

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. Com a cana-de-açúcar há a produção de açúcar, álcoois combustíveis e industriais, aguardente, cera, além de ser consumida *in natura*. O bagaço da cana-de-açúcar é fonte para a produção de energia e papel. A ponta da cana pode também ser utilizada como alimentação animal e para extração de palmito para alimentação humana. Desta forma, a cana-de-açúcar é uma das mais importantes culturas brasileira, conforme LUCCHESI (1995) ¹ apud ARRUDA PINTO (2002).

A principal importância econômica da cana-de-açúcar é a sua capacidade de armazenar concentrações significativas de sacarose, a qual está vinculada a três importantes agroindústrias: açúcar, álcool e aguardente (OMETTO, 2000).

Dentro da matriz energética adotada no Brasil, o álcool etílico carburante se destaca pela economia em importação de petróleo, no uso do bagaço para cogeração de energia elétrica, e a vinhaça e a torta de filtro pela substituição de insumos químicos na lavoura.

No ciclo completo da produção do álcool etílico carburante, devem ser considerados: a atividade produtiva relacionada ao uso do solo para cultivo da cana-de-açúcar, o uso da adubação química, a colheita, o uso da vinhaça no solo, o transporte da cana para as usinas e destilarias, o manejo dos resíduos sólidos e líquidos, as emissões gasosas, e a produção de energia através da queima do bagaço (BORRERO, 2003).

A partir de uma análise mássica em usinas de cana-de-açúcar convencional, constata-se que, em média, é possível conseguir 84,5 litros de álcool por tonelada de

¹ LUCCHESI, A.A.- *Processos fisiológicos da cultura da cana-de-açúcar (Saccharum spp)*. Piracicaba. ESALQ/USP,1995.

cana processada. A produção de álcool traz no seu processo a geração de grandes quantidades de resíduos sólidos, líquidos e gasosos. Conseqüentemente, o manejo destes resíduos deve ser adicionado à avaliação da atividade industrial (BORRERO, 2003).

O manejo dos resíduos sólidos, torta de filtro, cinzas oriunda da queima do bagaço, fuligem eliminada nas caldeiras e o lodo da água de lavagem da cana, têm contribuído para que retornem ao campo, auxiliando a lavoura quando incorporados ao solo, melhorando a sua qualidade e, por conseguinte a produtividade. Desta forma, são considerados subprodutos do processo industrial e insumos para a agricultura, deixando de ser considerados resíduos ou efluentes.

Os efluentes do processo industrial da cana-de-açúcar devem ser tratados e se possível reaproveitados na forma de fertilizantes. Sem o devido tratamento os efluentes lançados nos rios comprometem a sobrevivência de diversos seres aquáticos (através da mortandade de peixes), quando usados como fertilizantes os efluentes não tratados contaminam os lençóis freáticos e afetam os seres terrestres (ETANOL – Impactos e problemas).

O manejo dos resíduos líquidos originados durante a fase industrial de produção do álcool, vinhaça, água de lavagem da cana, água dos condensadores e água proveniente da lavagem de equipamentos, tem tratamento diferenciado. A multiplicidade de usos da água no processo industrial gera enorme quantidade de resíduos líquidos. O uso em sistema de circuito fechado dotado de filtros permite melhor reaproveitamento, sendo, mormente empregada para a lavagem da cana no início do processo. A demanda observada de água é em média de 7m^3 por litro de álcool produzido, e a eliminação de água residual fica entre $0,5$ e $1,0\text{m}^3$ por litro de álcool, dependendo do nível de recirculação utilizado. (BORRERO, 2003).

A minimização de resíduos industriais, portanto, faz parte de um novo conceito de gerenciamento de poluentes, baseado numa sistemática de medidas que visam reduzir no máximo possível a quantidade de resíduos a serem tratados ou dispostos, possuindo uma estrutura de ação fundamentada na sua prevenção e reciclagem. O melhor resíduo é aquele que não é gerado. Porém quando não se pode evitar a sua produção é preferível reutilizá-lo (MARCHIZELI, 2003).

Conforme LOPES (2003), até 1975, os resíduos sólidos eram generalizados como rejeitos, sem qualquer valor comercial, por isso o aspecto econômico não era considerado.

Por esse motivo, o termo “lixo” não é considerado muito apropriado pelos pesquisadores da área. O mais indicado e utilizado na comunidade científica é o termo “resíduo”, já que este pode servir como matéria-prima para fabricação de outro produto.

Por isso, os resíduos não são considerados materiais inúteis, recebem a denominação de “resíduos últimos” apenas quando não puderem mais ser reaproveitados ou reutilizados.

Segundo CINCOTTO (1988)² apud LOPES (2003), "a denominação de resíduos é circunstancial, referindo-se a um material acumulado, sem destinação; a partir do momento em que apresente uma aplicação qualificada passa a ser um subproduto".

De acordo com a Norma Brasileira – NBR 9800/1987, “efluente líquido industrial é o despejo líquido proveniente do estabelecimento industrial, compreendendo emanções de processo industrial, águas de refrigeração poluídas, águas pluviais poluídas e esgoto doméstico”.

Segundo PEREIRA (2002), por muito tempo não existiu a preocupação de caracterizar a geração de efluentes líquidos industriais e de avaliar seus impactos no meio ambiente. No entanto, a legislação vigente e a conscientização ambiental fazem com que algumas indústrias desenvolvam atividades para quantificar a vazão e determinar a composição dos resíduos líquidos industriais. A vazão dos efluentes líquidos industriais é relacionada com o tempo de funcionamento de cada linha de produção e com as características do processo, da matéria-prima e dos equipamentos, podendo ser constante ou bastante variada.

Com relação aos resíduos gasosos, a emissão de CO₂ não pode ser considerada como poluente uma vez que há absorção dele durante o ciclo de vida da cana-de-açúcar.

² CINCOTTO, M.A. (1988). *Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil*. In: Tecnologias de edificações .1.ed., p.71-4. Coletânea de trabalhos. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A. PINI/IPT, São Paulo, 1998.

Conforme KOTCHETKOFF (1999), a cana, como todo vegetal, é formada por reação de fotossíntese, lenta, na qual dióxido de carbono se combina com água, absorvendo calor, resultando em oxigênio e matérias orgânicas – estruturas de hidrato de carbono (CH_2O). Tem-se, assim, absorção de CO_2 e liberação de O_2 na fotossíntese, e a situação inversa na combustão e putrefação. As quantidades envolvidas dos componentes são molecularmente equivalentes – a cada molécula de CO_2 corresponde uma de O_2 . Durante o crescimento da lavoura tem-se consumo de CO_2 e emissão de O_2 desde o plantio até a colheita.

Outras quantidades de gases emitidos por litro de álcool durante a produção são insignificantes. O material particulado, emitido durante a queima do bagaço, é basicamente constituído de fuligem e cinzas. A fuligem é removida por lavagem com água, sendo o lodo preto misturado com a torta de filtro que sai do decantador (no tratamento primário do caldo) e depois incorporado ao solo.

A energia obtida usando a queima do bagaço extraído na moagem da cana de açúcar provê a auto suficiência em termos de energia na indústria. A parte de ser economicamente importante, também é importante em termos ambientais pela redução da emissão de CO_2 de combustíveis fósseis. (BARRERO, 2003).

No caso típico das usinas sucro-alcooleiras, a combustão do bagaço nas caldeiras produz vapor de água que se expande em uma turbina a vapor, sendo o vapor de baixa pressão o rejeito utilmente aproveitado para satisfazer a demanda de calor da planta. (SANCHES PRIETO, 2003).

O estudo da Termodinâmica é relevante para as necessidades energéticas da sociedade na medida em que nos permite avaliar a eficiência dos processos relativos à alta qualidade de energia ou uso exergético. Enquanto a primeira lei da termodinâmica manifesta que energia é conservada, a segunda lei da termodinâmica aponta para a diferença na qualidade entre as várias formas de energia. Por exemplo, se um suprimento de calor em alto nível de temperatura é mais valioso do que um suprimento de calor a baixa temperatura. Porém, se a necessidade é de calor a baixa temperatura, fornecer calor a alta temperatura é desperdício. Esta é a base da segunda lei da termodinâmica, em que as condições podem ser estabelecidas de acordo com o uso pretendido. Uma melhor utilização de recursos energéticos pode ser conseguida pela

redução da destruição de exergia no interior de um sistema e/ou perdas. Um objetivo na análise de exergia é a identificação de local onde a destruição de exergia e as perdas aconteçam e que estas sejam organizadas tendo em vista sua importância (MORAN, 2000).

Conforme encontramos em OMETTO e ROMA (2004), a energia não pode ser destruída, de acordo com a primeira lei da termodinâmica. Exergia pode ser destruída e esta exergia perdida pode ser minimizada para que o desenvolvimento sustentável possa ser alcançado. Muitos pesquisadores têm sugerido que o meio mais apropriado para correlacionar a segunda lei da termodinâmica e o impacto ambiental seja através da exergia, porque esta mede as diferenças entre o estado do sistema em relação ao meio ambiente. A magnitude da exergia de um sistema depende de seu estado em relação ao ambiente. A diferença será nula somente quando o sistema estiver em equilíbrio com o ambiente.

A perda exergética num processo produtivo resulta da destruição de exergia ao longo dessa cadeia produtiva e da exergia perdida com os efluentes e emissões.

O método da análise de exergia é particularmente apropriado para maximizar o objetivo de um uso mais eficiente de energia, já que ele permite a determinação de rejeitos e perdas em termos de sua localização, tipo e valores reais. Essa informação pode ser usada no projeto de sistemas térmicos, mas também na indicação de esforços para a redução de fontes de ineficiência em sistemas já construídos e na avaliação do custo de sistemas (MORAN, 2000).

A aplicação da análise exergética poderá indicar onde estas perdas de energia ocorrem e os melhoramentos necessários à sua operação ou tecnologia.

2. OBJETIVOS

Realizar a caracterização de duas plantas industriais de modo a permitir a avaliação exergética dos efluentes da produção industrial do álcool etílico hidratado carburante possibilitando indicar a quantidade de perda de exergia física nos efluentes.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O uso de água e a geração de efluentes, de acordo com ANDERSON et al (1996)³ apud KESSERLINGH (2002) são consideradas fontes de preocupações, uma vez que algumas indústrias sucro-alcooleiras têm balanço hídrico positivo, descartando mais água do que entra no processo, sendo um grande problema, pois necessitam atender exigências de lançamento de efluentes, especialmente nos cursos de água mais sensíveis.

A quantidade de água captada e os efluentes gerados, segundo SAKPAL et al (2001)⁴ apud KESSERLINGH (2002), podem ser consideravelmente reduzidos se águas de resfriamento de equipamentos forem recirculadas, água proveniente de vapor condensado for reutilizada e se boas práticas de fabricação forem adotadas no gerenciamento da indústria.

Todos os processos industriais geram resíduos. Estes resíduos que muitas vezes são constituídos de componentes perigosos, precisam ser tratados e dispostos corretamente, como forma de diminuir seus impactos negativos sobre o meio ambiente (MARCHIZELI, 2003).

Para MARCHIZELLI (2003), resíduos industriais são definidos como aqueles que requerem cuidados especiais quanto à coleta, acondicionamento, transporte e destinação final, pois apresentam substancial periculosidade à saúde humana e aos

³ ANDERSON, P. J.; R. PAGAN; J. da COSTA and P. LELLO (1996). *Environmental Management Systems – Development, Implementation and Benefits for the Australian Sugar Industry*. Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists

⁴ SAKPAL, D. B.; NIMBALKAR, D. and GUNJAL B. B. (2001). *Environmental managements in the Sugar Industry*. Proceeding of the Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists – September 2001, Brisbane, Australia

organismos vivos e se caracterizam pela letalidade e/ou persistência e/ou efeitos cumulativos adversos.

O tratamento de efluentes industriais, de acordo com OLIVEIRA (1998), é uma medida que aliada ao conceito de prevenção à poluição, apresenta importância significativa na redução da carga poluidora, devendo ser utilizada somente após a inviabilidade da redução da poluição na fonte, sendo necessária à adequação dos efluentes para reciclagem ou disposição final.

3.1 ASPECTOS GERAIS

A produtividade agroindustrial teve nos últimos anos significativa evolução. Na região centro-sul do Brasil que responde por 85% da produção brasileira, a média oscila entre 78 e 80 toneladas por hectare, em ciclo de cinco cortes. No Estado de São Paulo, responsável por 60% da produção nacional, a média está ao redor de 80 a 85 toneladas por hectare, em ciclo de cinco a seis cortes (UNICA, 2003).

Nenhuma planta possui açúcar em tão grande quantidade como a cana-de-açúcar: contém cerca de 90% de suco, do qual podemos extrair cerca de 10 a 20% de açúcar (MARAFANTE, 1993).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido por Índia e Austrália. Em média, nas últimas cinco safras, 52% dessa produção destinaram-se às fábricas de etanol (anidro e hidratado) e 48% às de açúcar (refinado, cristal e demerara). Sua cultura espalha-se pelo Centro-Sul e pelo Norte-Nordeste do país em dois períodos de safra (maio-novembro e setembro-março, respectivamente), ocupando 2,4% da área agricultável do solo brasileiro, perto de 5,5 milhões de hectares (UNICA, 2004).

Na safra 2003/2004, (Quadro 1), foram moídas $352,60 \times 10^6$ toneladas resultando na produção de $24,82 \times 10^6$ toneladas de açúcar e $14,72 \times 10^6$ m³ de etanol (anidro e hidratado) em 324 unidades processadoras de cana-de-açúcar (UNICA, 2004).

EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO NACIONAL DE CANA DE AÇÚCAR (em toneladas)							
ESTADO	SAFRAS						
	1998/1999	1999/2000	2000/2001	2001/2002	2002/2003	2003/2004	%
SP	199.521.253	194.234.474	148.226.228	170.657.425	191.673.188	207.810.964	58,94
PR	24.224.519	24.351.048	19.320.856	23.075.623	23.817.260	28.485.775	8,08
AL	17.345.105	19.315.230	25.196.251	23.124.558	21.907.922	25.344.585	7,19
MG	13.483.617	13.599.488	10.634.653	12.206.260	15.599.511	18.915.977	5,36
PE	15.588.250	13.320.164	14.366.994	14.351.050	14.414.834	14.689.641	4,17
MT	10.306.270	10.110.766	8.669.533	10.673.433	12.384.480	14.349.933	4,07
GO	8.536.430	7.162.805	7.207.646	8.782.275	9.922.493	13.041.232	3,70
MS	6.589.965	7.410.240	6.520.923	7.743.914	8.213.440	8.892.972	2,52
RJ	5.191.421	4.953.176	3.934.844	3.072.603	4.478.142	4.577.007	1,30
OUTROS	14.182.352	12.508.232	13.513.881	13.448.016	15.454.020	16.489.350	4,67
BRASIL	314.969.182	306.965.623	257.591.809	287.135.157	317.865.290	352.597.436	100,00
FONTE: ÚNICA							

Quadro 1 – Produção Nacional de cana-de-açúcar

O Estado de São Paulo, que produz 60% da cana-de-açúcar teve na safra 2003/2004, o seguinte desempenho: 207,871x10⁶ toneladas de cana moída e produção de 15,171x10⁶ toneladas de açúcar e 8,807x10⁶ m³ etanol total (fonte IEA-Instituto de Economia Agrícola de São Paulo / UNICA).

O álcool etílico é utilizado como combustível desde o nascimento dos automóveis, na tentativa de adaptar os motores recém inventados para a utilização do etanol. Desde então e até nos dias de hoje, o uso do etanol em veículos automotores teve um considerável avanço (ANCIÃES, 1981).

O álcool obtido industrialmente por via biológica – a da fermentação alcoólica de produtos agrícolas – que é a utilizada na produção comercial no Brasil para finalidades carburantes, parte de matéria prima açucarada, caldo de cana extraído diretamente da cana-de-açúcar nas destilarias autônomas, ou mel residual nas unidades

anexas às usinas de açúcar que, após a sua transformação em mosto, é submetida ao processo fermentativo, produzindo então o álcool, como produto principal da atividade enzimática das leveduras.

O álcool é finalmente separado do mosto fermentado por destilação (LEÃO, 2002).

3.2 ETAPAS DO PROCESSO INDUSTRIAL DO ALCÓOL

3.2.1 CANA-DE-AÇÚCAR

LIMA et al 2001⁵ apud KESSERLINGH (2002), informam que uma tonelada de cana-de-açúcar moída produz em média 850 litros de caldo, do qual entre 78 a 86 % é água, de 10 a 20 % sacarose, de 0,1 a 2 % de açúcares redutores, 0,3 a 0,5 % de cinzas e entre 0,5 e 1,0 % são compostos nitrogenados. A fibra é todo material insolúvel em água, e o caldo é o conjunto da água e todos os sólidos solúveis. A planta também contém glicose (de 2 % a 4 %), frutose (de 2 % a 4 %), sais (3 % a 5 %), proteínas (0,5 % a 0,6 %), amido (0,001 % a 0,05 %), ceras e graxas (0,05 % a 0,15 %) e corantes (3 % a 5 %).

Segundo CORTEZ (1992), cada tonelada de cana moída rende, dessa maneira, cerca de 250 kg de bagaço úmido (com média de 45 % a 55 % de umidade, dependendo do tipo de equipamento utilizado na extração, 48 % de fibras e 2 % de sólidos solúveis) que será usado para atender às necessidades energéticas da indústria.

3.2.2 RECEPÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR

O sistema de recepção da cana conforme MARAFANTE (1993) compõe-se de:

⁵ LIMA, U. de A.; AQUARONE, E.; BORZANI, W. E. SCHMIDELL, W. et al (2001). *Biotecnologia Industrial, Processo Fermentativos e Enzimáticos*. Volume 3. Brasil. Editora Edgard Blucher. Ltda.

a - Pesagem da matéria prima – é através da pesagem da cana que é feito o controle tanto agrícola, como industrial. É também através da pesagem da matéria prima recebida que se faz o cálculo do rendimento industrial, cálculo da extração da moenda, cálculo do rendimento agrícola e o cálculo de carregamento e transporte.

b - Amostragem e análise da matéria prima – com a implantação do pagamento ao produtor pelo teor de sacarose, após a pesagem são retiradas através de uma sonda especial, amostras da matéria prima. O caldo será extraído em prensa hidráulica.

Do caldo extraído, são analisados: *brix* (porcentagem de sólidos solúveis no caldo, unidade que indica a porcentagem de sólidos, açúcar + impurezas, obtida com o refratômetro digital de leitura automática, com correção automática de temperatura); *pol do caldo* (porcentagem de sacarose aparente no caldo, unidade que indica a porcentagem de açúcar no caldo; é um teste importante, pois é a sacarose a principal fonte de carbono na degradação do açúcar em álcool; quanto maior o teor de sacarose da cana, maior vai ser o rendimento em álcool); pureza e fibra residual (MANUAL CONSECANA).

c - Descarregamento – Este é um processo mecanizado, e pode ser empregado tanto para o abastecimento direto da mesa alimentadora das moendas como para armazenamento. A cana pode vir inteira ou picada.

O descarregamento direto pode ser feito com o uso de pontes rolantes, guindastes do tipo Hillo e, no caso de cana picada, através de um tombador hidráulico para basculamento lateral dos caminhões, ou ainda por pivotamento lateral de caçambas fechadas (COPERSUCAR).

O ciclo completo da produção do álcool e do açúcar pode ser visto no fluxograma apresentado na fig. 01.

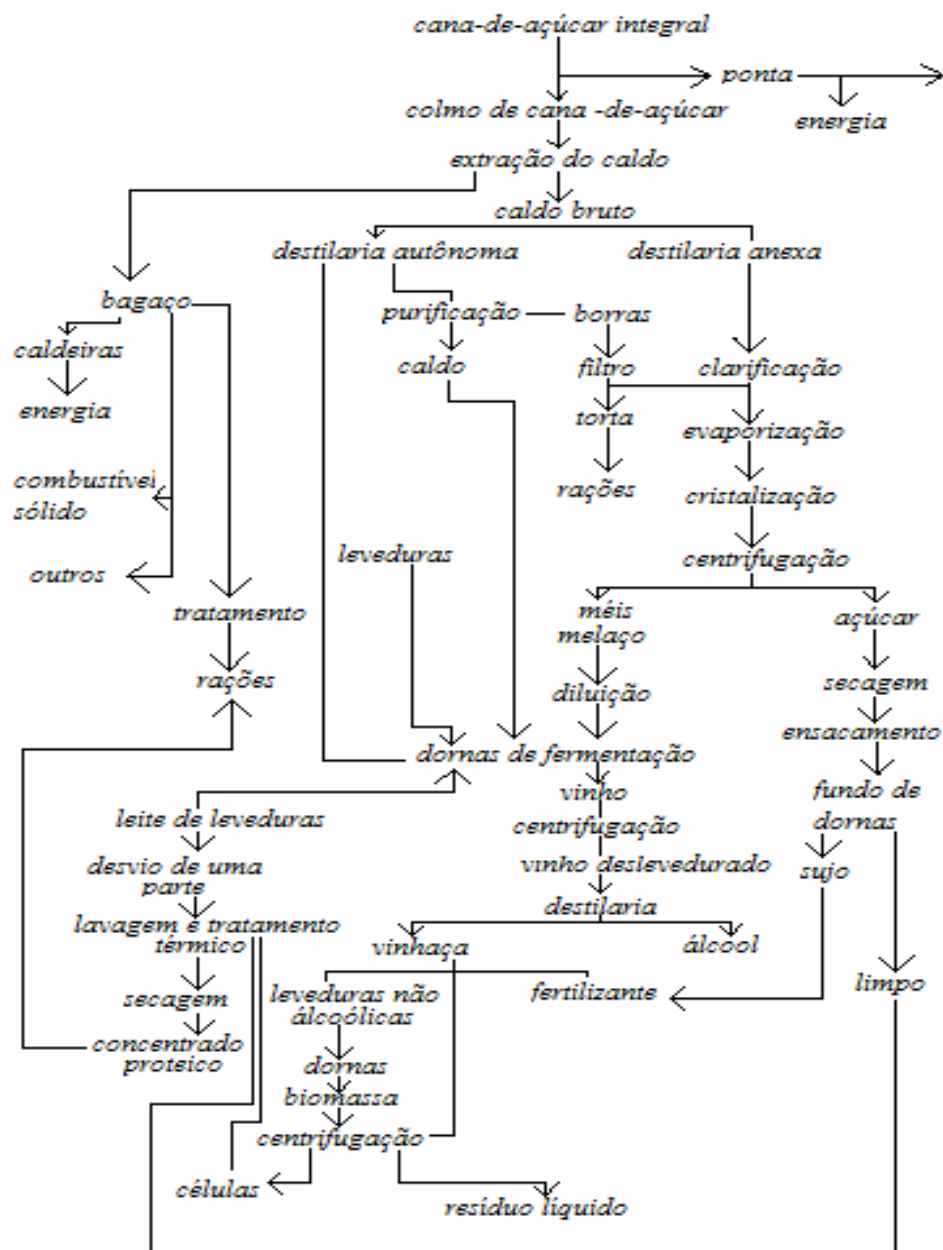


Figura 01-Fluxo de produção do álcool a partir da cana-de-açúcar (MARAFANTE, 1993).

3.2.3 LAVAGEM DA CANA

De acordo com a COPERSUCAR, a lavagem é uma etapa importante, e é feita nas mesas alimentadoras. A água é empregada na lavagem da cana para a retirada de matérias estranhas como areia, argila, palha, etc., com a finalidade de obtenção de um caldo de melhor qualidade e aumento da vida útil dos equipamentos, pela redução do desgaste. Essa lavagem nunca é feita na cana picada, pois provocaria um arraste muito grande de sacarose pela água.

Há forte tendência de redução ou mesmo eliminação do sistema de limpeza da cana com água. A alternativa é a introdução de sistemas de limpeza a seco que, além de eliminar o uso de água, permitem a remoção de parte das impurezas vegetais, cuja proporção tem aumentado em função do crescimento da colheita mecanizada e colheita de cana crua (sem queimar).

De acordo com KESSERLINGH (2002) o contato íntimo da água com a cana dissolve parte do açúcar nas superfícies de pontas, pedaços esmagados e principalmente da exsudação devido à queima da cana, promovendo quantidades consideráveis de DBO na água. Tecnologias novas em alimentação de cana, como mesa 45°, que devido ao ângulo possibilita a lavagem de cana com volumes inferiores de água, têm sido introduzidas nas indústrias.

O volume de efluentes, segundo PURCHASE (1995)⁶ apud KESSERLINGH (2002), nos países pesquisados, varia de 0-11m³/tonelada de cana moída, sendo função de água de lavagem de cana e água de resfriamento serem ou não incorporadas aos efluentes.

A pesquisa demonstra que indústrias que não utilizam lavagem de cana têm geralmente volume de efluente de 0,2 - 0,3 m³/tonelada de cana moída, excluindo-se as águas de resfriamento.

Segundo THOMAS (1995)⁷ apud KESSERLINGH (2002), no reuso de um resíduo, este é retornado ao mesmo processo ou unidade de produção, sem a

⁶ PURCHASE, B.S. (1995). *Disposal of liquid effluents from cane sugar factories*. Proceeding of International Society of Sugar Cane Technologists. Durban, South Africa

⁷ THOMAS, S. T. (1995). *Facility manager's guide to pollution prevention and waste minimization*. United States of America.

necessidade de tratamento prévio. O reciclo pode ser caracterizado como qualquer método, técnica ou processo que altere fisicamente, quimicamente ou biologicamente a característica do resíduo, para neutralizá-lo, torná-lo menos perigoso, menos tóxico ou mesmo seguro para gerenciamento ou reuso.

De acordo com CAMARGO (1990) o volume de água adicionada é bastante variável, verificando-se que o mínimo necessário a uma lavagem razoável é de 5 m³/t de cana, podendo chegar a 10 ou 15 m³/t de cana, dependendo da inclinação da mesa alimentadora.

Ainda conforme CAMARGO (1990), os parâmetros básicos do processo são os seguintes:

- volume de água a ser empregado;
- modo de aplicação, sempre que possível deve ser sob pressão, podendo ser a frio ou a quente. A lavagem a quente geralmente utiliza condensado;
- altura da pilha de cana: se muito grande, as impurezas removidas de camadas superiores ficam depositadas nas partes inferiores;
- velocidade das esteiras;
- água residual: é recomendável que seja levada para lagoas de decantação, devendo ser primeiramente peneirada, de modo a evitar arraste de palha, pedaços de colmo e outras impurezas. Porém, verifica-se que, normalmente, a água de lavagem é usada em circuito fechado, sendo renovada quando já muito contaminada.

3.2.4 PREPARAÇÃO DA CANA

De acordo com MARAFANTE (1993) a cana (colmo da cana) é constituída por uma parte dura (casca e nós), que contém cerca de 15% do caldo, e de uma parte mole (medula), que contém 85% de todo o suco extraído. O significado de preparação da cana resume-se em cortá-la e desfibrá-la reduzindo os colmos até conseguir uma carga uniforme e de maior densidade que alimenta o primeiro terno de moendas. Essa preparação facilita a “pega” pelas ranhuras do rolo, melhorando consideravelmente a

extração do caldo, também ajuda na embebição, uma vez que produz um bagaço com maior número de aberturas para receber a água (ou caldo diluído).

3.2.5 EXTRAÇÃO DO CALDO DA CANA

Em escala industrial existem dois processos de extração: a *moagem* e a *difusão*.

De acordo com COPERSUCAR, a *moagem* é um processo volumétrico e consiste em extrair o caldo contido na cana. Esta extração é conseguida fazendo a cana desfibrada passar entre dois rolos, submetidos à determinada pressão e rotação, sendo o volume gerado menor que o volume da cana. O excesso volumétrico, desprezando-se o volume de caldo reabsorvido pelo bagaço, deve ser deslocado, correspondendo a um volume de caldo extraído.

Apenas uma parte do caldo é extraída na primeira moenda, o restante continua retido no bagaço e será retirado posteriormente mediante embebição.

Um objetivo secundário da moagem, porém importante, é a produção de um bagaço final em condições de propiciar uma queima rápida nas caldeiras.

Segundo UNICA, a embebição é o artifício de adicionar água ao bagaço para diluir seu caldo remanescente, aumentando a extração de sacarose presente no bagaço, pois, este ainda retém certa quantidade de caldo por capilaridade ou em células que escaparam ao esmagamento.

Para CAMARGO (1990), a embebição, figura 02, pode ser efetuada de diversas maneiras, podendo ser simples, composta ou mista. A eficiência aumenta da primeira para a última, porém, a mais utilizada é a composta.

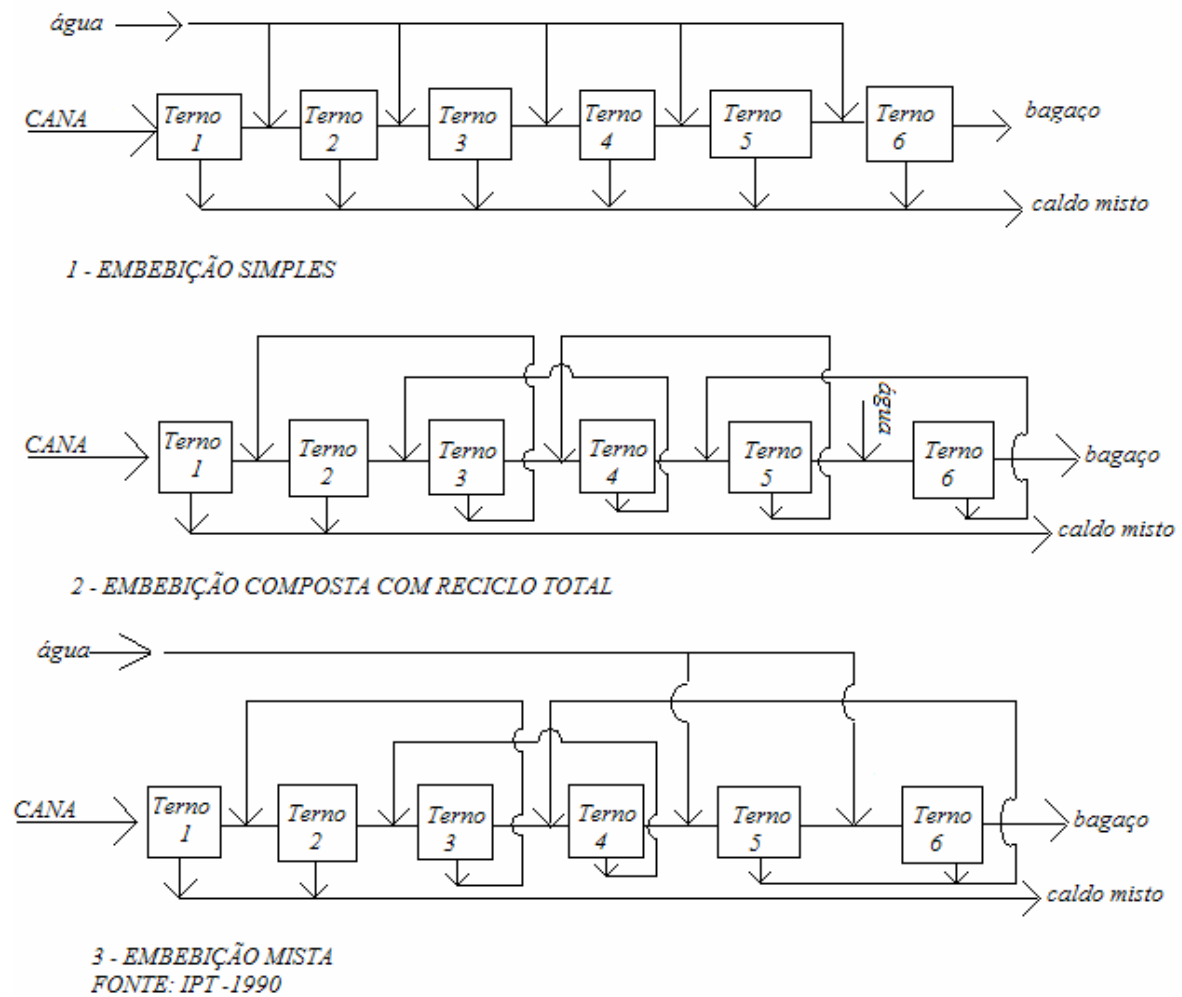


Figura 02 – Esquemas de embebição utilizados nas indústrias canaveiras

Segundo CAMARGO (1990), a quantidade de água utilizada na embebição é função de vários fatores entre os quais se destacam:

- fibra da cana: cana com alto teor de fibra requer uma taxa de embebição maior;
- açúcar na cana: as canas ricas em açúcar são mais bem aproveitadas utilizando maiores volumes de água;
- tratamento do caldo: quanto mais água é adicionada, maior será o volume de caldo misto, requerendo-se, portanto, maior quantidade de reagente e maior capacidade dos equipamentos na fase de tratamento;

- capacidade de evaporação: para a fabricação de açúcar, a embebição deve ser compatível com a capacidade de evaporação da planta, já que é nessa operação que a maior parte da água é eliminada;

- fermentação: apesar da exigência de um maior volume de dornas, o tempo de fermentação será reduzido devido à menor concentração de açúcar. O mosto diluído é, entretanto, mais propício à infecção;

- destilação: o vinho, estando mais diluído, exigirá uma capacidade maior de coluna para a mesma produção de álcool. Além disso, haverá aumento no volume de vinhaça gerada e maior consumo de vapor.

De acordo com COPERSUCAR, a *difusão* é um processo que consiste na extração da sacarose contida nas células da cana-de-açúcar, através da lavagem em contracorrente. Antes da extração pelo difusor, a cana deve ser preparada igualmente para as moendas, ou seja, passa pelo processo de *desnaturação mecânica*, no qual, por intermédio de picadores (facas) e desfibradores, as células contendo sacarose são abertas para facilitar a extração.

As células que não foram abertas pelo processo anterior passam pela *desnaturação térmica*, que, por ação do calor, torna possível a extração da sacarose. Este fenômeno se dá dentro do difusor, sempre mantendo o caldo em recirculação em torno de 70° Celsius.

A diferença básica entre a moagem e a difusão está na maneira de separar o caldo da fibra. O difusor realiza duas operações:

- Difusão: separação por osmose, relativa apenas às células não rompidas da cana;

- Lixiviação: arraste sucessivo, pela água, da sacarose e das impurezas contidas nas células abertas.

Toda água é adicionada na seção final do difusor e circula em contracorrente com o fluxo da cana. A remoção de água ou desaguamento do bagaço após a etapa de difusão é realizada por meio de rolos, como no processo de moagem.

3.2.6 TRATAMENTO DO CALDO

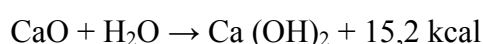
3.2.6.1 PENEIRAMENTO DO CALDO

Segundo UNICA (2004), o caldo de cana obtido no processo de extração apresenta uma quantidade e qualidades variáveis de impurezas, solúveis ou insolúveis. O tratamento primário visa à eliminação máxima das impurezas insolúveis (areia, argila, bagacilho, etc.), cujos teores variam de 0,1 a 1 %. A eliminação deste material beneficia o processo e aumenta a eficiência e a vida útil dos equipamentos instalados, contribuindo também para a obtenção de produtos finais de melhor qualidade.

Conforme COPERSUCAR (2004), o equipamento básico utilizado neste tratamento é formado pelo *cush-cush* e por peneiras. O *cush-cush* é constituído por peneiras fixas com aberturas de 0,5 a 2 mm, localizado bem próximo da moenda do primeiro terno para eliminar o material mais grosseiro em suspensão (bagacilho). Os materiais retidos, constituídos principalmente de caldo e bagacilho, são removidos por meio de raspadores de madeira com tiras de borracha, em contato com a tela, e através de um condutor de rosca sem-fim é enviado de volta à moagem, geralmente entre o primeiro e o segundo terno da moenda ou mesmo antes do primeiro terno. O peneiramento do caldo é realizado por diferentes tipos de peneiras (DSM, plana, rotativa, vibratória), que utilizam telas de vários modelos e aberturas (0,2 a 0,7 mm), com uma eficiência entre 60 e 80 %.

3.2.6.2 CALAGEM

De acordo com UNICA (2004), a calagem (conhecida também como defecação) é o processo de adição do leite de cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ao caldo, elevando o seu pH a valores entre 6,8 e 7,2. É realizada em tanques ou em linha, num processo contínuo, objetivando o controle do pH final. O leite de cal também é produzido na própria usina através da “queima” da cal (CaO) virgem (cal dolomítica) em tanques apropriados (piscina de cal ou hidratador) segundo a reação:



O $\text{Ca}(\text{OH})_2$ produzido apresenta uma concentração de 3 a 6° “Baumé” (medida para checar a concentração das soluções) antes de ser adicionado ao caldo.

Ainda de acordo com UNICA, esta neutralização tem por objetivo a eliminação de corantes do caldo, a neutralização de ácidos orgânicos e a formação de sulfato de cálcio (CaSO_3) e fosfato de cálcio (CaHPO_4), produtos estes que, ao sedimentar, arrastam consigo impurezas presentes no líquido. O consumo de cal virgem (CaO) varia de 500 a 1000 g por tonelada de cana moída, segundo o rigor do tratamento exigido.

As misturas flocculantes e calagem requerem água, mas não produzem efluentes.

3.2.6.3 AQUECIMENTO DO CALDO

De acordo com MARAFANTE (1993), o aquecimento do caldo consiste na elevação da temperatura do caldo pelo vapor de escape ou vapor vegetal (por ser oriundo do processo de concentração do caldo, vindo dos evaporadores) em trocadores de calor do tipo tubular, denominados aquecedores, até à temperatura entre 90° a 105°C, visando remover albuminas e impurezas coloidais, induzindo sua separação por floculação e precipitação nos decantadores. Nesta temperatura, o caldo estará adequado à decantação e pasteurização, isto é, praticamente isento de bactérias contaminantes.

O aquecimento proporciona também a degradação das proteínas do caldo de cana, ocasionando menor formação de espuma nas dornas, durante a fase de fermentação.

3.2.6.4 DECANTAÇÃO DO CALDO

Conforme MARAFANTE (1993), a decantação é um estágio do processo que objetiva separar do caldo a maior quantidade permissível das impurezas em solução e em suspensão.

O caldo de cana é uma suspensão coloidal cuja cor varia de verde-escuro a marrom. Essa coloração do caldo resulta da presença de substâncias como clorofila, antocianinas, xantofilas e carotenos.

De acordo com COPERSUCAR (2004), este processo é realizado de forma contínua em um equipamento denominado clarificador ou decantador, que possui vários compartimentos (bandejas) para aumentar a superfície de decantação, ou ainda em decantadores modernos de bandeja única. A adição de polímeros em torno de 2 g/t (dois gramas de polímero por tonelada de cana moída) acelera a velocidade de decantação e favorece a obtenção de um caldo de melhor qualidade.

Para MARAFANTE (1993), com a decantação busca-se:

- precipitação e coagulação tão completa quanto possível dos colóides;
- rápida velocidade de assentamento;
- mínimo volume de borras;
- borras densas;
- produção de um caldo o mais clarificado possível.

Para COPERSUCAR (2004), as impurezas sedimentadas, com uma concentração de sólidos de aproximadamente 10° Bé, constituem o lodo, que normalmente é retirado do decantador pelo fundo e enviado ao setor de filtração, para recuperação do açúcar.

Ainda de acordo com COPERSUCAR, o tempo de residência do caldo no decantador, dependendo do equipamento empregado, varia de 45 minutos a 4 horas, e a quantidade de lodo retirada representa de 15 a 20 % do peso do caldo que entra no decantador.

É praticamente impossível uma clarificação do caldo por simples decantação.

Para se obtê-la, tornam-se necessário flocular os colóides, uma vez que o caldo de cana deve ser considerado como um sistema coloidal complexo, no qual a água figura como meio de dispersão.

Segundo ainda MARAFANTE (1993), a decantação separa os caldos tratados em suas partes:

- a) caldo claro, que é sobrenadante, corresponde de 80 a 90% do caldo original;
- b) lodo, que se espessa no fundo do decantador.

O caldo claro segue para a destilaria, enquanto o lodo deve ser filtrado para que se separe o caldo do material precipitado, contendo os sais insolúveis e bagacilho.

3.2.6.5 FILTRAÇÃO

De acordo com CAMARGO (1990), como o lodo separado no decantador se mostra gelatinoso, não pode ser submetido diretamente à filtração, sendo necessário adicionar certa quantidade de bagacilho que servirá como elemento filtrante, aumentando a porosidade do bolo. Além disso, as perfurações da tela filtrante são muito grandes para reter os flocos, daí também a necessidade do bagacilho como auxiliar na filtração.

Para COPERSUCAR (2004), esta filtração visa recuperar o açúcar contido no lodo, fazendo com que este retorne ao processo na forma de caldo filtrado. O material retido no filtro recebe o nome de torta e é enviado à lavoura para ser utilizado como adubo. É importante controlar a perda de açúcar na torta, pois seu valor não deve ser superior a 1%.

Segundo MARAFANTE (1993), é necessário aplicar água para a lavagem do bolo, visando a aumentar a extração do caldo. Da água utilizada na lavagem, a maior parte fica retida na torta, somente 20 a 30 % saem no caldo claro.

A quantidade de água a ser aplicada é fator determinante para a eficiência do processo. Entretanto, o modo de aplicá-la, bem como a sua temperatura, são também

fatores responsáveis pelo bom resultado dessa operação. Em geral, utiliza-se para a lavagem do bolo de 100 a 150 % sobre o peso de torta úmida (MARAFANTE, 1993).

3.2.6.6 REGENERAÇÃO DO CALDO

De acordo com MARAFANTE (1993), o caldo decantado deve ser resfriado à temperatura entre 30° e 33°C, antes de ser enviado às dornas de fermentação. Esse resfriamento chama-se regeneração do caldo. Utiliza-se água como refrigerante e, em algumas unidades, circula-se o caldo misto proveniente das moendas.

Ainda conforme MARAFANTE (1993), os trocadores de calor usados nesta operação são os tubulares de passagens múltiplas, ou os de placas. Estes últimos são os de maior eficiência e se constituem de uma série de placas metálicas, com desenho próprio, que ficam pressionadas umas às outras e sustentadas por duas chapas espessas de metal; preenchem-se os espaços vazios entre as placas alternadas, de modo que cada uma mantenha contato com os dois líquidos, um em cada face, proporcionando assim a troca térmica.

3.2.7 PREPARO DO MOSTO

Conforme COPERSUCAR (1989), o mosto nada mais é do que uma solução de açúcar cuja concentração foi ajustada de forma a facilitar a sua fermentação. Basicamente é constituído pela mistura de méis e caldo com uma concentração de sólidos de 17 a 22° *Brix*. Caso haja necessidade, usa-se água para o ajuste do *Brix*.

Para MARAFANTE (1993), dependendo do processo para a extração, o caldo de cana pode apresentar uma concentração de sólidos variando entre 14 e 22° *Brix*, que, em função de sua pureza, corresponde a uma concentração de açúcares totais variando entre 12,5 a 18,0%, havendo, geralmente, a necessidade de diluí-lo até atingir um valor de 12 a 16° *Brix*. Essa diluição pode ser realizada por embebição durante a moagem ou pelos diluidores, utilizando-se a mesma regra de diluição do melaço.

3.2.7.1 PREPARO DO FERMENTO

Conforme MARAFANTE (1993), o processo de fermentação alcoólica mais utilizada no Brasil, atualmente, é o de Mèlle-Boinot, o qual recupera as leveduras (microorganismos unicelulares *Saccharomyces cerevisiae*) por centrifugação do vinho que as contém.

As centrífugas, como o nome sugere, agem através da força centrífuga, separando a alimentação em dois produtos. O primeiro, o vinho delevedurado, é enviado à dorna volante e, em seguida, será destilado. O segundo, o leite de leveduras, é encaminhado às cubas, onde recebe um tratamento químico, tornando-se apto a fermentar novos mostos.

Normalmente a relação é de 90% de vinho delevedurado e de 10% de leite de levedura.

De acordo com COPERSUCAR, esta levedura recuperada, antes de retornar ao processo fermentativo, recebe um tratamento severo que consiste em diluição com água e adição de ácido sulfúrico até normalmente $\text{pH} = 2,5$, ou mais baixo $\text{pH} = 2$ no caso de haver infecção bacteriana. Esta suspensão de fermento diluído e acidificado, conhecido na prática com o nome de “pé-de-cuba”, permanece em agitação por 1 a 3 horas, antes de retornar à dorna de fermentação.

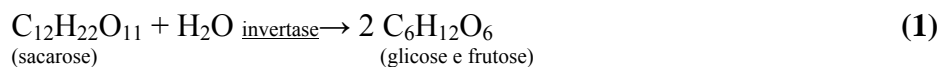
3.2.8 FERMENTAÇÃO

Segundo MARAFANTE (1993), o processo de transformação do açúcar em álcool, por ação de levedura, é denominada fermentação alcoólica, e se desenvolve em condições de anaerobiose, ou seja, em ausência de oxigênio livre.

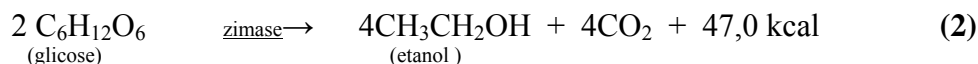
Nos mostos de caldo de cana-de-açúcar, melaço ou mistura de ambos, o açúcar predominante é a sacarose, aparecendo a glicose e a frutose em menores proporções.

De acordo com CAMARGO (1990), embora o processo seja complexo, para fins práticos pode-se representá-lo, seguindo as etapas a seguir, segundo a reação simplificada de Gay-Lussac:

- a) Sacarificação: consiste no desdobramento de substâncias não diretamente fermentescíveis em outras diretamente fermentescíveis



- b) Fermentação alcoólica



A invertase e a zimase constituem-se em enzimas produzidas pelas leveduras (IPT, 1990).

Segundo ÚNICA (2004), o tempo de fermentação varia de 4 a 12 horas. Ao final deste período, praticamente todo o açúcar já foi consumido com a conseqüente redução da liberação de gases.

Ao terminar a fermentação, o teor médio de álcool nestas dornas varia de 7 a 10% e a mistura recebe o nome de vinho fermentado.

3.2.9 DESTILAÇÃO

A destilação é um processo físico de separação de líquidos em uma mistura baseado nos diferentes pontos de ebulição de seus componentes. Assim, as várias substâncias contidas no líquido a destilar não evaporam à mesma temperatura. À pressão normal o álcool etílico evapora-se a 78,3° C, enquanto a água destilada ferve a 100° C. O processo consiste em aquecer a mistura e condensar os vapores provenientes da sua evaporação (LEÃO, 2002).

Além dos modelos simples de destiladores que permitem a obtenção somente do álcool bruto, existem outros tipos, os destiladores com retificação que separam a maior parte das impurezas existentes no mosto; os aparelhos de destilação com hidrosseleção, empregados na produção do álcool anidro ou absoluto, cuja graduação mínima é de 99,5° na escala estabelecida (LEÃO, 2002).

O vinho é uma mistura hidroalcoólica impura, e, como tal, pode ser beneficiado pelo processo físico da destilação, visando a separação do álcool etílico nele contido, através de colunas de destilação contínua. O líquido que vem da fermentação possui em

sua composição de 7 a 10° GL (% em volume) de álcool, além de outros componentes de natureza líquida, sólida e gasosa. Dentro dos líquidos, além do álcool, encontram-se a água com teor de 89 a 93 %, glicerina, álcoois homólogos superiores, furfural, aldeído acético, ácido succínico, acético, etc., em quantidades bem menores. Já os sólidos são representados por bagacilho, leveduras e bactérias, açúcares não fermentescíveis, sais minerais, matérias albuminóides e outros, e os gasosos, principalmente pelo CO₂ e SO₂ (UNICA, 2003).

A operação é realizada com o auxílio de sete colunas distribuídas em quatro troncos: destilação propriamente dita retificação, desidratação e debenzolagem.

Conforme UNICA (2003), a destilação é processada em três colunas superiores denominadas **A**, **A₁** e **D** (figura 03). Nestas, o etanol é separado do vinho (inicialmente com 7 a 10° GL) e sai com a flegma (vapores com 40 a 50° GL). Os voláteis, principalmente ésteres e aldeídos são concentrados na coluna **D** e retirados no seu topo, sendo condensados em dois condensadores conhecidos como **R** e **R₁**, onde uma fração deste líquido (90 a 95 %) retorna ao topo **D** e outra é retirada como álcool de segunda, com graduação de aproximadamente 92° GL.

Ainda segundo UNICA (2003), a coluna **A** tem por finalidade esgotar a maior quantidade possível de álcool do seu produto de fundo que é denominado vinhaça. A vinhaça, retirada a uma proporção aproximada de 13 litros para cada litro de álcool produzido, é constituída principalmente de água, sais, sólidos em suspensão e solúveis e é utilizada na lavoura como fertilizante, sendo seu calor parcialmente recuperado pelo vinho em um trocador de calor. A sua graduação alcoólica não deve ser superior a 0,03° GL.

De acordo com COPERSUCAR (1989), a retificação consiste de um sistema composto pelas colunas denominadas **B₁** e **B**, cuja finalidade é concentrar a flegma a uma graduação de aproximadamente 96° GL e proceder à sua purificação com a retirada das impurezas que a acompanham, como álcoois homólogos superiores, aldeídos, ésteres, aminas, ácidos e bases.

Os álcoois homólogos superiores, denominados óleos e alto, são retirados de bandejas próximas à entrada da flegma. O óleo alto retorna à dorna volante e o óleo fúsel é resfriado, lavado, decantado e armazenado para posterior comercialização.

Ainda conforme COPERSUCAR (1989), o álcool hidratado, produto final dos processos de epuração (destilação) e retificação, é uma mistura binária álcool-água que atinge um teor da ordem de 96° GL.

Isto ocorre devido à formação de uma mistura azeotrópica, fenômeno físico no qual os componentes não são separados pelo processo de destilação.

Este álcool hidratado pode ser comercializado desta forma ou pode sofrer um processo de desidratação.

Segundo CAMARGO (1990), não sendo mais possível separar o álcool da água por destilação convencional, é preciso promover a desidratação através de uma coluna de desidratação conhecida como coluna **C**, onde é adicionado o ciclohexano no topo. Este produto tem a capacidade de formar uma mistura azeotrópica ternária, ciclohexano-água-álcool, com ponto de ebulição inferior ao do álcool anidro, portanto o álcool é retirado no fundo da coluna com aproximadamente 99,7°GL. Esta mistura azeotrópica ternária retirada do topo é condensada e encaminhada a um decantador instalado na parte superior do corpo da coluna, onde se formam duas fases, uma superior, rica em ciclohexano, que retorna à coluna, e outra inferior, rica em água, que é enviada à coluna de recuperação de ciclohexano.

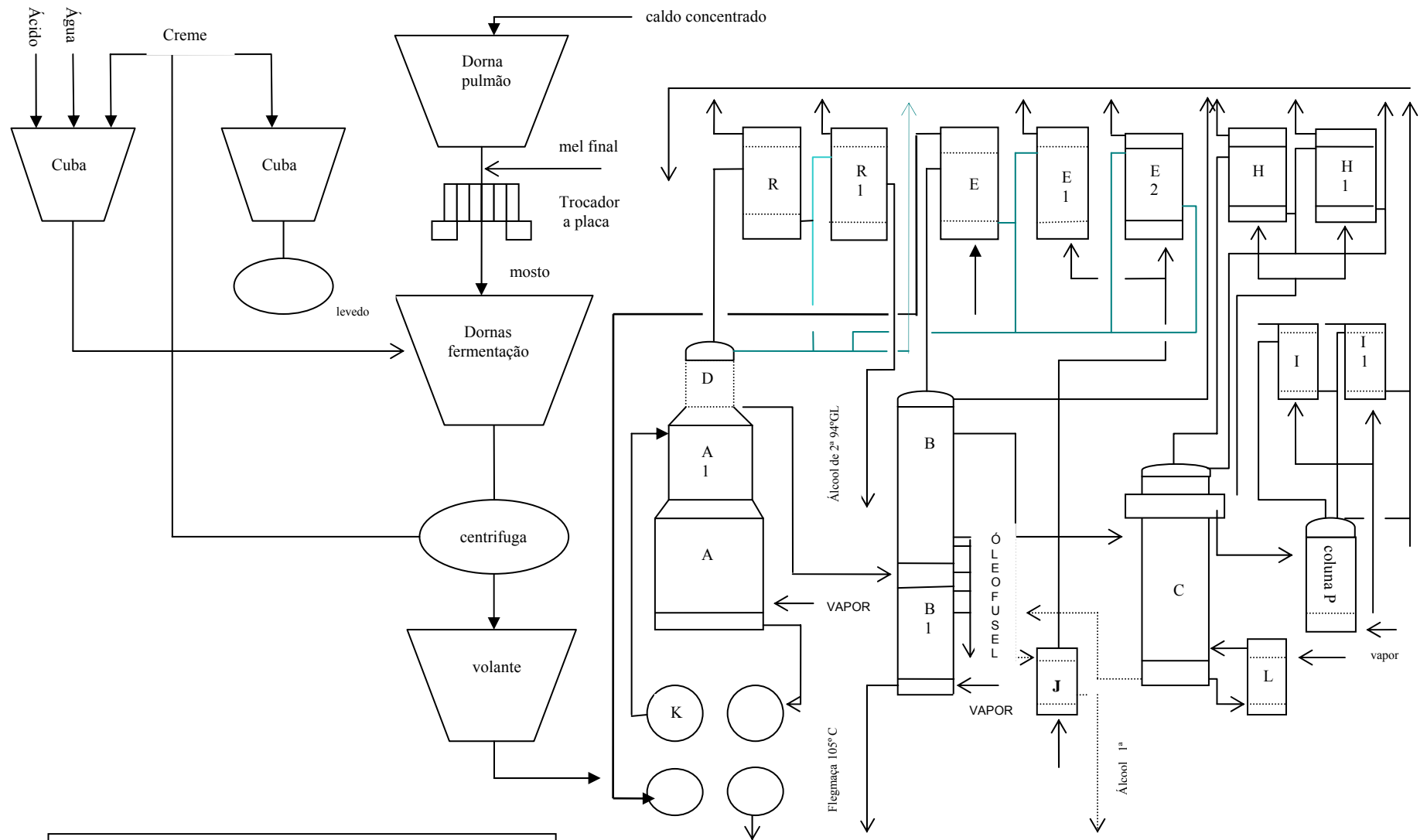


Figura 03 – FLUXOGRAMA DESTILARIA

Ainda conforme CAMARGO (1990) a recuperação do ciclohexano é feita através da coluna denominada de **P**, onde o solvente é recuperado no topo e reciclado à coluna **C**, enquanto a mistura água-álcool é retirada pelo fundo e enviada à coluna **B₁**.

Segundo COPERSUCAR (1989), os álcoois produzidos, hidratado e anidro são quantificados por meio de medidores de vazão ou tanques calibrados e são enviados para armazenagem em tanques de grande volume, situados em parques de tanques onde aguardam sua comercialização e posterior remoção por caminhões.

3.3 EXERGIA (ou DISPONIBILIDADE de ENERGIA) e QUALIDADE DE ENERGIA

A palavra *exergia* é derivada do grego *eks* (fora) e *ergon* (trabalho, ocupação, obra, ação). Exergia = disponibilidade de energia = trabalho útil máximo. Exergia pode ser definida como o *trabalho útil máximo* que é possível obter de um sistema, imaginando que ele sofra um processo *onde troque calor e trabalho apenas com o ambiente à sua volta, e no fim termine em estado de equilíbrio com o entorno* (NEBRA PEREZ, 2002).

Em RUSSEL (1993), encontramos que, em 1824, Carnot (Nicolas Leonard Sadi Carnot, 1796-1832) em seu tratado, publicado no *Philosophical Magazine of the Royal Society*, sob o título “*Refléxion sur la puissance motrice du feu et sur lês machines propres à developper cette puissance*”, definiu as limitações de se converter calor em trabalho por meio de uma máquina convencional de calor.

SZARGUT (1980) estabelece que os parâmetros de estado e a composição dos elementos mais comuns na natureza devem ser aceitos como nível zero para a avaliação prática da energia e dos recursos naturais. Como bem se conhece a capacidade de fazer trabalho calculado com relação a este dito nível zero, foi denominada por RANT como *exergia*.

Exergia foi introduzida como uma nova palavra por ZORAN RANT em 1956, *Exergy, a New Word for “Technical Available Work”*, conforme encontramos em SZARGUT et al (1988).

SZARGUT et al (1988), definiu **exergia** como “a quantidade de trabalho máxima obtida, quando alguma matéria é trazida de seu estado inicial para um estado de equilíbrio termodinâmico com os componentes comuns da natureza circunvizinha por meio de processos reversíveis de troca de calor e matéria exclusivamente com o entorno”.

Assim, para sistemas energéticos cujos fluxos operam com parâmetros fora das condições do meio ambiente (referência), a exergia pode ser entendida como a parte da energia que pode ser transformada em trabalho mecânico, sendo a destruição de exergia o resultado direto das irreversibilidades de um sistema. Um dos aspectos que pode aumentar a geração de irreversibilidades é o funcionamento do equipamento fora das condições de projeto, aspecto que geralmente incrementa não só a destruição de exergia, mas também as perdas exérgicas para o ambiente (SANCHEZ PRIETO, 2003).

Como visto, um elemento importante é o estabelecimento do estado de referência a partir do qual a exergia vai ser determinada. Assim, estritamente, em termos de definição de exergia, o meio ambiente age como um grande “reservatório” que têm a propriedade de receber fluxos de calor sem mudar de temperatura ou pressão, fluxos de energia mecânica sem variar a pressão, e fluxos de matéria sem variar a composição (BEJAN et al, 1996).

Geralmente os valores de T_0 e P_0 são tomados como os valores que correspondem ao valor típico do ambiente físico real. Todas as partes do sistema são consideradas em repouso com referência às outras e, por conseguinte, uma variação na energia do meio ambiente pode ser somente uma variação da sua energia interna. O meio ambiente é composto de substâncias comuns que existem abundantemente na natureza. Não há possibilidade de desenvolver trabalho das interações – físicas ou químicas – entre partes do meio ambiente (BEJAN et al, 1996).

De acordo com RUSSEL (1993), conceitualmente, *ambiente de referência* é um sistema que permanece num estado de completo equilíbrio termodinâmico, a despeito dos ilimitados fluxos de energia (calor e trabalho) e massa entre ele e o sistema. O ar ambiente (ou atmosfera) pode ser considerado como ambiente de referência desde que sua pressão e temperatura não sofram mudanças mesmo com significativas interações de calor ou trabalho com um dado sistema conhecido. Outros grandes sistemas que

podem ser considerados como ambientes de referência incluem os lagos, o oceano, a crosta terrestre, contanto que suas propriedades intensivas permaneçam constantes pelo período de observação.

Sobre ambiente de referência encontramos em AHRENDTS (1980) a proposta de um ambiente de referência baseado na estabilidade termodinâmica, sustentando que se a quantidade de diferentes elementos no estado de referência é conhecida e a temperatura deste sistema é fixa, a quantidade de cada composto químico e o valor de cada potencial químico no sistema de referência estão univocamente determinados pelas condições de equilíbrio termodinâmico.

Este sistema de referência definido por estas condições tem significado físico e não permite obter trabalho a partir de seus constituintes.

Em MORAN (2000), encontramos que o ambiente também é considerado como livre de irreversibilidades. Todas as irreversibilidades importantes estão localizadas no interior do sistema e em suas vizinhanças imediatas. O ambiente pode experimentar mudanças nas suas propriedades extensivas em função de interações com outros sistemas, muito embora suas propriedades intensivas não variem.

A exergia total do sistema (BEJAN *et al* 1996 e SZARGUT, 1999) é composta pela exergia física, cinética, potencial e química. A exergia cinética pode ser calculada pelo significado da velocidade em relação à superfície da Terra. Exergia potencial, por sua vez, pode ser calculada pelo nível superior da vizinhança com relação ao sistema considerado.

A exergia física resulta da diferença de temperatura e pressão em relação ao ambiente quando uma substância é conduzida através de processos físicos reversíveis e a exergia química expressa o trabalho de uma substância nas condições de temperatura e pressão ambiente levada ao estado de completo equilíbrio termodinâmico de seus componentes mais comuns presente no ambiente.

Por conveniência, a soma da exergia física (B_{ph}) e química (B_{ch}) pode ser chamada de *exergia térmica* (B_{th}).

$$B_{th} = B_{ph} + B_{ch} \quad (1)$$

Segundo SZARGUT et al (1988), a troca de exergia térmica pode ser calculada conforme mostrado na figura 04. A energia transportada com entalpia H_1 e entropia S_1 entra numa máquina reversível. Após mudanças físicas e/ou químicas, o efluente terá uma entalpia H_2 e uma entropia S_2 . A velocidade do fluxo de entrada e saída e a diferença de elevação são pequenas. Os valores da entalpia e entropia incluem não somente os componentes físicos, mas também (se necessário) as contribuições químicas. A máquina pode trocar calor Q_0 reversivelmente com o ambiente. O máximo trabalho que pode ser obtido pela máquina é dado pela mudança na exergia dos fluxos que entram e saem.

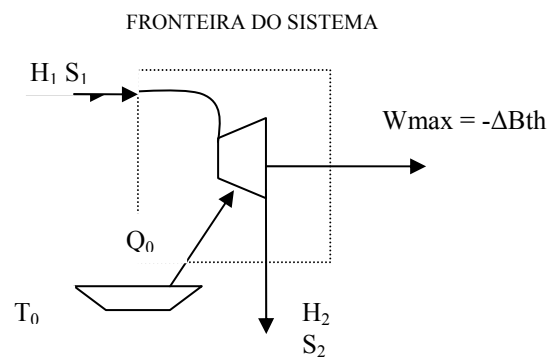


Figura 04 – Modelo demonstrativo da troca de exergia térmica entre dois estados

Para um balanço de energia

$$B_{th1} - B_{th2} = -\Delta B_{th} = H_1 - H_2 + Q_0 \quad (2)$$

A condição de reversibilidade leva a relação:

$$S_2 - S_1 - \frac{Q_0}{T_0} = 0 \quad (3)$$

Das equações (2) e (3)

$$B_{th1} - B_{th2} = -\Delta B_{th} = H_1 - H_2 - T_0(S_1 - S_2) \quad (4)$$

Usualmente, as mudanças de temperatura e pressão ambiente influenciam, porém de modo pequeno, o valor da exergia química. Portanto, esta pode ser calculada

sob condições normais de temperatura e pressão (CNTTP) convencionais para efeitos de comparação.

Desta forma, a equação abaixo pode ser imediatamente aplicada para calcular a exergia física:

$$B_{ph} = H - H_0 - T_0(S - S_0) \quad (5)$$

onde: B_{ph} = exergia física específica;

H_0, S_0 = entalpia específica física e entropia calculada a partir do estado com temperatura e pressão ambiente.

H, S = entalpia total e entropia total no estado inicial

Ainda segundo SZARGUT (1988), a perda de exergia pode ser calculada usando como modelo um processo irreversível em regime permanente, com fluxo de alimentação tendo entalpia H_1 e entropia S_1 , e o fluxo de saída correspondente, H_2 e S_2 . O processo pode ser abastecido por uma fonte de calor Q_1 à temperatura T_1 . O calor rejeitado Q_0 é transferido para o ambiente. Os efeitos práticos desse processo podem ser um trabalho mecânico ou um produto tendo parâmetros H_u e S_u (como é o caso nos processos das usinas e destilarias de açúcar e álcool). Os efeitos da energia cinética e potencial são considerados desprezíveis.

O efeito da irreversibilidade pode ser encontrado comparando o processo reversível com a operação deste processo, através das quantidades de exergia e calor transmitidos. O processo reversível tem um grande rendimento expresso através do produto com valores maiores de entalpia H_{ur} e entropia S_{ur} e uma pequena perda de calor expressa como Q_{or} .

$$H_u = H_1 - H_2 + Q_1 - Q_0 \quad (a)$$

$$H_{ur} = H_1 - H_2 + Q_1 - Q_{or} \quad (b)$$

As equações (a) e (b) nos levam a

$$H_{ur} - H_u = Q_0 - Q_{or} \quad (6)$$

O melhor aproveitamento do processo reversível no processo de comparação é acompanhado de uma redução no desperdício de calor Q_{0r} .

A somatória das entropias dos corpos que tomam parte no processo real é dada por

$$\sum \Delta S = -\frac{Q_1}{T_1} + S_2 - S_1 + \frac{Q_0}{T_0} + S_u \quad (c)$$

Para o processo reversível comparativo

$$0 = -\frac{Q_1}{T_1} + S_2 - S_1 + \frac{Q_{0r}}{T_0} + S_{ur} \quad (d)$$

As equações (c) e (d) nos levam a

$$Q_0 - Q_{0r} = T_0 \left(\sum \Delta S + S_{ur} - S_u \right) \quad (7)$$

Comparando as equações (6) e (7), deduz-se.

$$H_{ur} - H_u - T_0(S_{ur} - S_u) = T_0 \sum \Delta S \quad (8)$$

Onde a expressão à direita representa a diferença da exergia térmica útil no processo reversível e do processo atual, o que significa também a *exergia perdida* δB devido à irreversibilidade do processo sob consideração.

$$\delta B = T_0 \sum \Delta S \quad (9)$$

A equação (9) é também conhecida como a *lei de exergia perdida* ou *lei de Gouy-Stodola*.

Para nossas aplicações na avaliação exergética dos efluentes do ciclo de produção do álcool etílico carburante a somatória das entropias dos produtos observa o seguinte

$$\sum \Delta S = mc_w \ln \frac{T_s}{T_e} + \frac{Q_0}{T_0} = mc_w \left\{ \ln \frac{T_s}{T_e} + \frac{T_e - T_s}{T_0} \right\} \quad (10)$$

em que:

c_w denota capacidade de calor específico do efluente em estudo (água)

m massa do fluxo

T_s temperatura de saída do fluxo de efluente (água)

T_e temperatura de entrada do fluxo de efluente (água)

T_0 temperatura ambiente

Segundo SZARGUT (1999), a exergia física pode ser dividida na parte dependente da pressão e outra da temperatura. A parte dependente da pressão aumenta com a pressão e é negativa quando se apresentar menor que a pressão do ambiente. A parte referente à temperatura é sempre positiva e se torna nula na temperatura ambiente. A partir deste ponto, abaixo da temperatura ambiente, a exergia física aumenta quando a temperatura da substância investigada se tornar menor. À capacidade térmica constante, a parte dependente da temperatura da exergia física pode ser expressa por:

$$b_{fT} = c_p \left(T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right) \quad (11)$$

em que c_p = capacidade térmica específica à dada pressão constante.

O equilíbrio químico é alcançado quando não existe mais potencial para a ocorrência de reações químicas ou difusão.

A exergia que acompanha um fluxo de calor do sistema a uma temperatura T para o meio a T_0 , estará definida pela seguinte expressão:

$$B_p = \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) Q \quad (12)$$

Que pode ser interpretada como o trabalho realizado por um ciclo de potência reversível que recebe a quantidade de calor Q de uma fonte à temperatura T , e a descarrega para o ambiente à temperatura T_0 . O termo entre parênteses é conhecido como eficiência de Carnot.

Em MORAN (2000) temos que a exergia não apenas pode ser destruída por irreversibilidades, mas também pode ser transferida de ou para um sistema, como nas perdas associadas à transferência de calor para as vizinhanças. Uma melhor utilização de recursos energéticos pode ser conseguida pela redução da destruição de exergia no interior de um sistema e/ou perdas. Um objetivo na análise de exergia é a identificação de locais onde a destruição de exergia e as perdas aconteçam e que estas sejam organizadas tendo em vista sua importância. Isso permite que a atenção seja enfocada em aspectos da operação de um sistema que ofereçam maiores oportunidades para melhorias.

Ainda conforme MORAN (2000), o método da análise de exergia é particularmente apropriado para maximizar o objetivo de um uso mais eficiente de energia, já que ele permite a determinação de rejeitos e perdas em termos de sua localização, tipo e valores reais. Essa informação pode ser usada no projeto de sistemas térmicos, mas também na indicação de esforços para a redução de fontes de ineficiência em sistemas já construídos e na avaliação do custo de sistemas.

Conforme SANCHEZ PRIETO (2003), a determinação do valor termodinâmico de um fluxo em termos do trabalho mecânico que poderia ser extraído dele, e as ineficiências e perdas reais dos sistemas energéticos vinculam estreitamente a aplicação da primeira e da segunda lei da termodinâmica aos citados sistemas, sendo a análise exérgica dotada de ferramentas para uma abrangente e clara discussão sobre as irreversibilidades internas e externas no processo, muito útil para este propósito.

4. MÉTODOS

A identificação do processo que ocorre na unidade industrial (conforme figura 06, relativa à unidade industrial 1) observado os fluxos de entrada de materiais, adição de componentes que viabilizem o processamento e a possibilidade de definir os volumes de controle que pudessem servir de comparativos entre unidades distintas, foram os fatores determinantes para que se adotasse a configuração de estudo a seguir.

A aplicação da lei da Conservação de Energia a um equipamento ou conjunto de equipamentos, exige a delimitação precisa das superfícies de controle dentro das quais estes equipamentos estão contidos, assim como dos fluxos materiais de entrada e saída, relativos a estas superfícies e dos seus respectivos estados termodinâmicos. Tais superfícies delimitam e definem os módulos que são obtidos, em uma primeira aproximação, para estudo do sistema global (figura05).

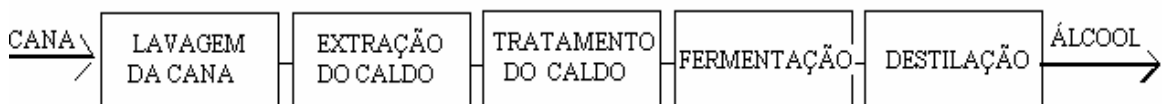


Figura 05-Fluxograma de produção do álcool, com indicação dos volumes de controle a serem analisados.

O exame da energia rejeitada através dos efluentes descartados no processo de produção industrial do álcool etílico carburante será feito através da avaliação exergética dos fluxos de entrada e saída em cada um dos volumes de controle apresentados na figura 06, e os fluxogramas de água das unidades em estudo apresentados.

O volume de controle é entendido como uma região do espaço delimitada por uma fronteira no qual é observado o fluxo de matéria e/ou energia. A fronteira desta região pode ser atravessada por massa, calor, trabalho ou outras formas de energia.

4.1 O PROCESSO INDUSTRIAL DO ÁLCOOL E OS EFLUENTES GERADOS

Basicamente concentrado no processo industrial do álcool, foram fixadas cinco etapas:

1- recepção da matéria-prima (cana-de-açúcar), lavagem e preparação: O foco na água de lavagem é importante, embora ela esteja em circuito fechado, com reaproveitamento no processo, porém carrega consigo grande quantidade de rejeitos sólidos (lodo com elevado teor de umidade) necessitando de tanques de decantação para deposição de resíduos e dos efluentes gerados;

2- extração do caldo da cana-de-açúcar: Nesta etapa a água é utilizada para embebição, diluindo o caldo, matéria prima de todo o processo, promovendo elevada eficiência. A geração de resíduos, tal como o bagacilho e o bagaço de cana, que no decorrer do processo é aproveitado para fins energéticos, apesar dos elevados teores de umidade não são considerados nos cálculos;

3- tratamento do caldo: envolvendo os princípios básicos de eliminação de impurezas, e a obtenção de um produto final em condições de fermentação alcoólica. Nesta fase a troca de calor aproveitando fluxos do processo é importante para a identificação de pontos de aproveitamento termodinâmico;

4- fermentação: onde ocorre o processo de transformação do açúcar em álcool em dornas de grande volume. Os tratamentos utilizados, a lavagem das dornas, a lavagem do CO₂ (emitido na fermentação) geram enorme volume de efluentes;

5- Destilação: onde ocorre a separação do álcool etílico carburante do vinho delevedurado e dos insumos utilizados com a geração do maior volume de efluentes.

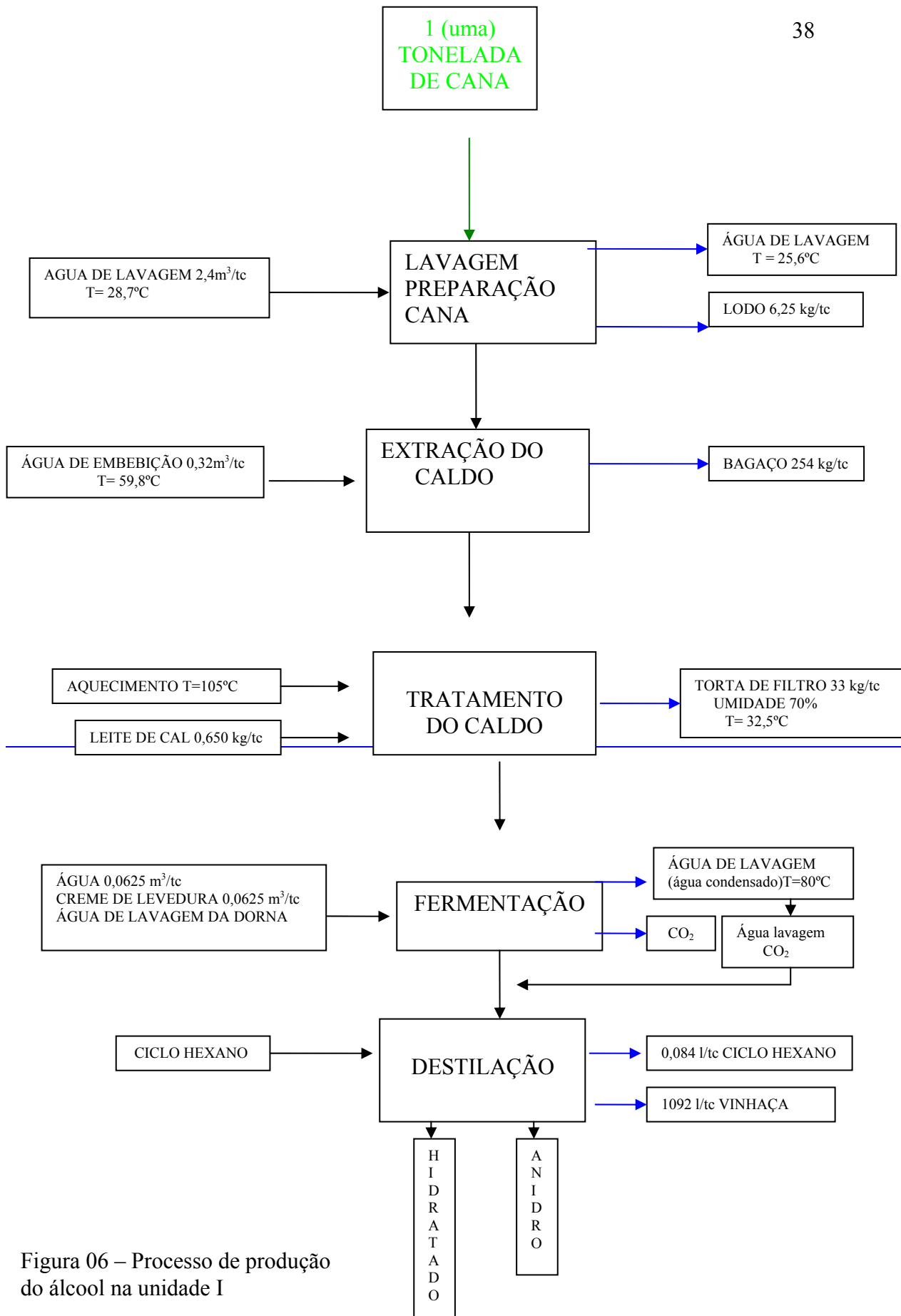


Figura 06 – Processo de produção do álcool na unidade I

Para auxiliar na visualização das entradas e saídas dos produtos, fluxogramas dos processos industriais foram elaborados deles constando as atividades e as principais correntes líquidas geradas.

4.2 TRATAMENTO DOS DADOS

Para um sistema complexo, que trabalha em ritmo contínuo e com alternâncias de entradas e saídas em cada volume de controle, buscou-se estabelecer uma média aritmética para avaliação do fluxo de produtos.

Os balanços foram efetuados através de boletins diários, não sendo possível uma abordagem pontual, dada as oscilações nos medidores de fluxos.

Os balanços hídricos exigem um acompanhamento rigoroso, pois o aproveitamento em circuito fechado, faz com que a água bruta seja recirculada e utilizada em vários estágios do processo antes de sua disposição final.

A água utilizada na lavagem da cana, quase sempre opera em circuito fechado, sendo captada nos tanques de decantação por canaletas e novamente bombeada na operação sobre as esteiras de transporte da cana para o desfibrador. A reposição acontece com as águas de lavagem de piso das áreas de moendas e tratamento do caldo. Os tanques de decantação quando cheios, apresentam uma produção de lodo e este tem sua disposição final na própria lavoura de cana.

4.3 MÉTODOS DE CÁLCULO

É importante enfatizar que estas considerações sobre cálculo de exergia (disponibilidade de energia) são relevantes não somente quando estamos tratando com trabalho produzido (ou trabalho absorvido) por dispositivos ou sistemas, mas também quando se está interessado em avaliar a eficiência de um processo qualquer.

Para a avaliação exergética dos efluentes serão utilizados os dados colhidos junto a boletins diários de produção das empresas contatadas durante a safra 2004/2005 e dos fluxogramas de águas, observadas as diferenças de processos industriais adotados por cada uma delas. As medidas de vazão e temperatura em todos os pontos limítrofes das superfícies de controle foram obtidas do valor médio instantâneo observado nas

entradas e saídas dos volumes de controle, fornecidos pelos próprios departamentos industriais.

O fato da planta sucro-alcooleira ser uma indústria movida à água, apresentando processos irreversíveis em regime permanente, onde os fluxos de alimentação e de saída podem ter seus volumes, temperaturas, entalpias e entropias determinadas, possibilitam o emprego da *equação 9* para a avaliação das exergias perdidas combinada com a *equação 10* que oferece o balanço de entropia.

A aplicação de métodos baseados na primeira e segunda lei da termodinâmica, como passo prévio à compreensão dos valores energéticos perdidos no processo, permite calcular a perda de exergia de acordo com SZARGUT (1988), e obter com o emprego da *equação 9*, o resultado da exergia física descartada através dos efluentes.

$$\Sigma \Delta S = mc_w \left\{ \ln \frac{T_s}{T_e} + \frac{T_e - T_s}{T_0} \right\}$$

$$\delta B = T_0 \Sigma \Delta S$$

As indústrias sucro-alcooleiras empregam o vapor de água como fonte de energia.

A combustão do bagaço nas caldeiras produz vapor de água superaquecido que se expande nas turbinas a vapor, produzindo energia elétrica e liberando vapor saturado a baixa pressão. O vapor de baixa pressão é então aproveitado para satisfazer a demanda de calor da usina. Por outro lado a água na sua forma líquida é usada na troca de calor para reduzir a temperatura de rejeitos e efluentes a níveis ambientais aceitáveis.

As unidades industriais que serviram de parâmetro para o estudo das disponibilidades energéticas estão localizadas em municípios da região de Ribeirão Preto no Estado de São Paulo. Atendendo à solicitação de suas administrações, estas indústrias não serão identificadas.

A caracterização foi realizada por meio de levantamento de dados de produção registrados nos boletins industriais da empresa, referente à safra 2004/2005 (ano 2004).

Os dados técnicos avaliados são os considerados mais importantes, para a caracterização da unidade em estudo, e identificação do seu porte industrial, tais como quantidade de cana moída, eficiência industrial, insumos de produção, balanço de produção, consumo de água, subprodutos gerados, caracterização da matéria-prima e qualidade do produto.

5. RESULTADOS

5.1 RESULTADO DAS CARACTERIZAÇÕES

5.1.1 CARACTERIZAÇÃO DA UNIDADE INDUSTRIAL I

Com os dados de um relatório gerencial diário, foi selecionado um dia da safra 2004/2005, na unidade industrial pesquisada, obtendo-se os seguintes dados:

- Quantidade de cana moída: 5.999,00 toneladas
- Moagem média horária: 251,214 toneladas de cana/hora efetiva
- ART cana: 15,5656 %
- Porcentagem de cana para açúcar: 79,246 %
- Porcentagem de cana para álcool: 20,754 %
- Quantidade de açúcar produzido: 444,809 toneladas
- Quantidade de álcool hidratado produzido: 187,656 m³
- Embebição % cana: 45,53 %
- Embebição % fibra: 388,15 %
- Vapor produzido: 117,53 toneladas/hora
- kg de vapor por tonelada de cana: 467,85 kg

- Impurezas minerais na matéria-prima (cana-de-açúcar): 7,54 kg por tonelada de cana
- Sacarose na cana (polarização): 14,663 %
- Fibra presente na cana: 11,73%
- Bagaço kg por tonelada de cana: 254,40 kg
- Fibra do bagaço: 46,11 %
- Umidade do bagaço: 51,100 %
- ART perdido no bagaço: 3,424%
- Produção de torta de filtro por tonelada de cana: 33 kg
- ART perdido na torta de filtro: 0,184 %
- kg de açúcar por tonelada de cana: 93,566 kg
- Litros de álcool por tonelada de cana: 89,742 litros
- Litros de vinhaça produzidos por litro de álcool: 12,00 litros

5.1.2 PROCESSO INDUSTRIAL DESENVOLVIDO NA UNIDADE I

Na unidade em estudo a capacidade de moagem é de 1.200.000 toneladas de cana-de-açúcar na safra 2004/2005 com rendimento de 89 litros de álcool por tonelada de cana e 93,56 kg de açúcar por tonelada de cana moída.

A recepção da cana transportada por caminhões se inicia com o controle da pesagem através de uma balança colocada na entrada da usina, onde são medidos o peso bruto e a tara. Neste momento também são retiradas amostras da cana, que, levadas ao laboratório para análise em condições padronizadas, determinarão os índices de pol, brix e teor de fibra, importantes para a determinação do rendimento global do processo e o pagamento da cana.

Descarregada dos caminhões por tombadores Hillo, a cana é lançada por esteiras de arraste em uma mesa com inclinação de 45° onde recebe água a temperatura ambiente para remoção das impurezas, pelo princípio da cascata. Esta água, que opera em circuito fechado, após a lavagem (2,4 m³ por tonelada de cana) tem um teor de sacarose de 0,8% e ao sofrer o processo de decantação gera 6,25 kg por tonelada de cana, de lodo.

Um operador do guindaste controla pela velocidade da esteira a altura do colchão de cana conduzida para os picadores e desfibradores.

A extração do caldo da cana (rendimento de 96,495%) é feito num tandem de 6 ternos acionados por 3 turbinas a vapor com pressão de 21 kg/cm², recebendo o bagaço, água de embebição (0,3m³ por tonelada de cana) nos 5° e 6° ternos com recirculação para o 2°, 3° e 4° terno.

A água de embebição é aplicada num percentual relativo à fibra de cana.

Assim, no presente contexto, temos:

quantidade água embebição = (embebição % da fibra x % fibra da cana)x tonelagem cana moída por hora (13)

o que significa (388,15% x 11,73%) x 251,214 t/h = 114,38 toneladas de água por hora.

O bagaço gerado, 254,4 kg para cada tonelada de cana com 51% de teor de umidade e 1,7% de sacarose final, segue parte para queima na caldeira (2,2 kg de vapor/kg bagaço, gerando 0,67 kg/t de cana de cinzas) e outra parte é armazenada. A produção de bagaço por tonelada de cana é uma relação direta entre o percentual de fibra na cana e a fibra do bagaço.

Assim:

quantidade de bagaço por tonelada de cana = $\frac{(\% \text{ fibra cana})}{(\% \text{ fibra do bagaço})} \times 100$ (14)

que no presente caso resulta (11,73 /46,11)X 100 = 254,40 kg bagaço por tonelada de cana moída.

O caldo extraído no primeiro terno vai para a produção de açúcar, e o caldo misto (com água de embebição) segue para uma peneira rotativa com a finalidade de retirar o bagacilho, e em seguida para o tratamento no decantador, sendo que no percurso recebe adição de leite de cal (0,65 kg de cal por tonelada de cana) para correção do pH 5,8 a 6,0 com água a 65°C, mais adição de tanino.

Antes de entrar no decantador é aquecido com vapor vegetal (vapor proveniente dos evaporadores) a 105°C, onde recebe o polímero Flonex 9076.

A parte de baixo do decantador que é o lodo (recebe bagacilho e um pouco de cal para facilitar a filtração) vai para o filtro a vácuo ou filtro prensa, recebendo antes adição de 100 a 200 por cento do peso da torta produzida de água, de onde se extrai a torta de filtro (33 kg por tonelada de cana moída, 75% de umidade e teor de sacarose médio de 1,8%) que é encaminhada para a lavoura. O caldo filtrado retorna ao decantador e recomeça o processo sofrendo novo tratamento.

O caldo saindo do decantador, a 93° ou 95°C vai para o evaporador saindo daí a 105°C para a fermentação necessitando ser resfriado a 27° ou 28° C num trocador de calor antes de chegar às dornas. Antes das dornas, recebe um dispersante (óleo vegetal de soja, 0,07g/m³) e adição de mel elevando o brix para 20°/23°.

Durante a fermentação é grande a produção de CO₂ que em circuito fechado é encaminhado para lavagem em contra corrente com água numa torre de absorção. O etanol é absorvido pela água e o CO₂ lançado na atmosfera. Esta água é recirculada até certo teor alcoólico e depois é utilizada na diluição do leite de levedura para nova alimentação das dornas, juntamente com a adição de ácido sulfúrico para baixar o pH de 3,5 a 4 para pH de 2,2.

Após a dorna morrer (cessar o processo de fermentação) o vinho bruto (10% de concentração de fermento) é enviado para a centrifugação onde ocorre a separação do leite de levedura.

O vinho delevedurado segue para uma dorna pulmão onde é feito os controles de vazão e manutenção do fluxo constante para o aparelho de destilação.

O vinho saindo da dorna volante a 30°/32°C passa por um condensador aonde chega a 65°C (por gases oriundos da coluna **B**), passando em seguida pelo trocador de

calor **K** onde troca calor com a vinhaça (que é retirada na base da coluna **A** uma temperatura em torno de 105°C e a razão de 1092 litros por tonelada de cana) e sobe pela coluna **A** com temperatura em torno de 94°C. Na cabeça da coluna **A** temos álcool flegma a 78° GL, que é conduzido à coluna **B** onde recebe adição de solução de soda cáustica para correção do pH.

Na coluna **B** sai o álcool hidratado a 92,6° GL como produto de topo e a flegmaça como produto de fundo. Nesta coluna extrai-se também o óleo fusel, constituído de produtos secundários da fermentação representados por álcoois superiores, aldeídos e compostos orgânicos.

Na coluna **C** é extraído o álcool anidro. Nesta coluna é adicionado vapor (oriundo do vapor de escape da moenda/casa de força) e sua temperatura na base é de 80°C. No decantador, localizado no topo da coluna é adicionado o ciclo hexano (0,084 litros por tonelada de cana). O hexano é bombeado sem pressurização. Ele retira a água do álcool, arrastando um pouco de álcool junto, indo para a coluna **P** onde aquecido com vapor, o hexano retorna ao processo e a água e o álcool retornam para a coluna **A**, de onde é retirada a água através da vinhaça.

O fluxograma das águas mostra a fonte de captação e as fases do processo onde ela é utilizada, os efluentes gerados e os pontos onde são descartados com as temperaturas avaliadas para os cálculos exergéticos.

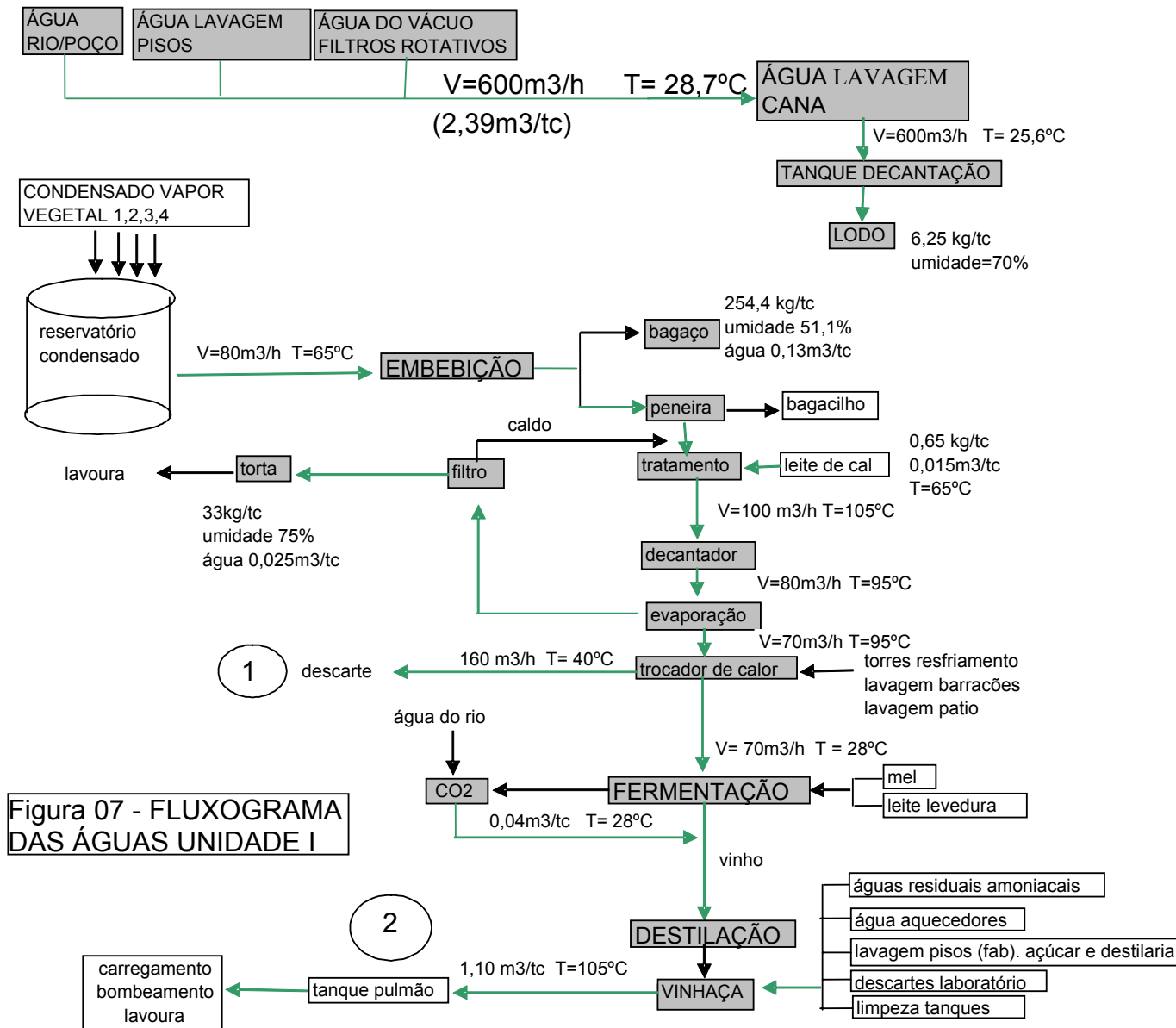


Figura 07 - FLUXOGRAMA DAS ÁGUAS UNIDADE I

5.1.3 CARACTERIZAÇÃO DA UNIDADE INDUSTRIAL II

Com os dados de um relatório gerencial diário, foi selecionado um dia da safra 2004/2005, na unidade industrial pesquisada, obtendo-se os seguintes dados:

- Quantidade de cana moída: 14.662,42 toneladas
- Moagem média horária: 610,934 toneladas de cana/hora
- Porcentagem de cana para açúcar: 84,030 %
- Porcentagem de cana para álcool: 15,970 %
- Quantidade de açúcar produzido: 25.353,83 toneladas
- Quantidade de álcool hidratado produzido: 368,030 m³
- Embebição porcentual da cana: 23,169 %
- Embebição porcentual da fibra: 224,332 %
- Vapor produzido: 260 tv/hora T=416°C e 393°C
- kg de vapor por tonelada de cana: 403,00 kg de vapor
- Impurezas minerais na matéria-prima (cana-de-açúcar): 4,81 kg por tonelada de cana
- Sacarose na cana (polarização): 14,318 %
- Fibra presente na cana: 10,328 %
- Bagaço (kg por tonelada de cana): 227,692 kg
- Fibra do bagaço: 45,36 %
- Umidade do bagaço: 48,03 %
- ART perdido no bagaço: 1,8%

- Produção de torta de filtro por tonelada de cana: 38,288 kg
- ART perdido na torta de filtro: 0,426 %
- kg de açúcar por tonelada de cana: 86,5 kg
- Litros de álcool anidro por tonelada de cana: 82,43 litros
- Litros de vinhaça por litro de álcool produzido: 12,00 litros
- Águas residuais: 1193,033 m³/hora

5.1.4 PROCESSO INDUSTRIAL DESENVOLVIDO NA UNIDADE II

Na unidade em estudo a capacidade de moagem é de 650 toneladas (toneladas de cana-de-açúcar/hora) na safra 2004/2005 com rendimento de 82,43 litros de álcool e 86,5 kg de açúcar por tonelada de cana.

A recepção da cana transportada por caminhões inicia-se com o controle da pesagem através de uma balança colocada na entrada da usina, onde se avaliam o peso bruto e a tara. Neste momento também são retiradas amostras da cana, que, levadas ao laboratório para análise em condições padronizadas, determinarão os índices de pol, brix e teor de fibra, importantes para a determinação do rendimento global do processo e o pagamento da cana.

Descarregada dos caminhões por tombadores Hillo, a cana é lançada por esteiras metálicas em uma mesa com inclinação a primeira de 19° e a segunda de 45° onde recebe água à temperatura ambiente para remoção das impurezas, pelo principio da cascata. Esta água após a lavagem, em circuito fechado, (1.400 m³/h) e ao sofrer o processo de decantação gera 21 kg de lodo por tonelada de cana, com teor de umidade 70%.

Um operador da mesa de cana controla pela velocidade da esteira a altura do colchão de cana conduzida para o picador e o desfibrador.

A extração do caldo da cana é feito num tandem de 6 ternos acionados por 6 turbinas a vapor com pressão de 42 kg/cm², recebendo o bagaço, água de embebição (160 m³ por tonelada de cana) no 6° terno com recirculação para o 5° terno, deste para o

4º terno, deste para o 3º terno e deste para o 2º terno. O bagaço gerado, 227,692 kg por tonelada de cana, com 48,03% de teor de umidade, segue em parte para queima na caldeira (2,18 kg de vapor por kg de bagaço, gerando 10 kg de cinzas por tonelada de cana) e outra parte é armazenada.

O caldo extraído dos seis ternos vai para a produção de açúcar, antes passando (com água de embebição aplicada à taxa de 195 m³/h e T= 60° C) em peneiras rotativas com a finalidade de retirar o bagacilho, e em seguida para o tratamento no regenerador de calor onde se aquece com a vinhaça (150 m³/h e T=97° C, saindo a 68° C). Num segundo regenerador o caldo troca calor com o condensado dos vapores vegetais **V2**, **V3**, **V4** (150 m³/h e T=60° C) saindo no terceiro regenerador a T=84° C, antes de receber a sulfitação e tratamento com adição de leite de cal (1,5 kg de cal por tonelada de cana moída) para correção do pH, com água a 65° C.

O caldo misto (com água de embebição aplicada à taxa de 195m³/h e T= 60° C) segue para uma peneira rotativa com a finalidade de retirar o bagacilho, e em seguida para o tratamento no decantador.

O caldo misto, antes de entrar no decantador é aquecido com vapor vegetal (vapor proveniente dos evaporadores) a 107° C, onde recebe o polímero a 6 ppm.

A parte de baixo do decantador que é o lodo (recebe bagacilho e um pouco de cal para facilitar a filtração) vai para o filtro a vácuo ou filtro prensa, de onde se extrai a torta de filtro (38,8kg por tonelada de cana, 68 % de umidade) que é encaminhada para a lavoura. O caldo filtrado passa por um regenerador de calor e segue o processo de sulfitação para a produção de açúcar.

Outra possibilidade do processo é de o caldo saindo do regenerador de calor, a 90° C, sair diretamente para a preparação do mosto junto com o mel final (46 t/h), ajustando-se apenas o brix (22,0) com adição de água, seguindo daí para a fermentação necessitando ser resfriado a 32° C num trocador de calor antes de chegar às dornas. Antes das dornas, recebe um dispersante (13,3m³).

Durante a fermentação é grande a produção de CO₂ que em circuito fechado é encaminhado para lavagem em contra corrente com água numa torre de absorção. O etanol é absorvido pela água e o CO₂ lançado na atmosfera. Esta água (seis m³/h) vai

para a destilaria. A água é utilizada na diluição do leite de levedura para nova alimentação das dornas juntamente com a adição de ácido sulfúrico. Após a dorna morrer (cessar o processo de fermentação) o vinho bruto (12% de concentração de fermento) é enviado para a centrifugação onde ocorre a separação do leite de levedura.

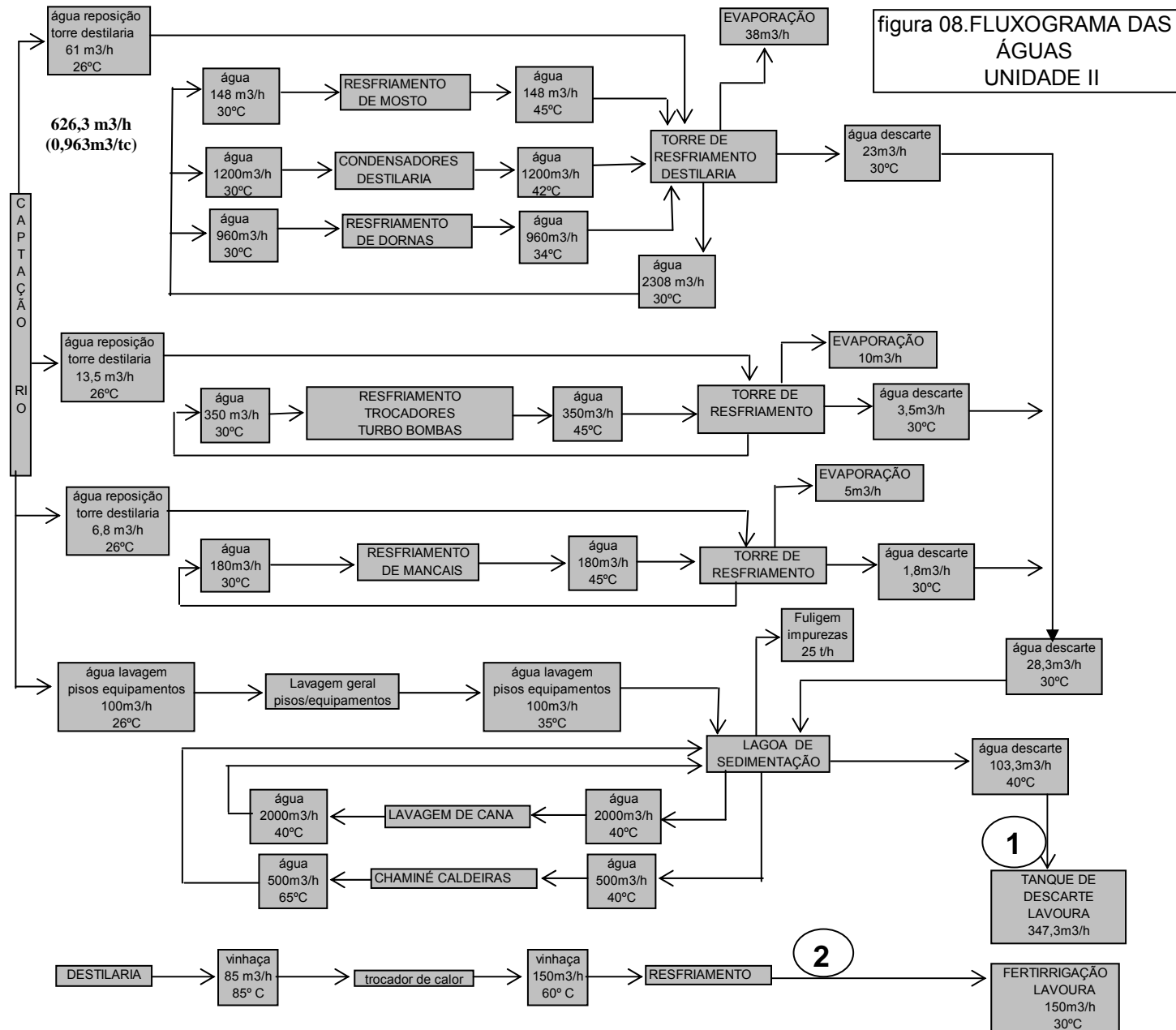
O vinho de levedurado segue para uma dorna pulmão para os controles de vazão e manutenção do fluxo constante para o aparelho de destilação.

O vinho saindo da dorna volante a 34°/35° C passa por um condensador aonde chega a 60° C (por gases oriundos da coluna **B**), passando em seguida pelo trocador de calor **K** onde troca calor com a vinhaça (que é retirada na base da coluna **A** a uma temperatura em torno de 96/101° C e sobe pela coluna **A** com temperatura em torno de 102° C. Na cabeça da coluna **A** temos álcool flegma a 45° GL, que é conduzido à coluna **B** onde recebe adição de soda a 10% para correção do pH).

Na coluna **B** sai o álcool hidratado a 95,5° GL como produto de topo e a flegmaça como produto de fundo. Nesta coluna extrai-se também o óleo fusel, constituído de produtos secundários da fermentação representados por álcoois superiores, aldeídos e compostos orgânicos.

Na coluna **C** é extraído o álcool anidro. Na coluna **C** é adicionado vapor indiretamente (oriundo do vapor de 10 kgf/cm²) e sua temperatura na base é de 155° C, variando de 150° a 160° C, no topo da coluna é adicionado o monoetilenoglicol relação 1/2.

O MEG (monoetilenoglicol) é bombeado sem pressurização. Ele retira a água do álcool, arrastando um pouco de álcool junto, indo para a coluna **P** onde aquecido com vapor, o monoetilenoglicol retorna ao processo e a água e o álcool retornam para a coluna **A**, de onde é retirada a água através da vinhaça.



5.2 RESULTADOS DA EXERGIA

Na unidade I encontramos dois pontos de descartes de efluentes a serem analisados.

O descarte no ponto 1 congrega os efluentes de águas oriundas do processo de tratamento do caldo.

O efluente neste ponto tem sua origem dos vapores vegetais 1, 2,3 e 4, cujos condensados coletados num reservatório de água quente para o processo tem aproveitamento em dois volumes de controle: *extração do caldo* e *tratamento do caldo*.

A extração do caldo recebe água do condensado para embebição, e o caldo misto resultante precisa ter sua temperatura elevada, tratamento que tem por objetivo facilitar a precipitação e remoção de impurezas. Neste aquecimento, a troca térmica ocorre entre o caldo misto e o vapor vegetal, que ao resfriar-se é coletado no reservatório de condensado.

Consideramos os efluentes, apesar das impurezas que carregam como descarte de água para efeitos de calor específico e massa.. A análise usa como ponto de comparação entre as unidades em estudo, a quantidade de água captada por tonelada de cana moída, uma vez que a avaliação que se faz é verificar a quantidade de trabalho útil (exergia) absorvida pelo meio ambiente quando recebe esse efluente, até seu equilíbrio com o entorno em termos físicos (temperatura e pressão).

Assim, para o ponto 1 da unidade I:

$$m = 160\text{m}^3/\text{h} \text{ (massa de efluente lançado por hora)}$$

Em razão de termos a moagem de 215,214 toneladas /hora nessa unidade, a massa de efluente lançado será

$$m = 0,637 \text{ m}^3/\text{tc} \text{ correspondente a } 637 \text{ kg}$$

$$c_w = 4,18 \text{ kJ/kg. K}$$

$$T_s = 40^\circ \text{ C ou } 313^\circ \text{ K}$$

$$T_e = 25^\circ \text{C ou } 298^\circ \text{K}$$

$$T_0 = 25^\circ \text{C ou } 298^\circ \text{K}$$

Aplicando-se as equações **9** e **10** temos a exergia física total nos pontos de descarte.

Unidade	Vazão m ³ /tc	Temp. entrada (°K)	Temp. saída (°K)	Temp. ambiente (°K)	Exergia kJ
I	0,637	313	298	298	972,70

Tabela 01 – Avaliação exergética aplicada ao ponto de descarte 1 da unidade I

O descarte no ponto 2 agrega as águas residuais e de lavagem de pisos e limpeza de tanques, os quais são adicionados à vinhaça.

Os efluentes no ponto de descarte 2 da unidade I, resultam dos volumes de controle *fermentação* e *destilação*.

No volume de controle *fermentação* deve ser levada em conta a lavagem das dornas com água do condensado e também a lavagem de gases fermentados (para arraste de partículas de álcool e liberação de CO₂ para a atmosfera) com água coletada do rio, que se incorporam aos efluentes.

O volume de controle *destilação* possui o maior volume de efluentes do processo de produção industrial do álcool etílico carburante. Nele ocorre a separação de todas as impurezas para a retirada do produto final – álcool etílico, com índice de pureza mínimo de 96,0° GL.

Em razão da utilização do calor para a separação dos diferentes líquidos existentes na mistura hidroalcoólica, a vinhaça (concentrado de resíduos) sai com temperatura superior a 105°C, sendo por isso aproveitada para o aquecimento do vinho que entra na torre de destilação.

Unidade	Vazão m ³ /tc	Temp. entrada (°K)	Temp. saída (°K)	Temp. ambiente (°K)	Exergia kJ
I	1,10	378	298	298	42.003,10

Tabela 02- Avaliação exergética aplicada ao ponto de descarte 2 da unidade I

No processo utilizado pela unidade II também identificamos 2 pontos de descarte de efluentes, assim discriminados:

O ponto de descarte 1 de efluentes, coleta as águas utilizadas nos volumes de controle *extração do caldo, tratamento do caldo e fermentação*, após passagem pela torre de resfriamento. Recebe além das águas de lavagem geral, as águas do volume de controle *lavagem e preparação da cana* e lavagem da chaminé das caldeiras.

Unidade	Vazão m ³ /tc	Temp. entrada (°k)	Temp. saída (°K)	Temp. ambiente (°K)	Exergia kJ
II	0,568	313	298	298	867,33

Tabela 03 – Avaliação exergética aplicada ao ponto 1 da unidade II

No ponto de descarte 2, temos os efluentes oriundos do volume de controle *destilaria*, no qual a vinhaça para ser lançada em lagoa de decantação recebe outros efluentes sendo então resfriada.

Unidade	Vazão m ³ /tc	Temp. Entrada (°K)	Temp. saída (°K)	Temp. ambiente (°K)	Exergia kJ/K
II	0,245	333	303	298	1910,88

Tabela 04 – Avaliação exergética aplicada ao ponto 2 da unidade II

Desta forma encontramos para os efluentes produzidos na unidade I uma perda total de **42.975,80 kJ** e para os efluentes da unidade II, uma perda total de **2778,21 kJ**.

A grande diferença se encontra nas águas residuais do sistema de destilação, onde a Unidade I descarrega quatro vezes e meia mais efluentes por tonelada de cana moída do que a Unidade II. Tal volume pode ser justificado pela convergência de todas as águas de aquecedores, lavagem de pisos e descartes de laboratório que tem como destino a lavoura, resfriando a vinhaça e permitindo que uma solução mais líquida possa ser bombeada pelos equipamentos de irrigação, na Unidade I.

O uso mais racional da água, seu aproveitamento em sistema de recirculação também justifica menos efluentes lançados pela Unidade II, acarretando desta forma menor perda de exergia.

6. CONCLUSÕES

Podemos concluir que o grande diferencial de perdas exergéticas entre as duas unidades do estudo de caso possa estar assentado no seguinte:

A grande diferenciação na eliminação de efluentes ocorre porque em uma delas, na Unidade I apenas uma fração de água é recirculada, enquanto em outra o índice de recirculação é próximo de 95% da água residual.

Toda água residual retorna para o solo, muito embora passem por um processo de resfriamento num lago de contenção ou por torres de resfriamento antes de sua disposição final, fazendo com que as perdas de calor para o meio ambiente quando do lançamento do efluente seja minimizada..

Que boa parte das perdas seja função também da água de embebição, quanto maior, maior a quantidade de vapor a ser utilizada.

- o uso de torres de resfriamento pela unidade II, para o reaproveitamento das águas do processo, observando-se grandes perdas por evaporação, que não estão computadas no cálculo exergético e que não são avaliadas no processo da unidade I;

- o melhor aproveitamento do vapor gerado nas caldeiras, pois se observa na caracterização de ambas as empresas que a unidade I precisa de 467,85 kgv/tc ao passo que a unidade II utiliza para o mesmo processo 403,00 kgv/tc;

- o volume de água captado pela unidade I de 2,39m³ por tonelada de cana faz com que maior volume de água seja aquecido, com baixo aproveitamento térmico;

A otimização do processo produtivo do álcool etílico carburante com aproveitamento de vapores oriundos dos volumes de controle anteriores, e quando

condensado, armazenado em tanques para emprego em água de embebição ou mesmo lavagem de áreas com finalidade de higienização, promovem melhor utilização da água e redução na geração de efluentes e da energia nele introduzida durante o processamento.

A introdução de novos sistemas em substituição à lavagem da cana, como aeração, ou moagem direta sem limpeza são fatores que auxiliam na redução da emissão de efluentes.

7. REFERÊNCIAS

AHERN, JOHN E. (1980). *The exergy method of energy systems analysis*. John Wiley & Sons. New York.

AHRENDTS, J. (1980). *Reference States*. Energy 5, vol.8, pp. 667-677.

ANCIÃES, ADOLPHO WANDERLEY DA FONSECA e outros. (1981). *Avaliação tecnológica do álcool etílico*. CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. 3ª Edição, Brasília.

ARRUDA PINTO, RICARDO SOARES de. (2002). *Indicadores de desempenho de frota de empresas agroindustriais canavieiras brasileiras*. Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). *NBR 9800 - Critérios para lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário*.

BARROS, GLAUCO D.T.de. (1997). *Análise termodinâmica (com determinação das energias disponíveis) em uma destilaria de álcool*. João Pessoa, PB. Dissertação (Mestrado). Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba.

BEJAN, ADRIAN. (1988). *Advanced Engineering Thermodynamics*. John Wiley & Sons. New York.

BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MICHAEL, M. (1996). *Thermal Design and Optimization*. Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, USA & Canada.

BERTHIAUME, RICHARD; CHRISTIAN BOUCHARD; MARC A. ROSEN. (2001). *Exergetic evaluation of the renewability of a biofuel*. Exergy an international journal (4) p. 256-268

BORRERO, M.A.V.; J.T.V. PEREIRA; E.E.MIRANDA. (2003). *An environmental management method for sugar cane alcohol production in Brazil* –Biomass & Energy 25 p. 287-299

BOTERO GARCIA, EDGAR A. (2000). *Valoración exergética de recursos naturales, minerales, agua y combustibles fósiles*. Memoria presentada a la Universidade de Zaragoza para la obtención del grado de Doctor en el programa de Ingeniería Térmica Avanzada y Optimización Energética del Departamento de Ingeniería Mecánica. Zaragoza, diciembre de 2000.

BRODYANSKY, V. M.; SORIN, M. V.; LE GOFF, P. (1994) *The efficiency of industrial processes: exergy analysis and optimization*. Elseviers B. V., The Netherlands.

CAMARGO, CARLOS AUGUSTO DE. Et al (1990) - *Conservação de energia na indústria do açúcar e do álcool: manual de recomendações*. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT); São Paulo. v. 1817.

COPERSUCAR (1989) - *Proálcool: fundamento e perspectivas*. São Paulo. Copersucar.

COPERSUCAR - *Processo de produção- Transporte, pesagem, descarregamento e estocagem da cana*.

- *Processo de produção – A extração do caldo de cana*.

<<http://www.copersucar.com.br>> acesso em abril 2004.

CORTEZ, LUÍS; MAGALHÃES, PAULO; HAPPI, JÚLIO. – *Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização*. Revista Brasileira de Energia, vol. 2, nº2, 1992.

ETANOL - Impactos e problemas <<http://www.ambientebrasil.com.br>> acesso em outubro 2003.

FERNANDES, ELIANA SANTOS LIMA; COELHO, SUANI TEIXEIRA. (1996). *Perspectivas do álcool combustível no Brasil*. USP - Instituto de Eletrotécnica e Energia. São Paulo.

KENNEY, W. F. (1984). *Energy conservation in the process industries*. Academic Press, Inc. Florida, USA.

KESSERLINGH, SÔNIA MARIA. (2002). *Minimização e reuso de águas em indústrias sucro-alcooleiras: estudo de caso*. São Carlos, SP. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

KOTCHETKOFF, PAULO ANDRÉ. (1999). *Combustíveis automotivos. Álcool – oportunidade de auto-suficiência*. Monografia apresentada para conclusão do Curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* em Política e Estratégia – Convênio NAIPE/USP-ADESG/SP, Universidade de São Paulo.

LEÃO, REGINA MACHADO. (2002). *Álcool energia verde*. São Paulo. Igual Editora.

LOPES, ADRIANA A. (2003). *Estudo da Gestão e do Gerenciamento Integrado dos Resíduos Sólidos Urbanos no Município de São Carlos (SP)*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

MANUAL CONSECAN – Conselho dos produtores de cana, açúcar e álcool do Estado de São Paulo. Manual Orplana. <<http://www.orplana.com.br>> acesso em abril 2004.

MARAFANTE, LUCIANO J. (1993). *Tecnologia da fabricação do álcool e do açúcar*. São Paulo. Ícone editora.

MARCHIZELI, JOSÉ HENRIQUE CAMARGO; ALVES, SALETE MARTINS e HEYMEYER, TOBIAS. (2003). *Gestão e Gerenciamento de resíduos sólidos para o Núcleo de Manufatura Avançada (NUMA)*- disciplina SHS 5715 – Gerenciamento de Resíduos Sólidos, EESCUSP.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. (1996). *Balço de energia na produção de cana-de-açúcar e álcool nas usinas cooperadas: 1996*. Convenção sobre mudança do clima.

MODELL, MICHAEL; TESTER, JEFFERSON W. (1996). *Thermodynamics and its applications*. Prentice Hall PTR. New Jersey.

MORAN, MICHAEL J.; SHAPIRO, HOWARD N. (2000). *Princípios de termodinâmica para engenharia*. Rio de Janeiro, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora AS.

NEBRA PEREZ, SILVIA A. (2002). *Exergia - sistemas fechados*. Notas de aula. Departamento de Energia. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP.

OLIVEIRA, C.A.A. de. (1998). *Programa de prevenção de poluição industrial. Estudo de caso no processo de acabamento de metais de uma indústria*. São Carlos, 125p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

OMETTO, ALDO ROBERTO. (2000). *Discussão sobre os fatores ambientais impactados pelo setor sucroalcooleiro e a certificação socioambiental*. São Carlos, SP. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

OMETTO, ALDO ROBERTO & ROMA, WOODROW NELSON LOPES. (2004). *Exergy losses from atmospheric emissions produced by the fuel ethanol life cycle in Brazil*. In: 17th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy and Process Systems: Energy-Efficient, Cost-Effective, and Environmentally-Sustainable Systems and Process. ISBN. 968-489-027-3. Guanajuato, Mexico. Proceedings..., Rivero, R.; Monroy, L.; Tsatsaronis, G. (Eds.), Instituto Mexicano Del Petróleo, July 7-9, 2004. v.2.p.987-996.

PEREIRA, JOSÉ ALMIR RODRIGUES. (2002) - *Geração de resíduos industriais e controle ambiental*. Departamento de Hidráulica e Saneamento do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Pará (UFPA).

RASOVSKY, E. MILAN. (1973). *Álcool-Destilarias*. Coleção Canavieira nº 12. Instituto do Açúcar e do Álcool. Rio de Janeiro.

REVISTA DO CREA. (2003). – *Energia cogeração - em busca de soluções economicamente viáveis*. Revista do CREA-SP. Ano III nº 10, julho/agosto 2003. São Paulo.

RUSSELL, LYNN D.; ADEBIYI, GEORGE A. (1993). *Classical Thermodynamics*. Saunders College Publishing. Philadelphia.

SANCHEZ PRIETO, MARIO GABRIEL. (2003). *Alternativas de cogeração na indústria sucro-alcooleira, Estudo de caso*. Campinas, SP. Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

SZARGUT, J. (1980). *International Progress in Second Law Analysis*. Energy, 5, pp.709 - 718

SZARGUT, JAN; MORRIS, DAVID R.; STEWARD, FRANK R. (1988). *Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes*. Hemisphere Publishing Corporation. New York.

SZARGUT, J. (1999). *Exergy analysis of thermal processes, ecological cost*. In: Proceedings of the International Workshop “Advances in Energy Studies: energy flows in ecology and economy”. Porto Venere, Itália.

TETI, LAURA. (2003). *Biomassa para não desperdiçar*. UNICA, novembro, 2003.

UNICA (2003) - *Álcool: história de um combustível sustentável* - Publicado em 1997 pela Associação das Indústrias de Açúcar e de Álcool do Estado de São Paulo - AIAA - (Ed. Segmento); – site da ÚNICA-União da Agroindústria Canavieira de São Paulo. <<http://www.unica.com.br>> acesso em outubro 2003.

UNICA (2004) – *Açúcar e álcool do Brasil – Commodities da Energia e do Meio Ambiente*. União da Agroindústria Canavieira de São Paulo, maio de 2004.

_____.(2004) - *Cana de açúcar – avanço tecnológico. Açúcar e álcool sem mistérios* <<http://www.unica.com.br>> acesso em maio de 2004.

VAN WYLEN, GORDON JOHN; SONTAG, RICHARD E. (1976). *Fundamentos da termodinâmica clássica*. Editora Edgard Blücher Ltda . 1976. São Paulo, Brasil.

VILLARINO, LIDIA RANZ. (1999). *Análisis de los costes energéticos de la riqueza mineral terrestre. Su aplicación para la gestión de la sostenibilidad*. Memoria presentada en la Universidad de Zaragoza para la obtención del grado de Doctor en el programa de Optimización Energética del Departamento de Ingeniería Mecánica. Zaragoza, abril de 1999.

WALL G.; GONG, M. (2001). *On exergy and sustainable development – part 2 – Indicators and Methods*. Exergy international journal1 (4) (2001) p. 217-233.

WARK, K. Jr. (1995) *Advanced thermodynamics for engineering*. Mc Graw-Hill, Inc. New York