corrente [29] de vapor da caldeira.

Na fornalha ocorre a combustão de madeira [32], metanol [19] e gases diluídos de processo [35], com uma corrente de ar atmosférico [34] que é pré-aquecida no aquecedor de ar-TC03 juntamente com a corrente de gases [35], formando a corrente [22] que alimenta a fornalha. Esse pré-aquecimento é feito pela corrente [20] de gases da combustão provenientes da fornalha [63], que passam pelo superaquecedor [64], balão de vapor [67], e alimentam o TC02, formando em seguida uma corrente [21] de gases resfriados que são enviados para a atmosfera. Na fornalha temos também uma corrente de ar atmosférico de combustão [61]. Uma parcela do vapor saturado produzido no balão de vapor [26] é usada para pré-aquecer a água de caldeira [23] e a maior parte dessa corrente de vapor é enviada para o superaquecedor [28].

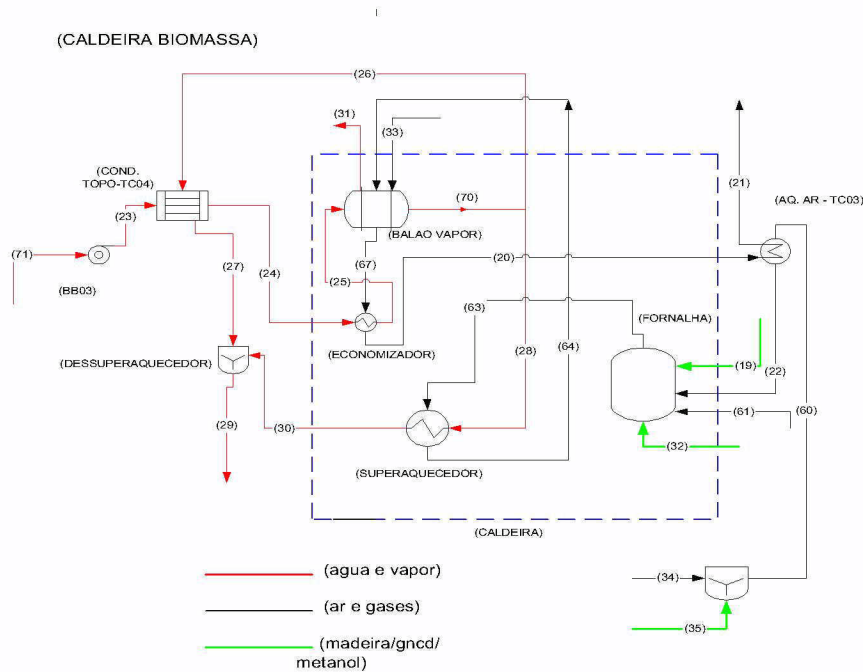


Figura 2 – Sistema de Geração de Vapor (Caldeira de Biomassa)

2.3. Sistema de Distribuição de Vapor (Coletores)

O sistema de vapor é descrito conforme o esquema apresentado na Figura 03. O sistema recebe as correntes [8] e [9] de vapor gerado nas caldeiras descritas anteriormente e também as correntes de vapor ([36], [37] e [38]) gerado nas caldeira de recuperação química, as quais não são objeto deste estudo. A maior parte deste total de vapor gerado [39] passa por um turbo gerador, com geração de energia e descarte de vapor processo em 12 bar [57] e 04 bar [50]. Estas correntes de vapor de saída da turbina possuem ajuste de temperatura com água desmineralizada para uso em processo pelas correntes [53] e [54].

O sistema também possui 03 válvulas redutoras para ajuste de pressão de vapor, sendo uma redutora 42/12 bar [40], uma redutora 42/4 bar [41] e uma redutora 12/4 bar [42]. As correntes que passam pelas redutoras possuem ajuste de temperatura com água desmineralizada [44], [48] e [46] para uso em processo. O sistema também possui um acionamento de ventilador de exaustão [58] e a corrente de saída deste sistema segue para o sistema de 04 bar [59]. As correntes de vapor de processo são de 12 bar [55] e 04 bar [56], não serão objeto deste estudo.

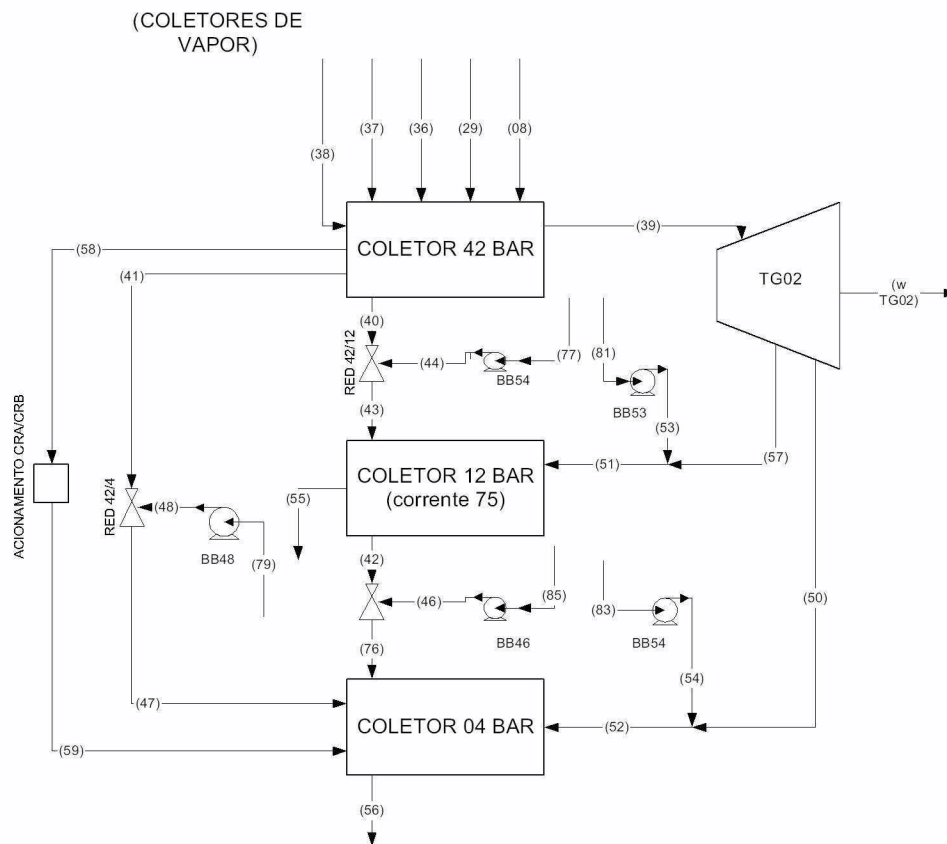


Figura 3- Sistema de Distribuição de Vapor (Coletores de Vapor).

3. METODOLOGIA

3.1 – Coleta de Dados do Processo

Para a simulação dos sistemas descritos, foram coletados dados reais do processo (temperatura, pressão e vazão) os quais representam médias históricas envolvendo um período de 6 meses, considerando operação contínua do processo, para os quais foram eliminados os dados relacionados aos transientes de partidas e paradas e também os conjuntos de dados que representavam um comportamento anormal do processo. Desta forma foram obtidos dados que representassem uma condição de estabilidade muito boa da planta. Como a Ripasa possui uma fábrica de celulose integrada com a fábrica de papel muitos dados referentes a transientes foram retirados da análise.

Considerando estes dados obtidos após o tratamento, foram utilizados os seguintes dados principais:

- pressão de vapor gerado: 42 bar
- vazão de vapor gerado: 410 ton/h (28% nas caldeiras a gás e biomassa)
- pressão de vapor de processo: 12 e 04 bar
- potência para geração de energia elétrica: 27,7 MW.

3.2 - Simulação do Processo

A partir dos dados industriais que foram coletados e tratados, foi desenvolvida uma simulação dos sistemas descritos, utilizando o software Hysys (versão 3.2 da Aspen Technology), para realizar os balanços de massa e energia do processo. O simulador foi usado também como ferramenta para obter as grandezas termodinâmicas (entalpia, entropia, etc), necessárias à análise exergética do sistema de vapor. O pacote termodinâmico selecionado para obter estas grandezas foi a equação de estado de Peng-Robinson.

A validação da simulação foi feita com os dados de processo, sendo que alguns dados foram usados como dados de entrada e os dados obtidos da simulação foram comparados com os dados reais do processo, como houve uma diferença pequena entre estes dados (não superior a 10% na maioria dos dados comparados) a simulação foi considerada satisfatória.

Os dados principais de entrada para o simulador da caldeira a gás foram: composição de gás natural referenciadas dos dados da Comgás, condições de vazão, temperatura e pressão da água para caldeira e vapor produzido e pressão do balão de vapor.

Os dados de entrada principais da caldeira a biomassa foram: composição dos combustíveis (madeira, metanol e gases diluídos de processo), condições de vazão, temperatura e pressão da água para caldeira e vapor produzido e pressão do balão de vapor.

Para os coletores de vapor, foram estabelecidas todas as variáveis das correntes de vapor das caldeiras da fábrica, pressão de vapor de processo e eficiência da turbina de 75%. Para os cálculos de balanço exergético as grandezas termodinâmicas geradas nas simulações foram usados em uma planilha eletrônica, onde eram calculados os valores da exergia de cada corrente do processo.

3.3 – Balanço Exergético

A análise exergética, foi a ferramenta termodinâmica escolhida para avaliar o desempenho do sistema de vapor, por meio da localização e quantificação das perdas exergéticas, devido às irreversibilidades do processo. Esta ferramenta já foi utilizada com sucesso por diversos autores em trabalhos semelhantes. Cziela (2006), Tsatsaronis (2002) e Colpan (2006) fizeram análises exergéticas de sistemas térmicos semelhantes ao deste trabalho. Torres (2001), fez a análise exergética de vários subsistemas de um sistema térmico e também a análise exergética de fluxo em várias condições de processo.

Segundo Kotas (1995), a exergia é o trabalho máximo que pode ser obtido a partir de uma dada forma de energia utilizando parâmetros do ambiente como referência e para Tsatsaronis (2006), a exergia de um sistema termodinâmico é o máximo trabalho útil teórico obtido quando um sistema é levado ao completo equilíbrio termodinâmico com o ambiente enquanto o sistema interage apenas com o ambiente. Desta forma, quanto menor a perda exergética maior o potencial para a realização de trabalho.

A exergia total de um sistema (Tsatsaronis, 2006), consiste das seguintes parcelas: exergia física, relacionada com os desvios de temperatura e pressão de um sistema em relação ao ambiente; exergia química, relacionada com os desvios da composição de um sistema em relação ao ambiente; exergia cinética, relacionada a velocidade do sistema em relação ao ambiente e exergia potencial, relacionada com a elevação do sistema em relação ao ambiente.

A equação geral de balanço de exergia para volumes de controle em regime permanente é dada pela Equação 1 (Moran e Shapiro, 2002), na qual o primeiro termo representa a taxa de exergia devido a transferência de calor, o segundo termo a taxa de exergia devido a transferência de trabalho, os dois seguintes termos representam as taxas de exergia de fluxo de entrada e saída do volume de controle e o último termo representa a taxa de destruição de exergia.

$$\sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{VC} + \sum_e \dot{m}_e ex_e - \sum_s \dot{m}_s ex_s - \dot{E}x_d = 0 \quad (1)$$

Neste trabalho todos os equipamentos foram considerados adiabáticos e portanto o balanço de exergia pode ser representado pela Equação 2.

$$-W_{VC} + \sum_e \dot{m}_e [(h_e - h_o) - T_o (s_e - s_o)] - \sum_s \dot{m}_s [(h_s - h_o) - T_o (s_s - s_o)] - \dot{E}_d = 0 \quad (2)$$

na qual \dot{m}_e é o fluxo de massa de entrada, \dot{m}_s é o fluxo de massa de saída e os termos entre colchetes representam as exergias de fluxo das correntes de entrada e saída. O primeiro termo da equação representa a transferência de exergia associada ao trabalho e o último termo representa a taxa de exergia que é destruída no processo. As variáveis com o índice "o" representam as grandezas do sistema no estado morto.

A variação de exergia de fluxo em um determinado sistema de controle, considerando as correntes de entrada e saída, podem ser obtidas pela Equação 3.

$$ex_s - ex_e = (h_s - h_e) - T_o (s_s - s_e) \quad (3)$$

na qual h é a entalpia específica da corrente, T_o é a temperatura de referência do estado morto, s é a entropia específica da corrente e os índices "s" e "e" representam respectivamente as correntes de saída e entrada no volume de controle.

A exergia química da reação de combustão é calculada pela Equação 4. Neste equação são necessários os valores de exergia padrão dos componentes envolvidos nas reações, onde foi utilizado o modelo II usados por Bejan, et al. (1996).

$$e^{-cH} = \sum x_k * e_k^{-cH} + R T_o \sum x_k * \ln(x_k) \quad (4)$$

sendo e^{-cH} é a exergia da corrente, x_k é a fração molar do componente k na corrente e e_k^{-cH} é a exergia padrão do componente k, R é a constante universal dos gases.

Vale salientar que neste trabalho foi utilizado como estado de referência os valores: $T_o = 298,15$ K e $P_o = 101,3$ kPa.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma vez concluídas e validadas as simulações do sistema de vapor da empresa, foram feitos os balanços exergéticos em cada um dos componentes do sistema, a fim de identificar e determinar onde ocorrem as principais perdas. Este balanço exergético permitirá uma melhor compreensão do sistema, com o objetivo de, futuramente, propor alterações nas variáveis operacionais que visem a redução significativa dessas perdas. Estas perdas exergéticas são apresentadas nas Figuras 01 a 04 na forma de uma distribuição percentual das mesmas, para as caldeiras a gás natural e biomassa.

Em termos comparativos entre as 02 caldeiras algumas observações podem ser feitas:

- as perdas de exergia na fornalha são muito maiores que nos outros locais da caldeira, com valores entre 60 e 68% do total. Toda atenção deve ser dada a esta operação visando não só a continuidade operacional mas também ajustes de ar, tipos de queimadores para os combustíveis, temperaturas de ar e combustível entre outros, de forma a reduzir a perda exergética. Esta grande perda é esperada uma vez que as reações químicas existentes envolvem grandes irreversibilidades.

- em termos absolutos a perda de exergia na caldeira de biomassa é 21% maior, o que já é esperado devido a caldeira a gás ser mais compacta e também possuir maiores condições de ajuste operacional.

- a caldeira de biomassa possui uma perda de exergia em bombeamento maior devido possuir economizador, porém se compararmos a soma da perda de bombeamento e da caldeira juntos, as perdas das 02 caldeiras são similares.

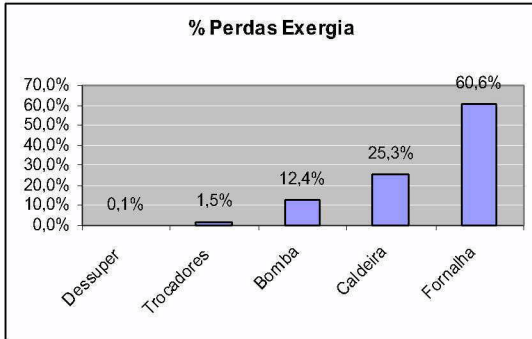


FIGURA 01 - % PERDAS POR LOCAL DA CALDEIRA GÁS NATURAL

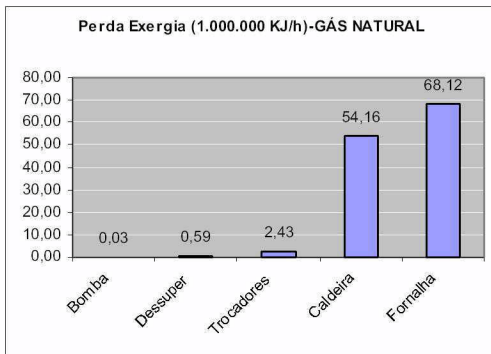


FIGURA 02 - EXERGIA PERDIDA POR LOCAL DA CALDEIRA GÁS NATURAL

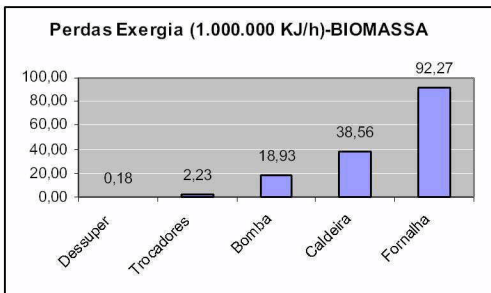


FIGURA 03 - EXERGIA PERDIDA POR LOCAL DA CALDEIRA GÁS NATURAL

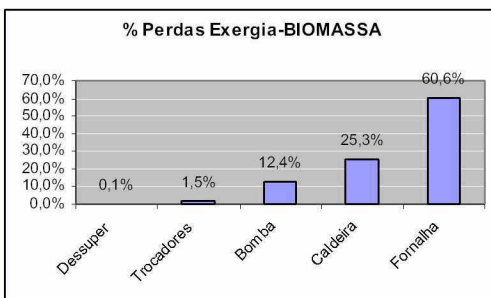


FIGURA 04 - % PERDAS EXERGIA POR LOCAL CALDEIRA BIOMASSA

Em relação aos coletores houve a identificação dos locais de perda de exergia, com uma quantificação percentual desta perda, conforme a Figura 5.

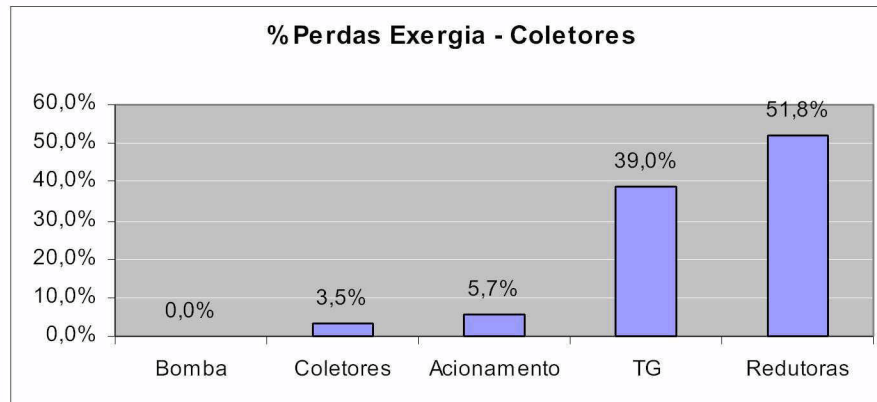


FIGURA 05 – Porcentagem de perdas de exergia local por coletores.

Os valores percentuais mostram que ocorre uma perda exérgica significativa em válvulas redutoras, o que já era esperado, sendo necessário investimentos na instalação da planta para minimizar estas perdas. As perdas apresentadas com o turbo gerador são significativas, porém melhorias são de difícil implantação pois requerem grandes modificações no equipamento e deve ser feito em conjunto com o fabricante. As perdas com acionamento já eram de conhecimento, deve ser trocado a instalação por acionamento elétrico, sendo que a energia seria gerada no próprio turbo gerador da empresa.

5. CONCLUSÕES

Este estudo faz parte de uma tese de mestrado que se encontra em fase final de elaboração. Com o andamento das simulações, será feito uma análise de sensibilidade das variáveis de processo buscando obter maiores direcionamentos em ações que resultem na redução dos custos energéticos da planta.

A análise exérgica, ferramenta utilizada na avaliação do desempenho do processo e também o simulador comercial utilizado, se mostraram adequados para compreender o comportamento do processo e para identificar os locais onde ocorrem as principais perdas e também para quantificá-las.

Esta ferramenta é especialmente útil na fase de projeto do sistema de vapor, quando as variáveis do processo podem ser mais facilmente alteradas, pois o grau de liberdade para modificações é muito maior. Esta ferramenta também pode ser bastante útil na análise e justificativa de novos investimentos, dado que soluções com custos energéticos menores devem ter um custo de instalação maior.

Para aplicação da ferramenta na fase operacional, o grau de liberdade é muito menor, porém com complementos de investimento os resultados também devem ser significativos.

6. BIBLIOGRAFIA

- C. Ozgur Colpan; T Yesin. Energetic, exergetic and thermoeconomic analysis of Bilkent combined cycle cogeneration plant. Intern. Journal of Energy Research; 2006, v.30; pgs. 875-894.
- Tsatsaronis, G.; M.H. Park; On avoidable and unavoidable exergy destructions and investment costs in thermal systems. Energy Conversion and management, 2002, v.43, pgs. 1259-1270.
- Cziela, F.; Tsatsaronis G.; Z. Gao. Avoidable thermodynamic inefficiencies and costs in an externally fired combined cycle power plant. Energy, 2006, v.31, pgs. 1472-1489.
- Torres, E; Análise Exergética - Universidade Federal da Bahia
- Bracelpa – dados do setor de celulose e papel no site www.bracelpa.org.br. Acesso de dados em janeiro de 2007.
- Ministério Minas e Energia (MME) - Dados sobre o balanço de energia no Brasil no site www.mme.gov.br. Acesso em janeiro de 2007
- Moran, M.J.; Shapiro, H.N - Princípios de Termodinâmica para Engenharia, 2002.
- Kotas, T. J., 1995, "The Exergy Method of Thermal Plant Analysis", Butterworths, London, UK,
- Tsatsaronis, G. Definitions and nomenclatures in exergy analysis and exergoeconomics, Science Direct – Energy 32 (2007), p. 249-253.
- Bejan, A.; Tsatsaronis, G.; Moran, M.- Thermal design and optimization. John Wiley and Son, Inc., 1996.