

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**REAPROVEITAMENTO DE ÁGUA EM UMA INDÚSTRIA
SUCROALCOOLEIRA**

Milton Rogério Pereira

Engenheiro Químico, UEM, 2010.

Orientador: Dr. Paulo Roberto Paraíso

Co-Orientador: Dr. Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani

Dissertação de Mestrado
submetida à Universidade
Estadual de Maringá, como
parte dos requisitos necessários
à obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Química.

Maringá - PR - Brasil

Dezembro de 2010

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

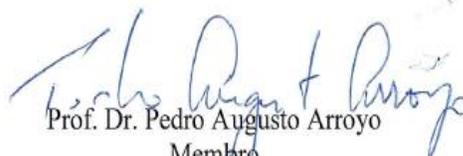
Esta é a versão final da Dissertação de Mestrado apresentada por Milton Rogério Pereira perante a Comissão Julgadora do Curso de Mestrado em Engenharia Química em 22 de dezembro de 2010.

COMISSÃO JULGADORA


Prof. Dr. Paulo Roberto Paraiso
Orientador


Prof. Dr. Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani
Coorientador


Prof. Dr. Claiton Moro Franchi
Membro


Prof. Dr. Pedro Augusto Arroyo
Membro

AGRADECIMENTOS

À Deus, por tudo que me é concedido e aos meus pais, José Valter (memória) e Sonia, e minhas irmãs Flávia e Paula, pelo apoio e incentivo que sempre me deram;

À minha esposa, Camila, pelo amor, paciência e companheirismo;

Aos Professores Mauro Antônio da Silva Sá Ravagnani e Paulo Roberto Paraíso, pela oportunidade de realizar este projeto e por suas orientações nos trabalhos realizados durante a pesquisa;

E, por fim, a todos que de alguma forma colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

REAPROVEITAMENTO DE ÁGUA EM UMA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA

AUTOR: MILTON ROGÉRIO PEREIRA

ORIENTADOR: PROF. DR. PAULO ROBERTO PARAÍSO

**CO-ORIENTADOR: PROF. DR. MAURO ANTONIO DA SILVA SÁ
RAVAGNANI**

Dissertação de Mestrado; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química;
Universidade Estadual de Maringá; Av. Colombo, 5790, Bloco E-46, Sala 09; CEP
87020-900 - Maringá - PR, Brasil, defendida em 22 de dezembro de 2010.

RESUMO

Atualmente, as indústrias de açúcar e álcool estão no auge de sua produtividade, investindo cada vez mais para diminuir o custo de produção. As perdas no processamento de seus produtos podem e devem ser minimizadas. Neste contexto a indústria nacional está submetida a dois grandes instrumentos de pressão. De um lado, as imposições do comércio internacional pela melhoria da competitividade e, do outro, as questões ambientais e as recentes condicionantes legais de gestão de recursos hídricos, particularmente as associadas à cobrança pelo uso da água. A Usina Santa Terezinha, localizada no Distrito de Iguatemi, município de Maringá-PR, utiliza duas fontes de captação, água da represa Chapecó e de um poço semi-artesiano. Busca-se neste trabalho identificar os principais pontos críticos do processo responsáveis pelo aumento das perdas de água nas indústrias de açúcar e álcool, bem como a redução da captação atual da Usina. Para alcançar os objetivos propostos, de mostrar a importância do reúso das águas residuárias geradas nas indústrias do setor sucroalcooleiro, a metodologia empregada envolveu o levantamento de fluxogramas de águas e resíduos no parque industrial da empresa. Um modelo de otimização foi desenvolvido para a minimização da água descartada. O conjunto de restrições leva em conta os balanços materiais no sistema, bem como imposições das condições operacionais em termos percentuais. O estudo busca

otimizar as condições de operação utilizando torres de resfriamento para reduzir a temperatura da água utilizada no processo, de forma que seja utilizada em circuito fechado, visando minimizar a captação existente. Como resultados, em função do menor volume de captação e devolução de efluentes, conseguiu-se captar o mínimo de água barrenta em dias chuvosos, ter volume suficiente para recirculação nos equipamentos e atender as exigências governamentais quanto à qualidade dos efluentes, além de se pagar o mínimo pela captação e devolução dos efluentes, quando da sua cobrança efetiva. A implantação desse sistema custará R\$ 362.000,00, com implantação de torres de resfriamento. Considerando-se o custo da soma da água captada com o efluente devolvido de R\$ 0,23 / m³, tem-se ao final de uma safra de aproximadamente 160 dias efetivos uma redução de R\$ 121.881,00 em relação à diminuição da captação.

Palavras chaves: Reuso de água, indústria sucroalcooleira, torre de resfriamento.

REUSE OF WATER IN A SUGARCANE INDUSTRY**AUTHOR: MILTON ROGÉRIO PEREIRA****SUPERVISOR: PROF. DR. PAULO ROBERTO PARAÍSO**

Master Thesis; Chemical Engineering Graduate Program; State University of Maringá; Av. Colombo, 5790, BL E46 - 09; CEP 87020-900 - Maringá - PR, Brazil, presented on December, 22th 2010.

ABSTRACT

Sugar cane has been around since ancient times, and now the industries of sugar and alcohol are at the peak of their productivity by investing more to reduce the production cost. One of the factors that sugar and alcohol can improve is related to the losses in the processing of their products. Currently the domestic industry is subject to two major instruments of pressure. On one hand, the constraints of international trade by improving competitiveness and on the other, environmental issues and recent legal constraints of water resources management, particularly those related to charging for water use. Usina Santa Terezinha, located in Iguatemi District, city of Maringá-PR, using two sources of funding, Chapecó water from the dam to meet the cooling of bearings mills. Therefore, this paper seeks to identify the main critical points of the process responsible for the increase of water losses in the industries of sugar and alcohol and reduce the uptake current distillery. To achieve its objectives, to show the importance of reuse of wastewater generated in the industries of sugar and alcohol sector, the methodology involved two actions: a literature review and survey flowchart of water and waste in the industrial park of a unit of sugar production and alcohol in the municipality of Maringá. The study will seek to use cooling tower to reduce the temperature of the water for its and other to reuse in a closed circuit. As a result, according to the lower volume capture and return of effluents, it was possible to capture a minimum of muddy water on rainy days,

having sufficient volume for recirculation in equipment and meet government requirements on the quality of effluents, in addition to paying the minimum by the capture and return of effluent when its effective recovery. The deployment of this system will cost \$201.111,00 with cooling towers. Considering the cost of water collected with the effluent returned of \$ 0.13 / m³, has been the end of a crop of about 160 days effective an reduction of \$ 67.711,00, in compare the reduce capture .

Key-words: Water reuse; Sugarcane Industry; Cooling Tower.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
SÍMBOLOS.....	X
1 INTRODUÇÃO.....	01
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	03
2.1 Cana de açúcar.....	03
2.2 Água em Indústria sucroalcooleira.....	04
2.2.1 Necessidade de água na indústria sucroalcooleira.....	05
2.2.2 Reaproveitamento de água.....	10
2.2.3 Etapas de maior demanda de água e geração de resíduos.....	10
2.3 Resfriamento evaporativo.....	12
2.3.1 Princípio de funcionamento de uma torre de resfriamento.....	13
2.3.2 Variáveis de processo e especificação da torre de resfriamento.....	15
2.3.3 Aspectos operacionais.....	15
2.4 Otimização.....	17
2.4.1 Estratégia de otimização.....	18
2.4.2 Função objetivo.....	18
2.4.3 Classificações dos Modelos (Edgar <i>et al</i> ,2001).....	18
2.4.4 Programação Linear.....	20
2.4.5 Otimização do Consumo de Água na Indústria de Produção de Açúcar e Álcool.....	21
3 ESTUDO DE CASO.....	23
3.1 Usina Santa Teresinha.....	23
3.1.1 Preparo e extração do caldo de cana.....	24
3.1.2 Evaporação.....	26
3.1.3 Produção de álcool.....	27
3.2 Situação atual do circuito de água.....	29
3.2.1 Captação.....	31
3.2.2 Água condensada.....	33
3.3 Proposta de otimização do processo do uso de água numa indústria açucareira	34

3.3.1	Dimensionamento das torres.....	34
3.3.1.2	Vinhaça.....	34
3.3.1.3	Água condensada.....	35
3.4	Minimizar a geração de água condensada.....	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1	Balço de massa.....	39
4.2	Água utilizada no processo produtivo.....	40
4.3	Minimização da geração de água condensada.....	47
5	CONCLUSÕES.....	49
6	SUGESTÕES.....	51
	REFERÊNCIAS.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Composição da cana de açúcar.....	03
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.2. Esquema de captação - circuitos abertos.....	06
Figura 2.3. Distribuição do uso de água no processo industrial.....	07
Figura 2.4. Sistema de resfriamento.....	12
Figura 3.1. Sistema de moagem com embebição composta.....	26
Figura 3.2. Fluxograma de águas.....	30
Figura 3.3. Proporção de custos da torre de resfriamento.....	36
Figura 4.1. Evaporador.....	40
Figura 4.2. Lavagem de cana.....	41
Figura 4.3. Embebição.....	41
Figura 4.4. Evaporação.....	42
Figura 4.5. Fabricação de açúcar.....	43
Figura 4.6. Destilaria.....	43
Figura 4.7. Vinhaça.....	44
Figura 4.8. Diluição de fermento.....	44
Figura 4.9. Produtos Químicos.....	45

SÍMBOLOS

Q	Vazão (m ³ /h)
M	Moagem de cana (ton/h)
F	Teor de fibra da cana (%)
D	Descarte de água condensada (m ³ /h)
UB	Teor de umidade do bagaço (%)
BB	Brix do bagaço (%)
BM	Brix do caldo misto (%)
BP	Brix do caldo primário (%)
EF	Percentual de embebição em relação às fibras (%)
CF	Vazão de caldo filtrado (ton/h)
AU	Água condensada utilizada (m ³ /h)
BF	Brix do caldo filtrado (%)
QM	Vazão de caldo misto (ton/h)
FBT	Teor de fibra em percentagem de bagaço no primeiro terno da moenda (%)
TC	Tonelada de cana

1. INTRODUÇÃO

De toda água disponível no mundo, apenas 2,5% é água doce, distribuída da seguinte forma: 69% em geleiras e neves eternas, 30% de água subterrânea, 0,7% em outras situações tais como umidade do solo, pantanais e solos congelados e, por fim, 0,3% em rios e lagos. Pelos números quantitativos acima destacados, da disponibilidade hídrica no mundo, pode-se avaliar rapidamente a importância e a necessidade de preservação e reutilização dos recursos hídricos (GLEICK, 1996).

Sendo a água um bem finito, a preocupação com a disponibilidade e a qualidade desse bem são aspectos que estão cada vez mais em discussão em todo o mundo. No Brasil, além disso, a questão da outorga e paga pela água e o princípio do poluidor-pagador, fazem, do reuso da água, um tema relevante no meio científico e econômico, como forma de minimizar o uso dos recursos hídricos existentes.

A importância dos recursos hídricos em qualquer processo de desenvolvimento socioeconômico é inquestionável, particularmente no mundo atual, onde a água, além de cumprir o seu papel natural de abastecimento das necessidades humanas, animais e produtivas, vem, cada vez mais, sendo degradada, ao servir como veículo para os despejos de efluentes urbanos, industriais, agrícolas e extrativos (ROCHA, 2005).

Dentre os usuários de água existentes, as indústrias sucroalcooleiras são as que apresentam maiores demandas e geram proporcional volume de resíduos a serem descartados. Não obstante, é um setor com grande oportunidade de racionalização no consumo de água e no descarte de efluentes.

No Estado de Paraná, a indústria sucroalcooleira possui papel fundamental na economia. No entanto, esta agroindústria é também um usuário intensivo de água, tanto na irrigação quanto no processo industrial, gerando proporcional volume de resíduos e tornando-se um potencial poluidor dos corpos d'água. Algumas ações que contribuem para a racionalização são: o reuso de águas servidas, a minimização de desperdícios, a adequação da quantidade da água à sua aplicação, a melhoria da manutenção do sistema para reduzir as perdas e a adoção de tecnologias hidricamente eficientes. Assim, promove-se a redução dos volumes captados e devolvidos aos corpos d'água (TORQUATO et al., 2004).

Desta forma, o desenvolvimento de estudos sobre o uso e reuso de água no setor sucroalcooleiro é uma necessidade cada vez mais acentuada, pois contribui para a preservação dos recursos ambientais do planeta e para a redução de custos de produção, de forma a manter este tipo de indústria sempre competitivo no mercado globalizado.

Em vista disso, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o reaproveitamento de águas em uma indústria sucroalcooleira por meio da instalação de torres de resfriamento.

Os objetivos específicos são:

- Levantar as correntes de captação de água no processo industrial;
- Quantificar o volume de captação de cada corrente;
- Desenvolver modelos de otimização para a minimização da água descartada e da vazão e brix do caldo misto;
- Reaproveitar a água condensada por meio da instalação de uma torre de resfriamento e reutilizá-la na embebição da moenda, diluição do fermento, diluição dos produtos químicos, limpeza de pisos e sanitários;
- Implantar uma torre para resfriar a vinhaça, dimensionada para eliminar a captação existente;
- Avaliação econômica.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Cana de açúcar

A cana-de-açúcar é, talvez, o único produto de origem agrícola destinado à alimentação que ao longo dos séculos foi alvo de disputas e conquistas, mobilizando homens e nações. Durante o Império, o país dependeu basicamente do cultivo da cana e da exportação do açúcar.

Originária do sudeste da Ásia, onde é cultivada desde épocas remotas, a cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) é uma gramínea perene. É própria de climas tropicais e subtropicais, sendo cultivada comercialmente em mais de 70 países e territórios, localizados entre os paralelos 35° N e 35° S e sua exploração concentrou-se, no início, sobre a espécie *Saccharum officinarum* (GOMES; LIMA, 1964). A composição média da cana de- açúcar é apresentada na Tabela 2.1:

Tabela 2.1. Composição da cana de açúcar.
Fonte: PELLEGRINI (2009).

COMPOSIÇÃO	TEOR (%)
ÁGUA	65-75
AÇÚCARES	11-18
FIBRAS	8-14
SÓLIDOS SOLÚVEIS	12-23

A cultura da cana é das mais importantes do mundo tropical, gerando centenas de milhares de empregos diretos. É uma importante fonte de renda e desenvolvimento. O interior paulista, principal produtor mundial de cana-de-açúcar, é uma das regiões mais desenvolvidas do Brasil, com elevados índices de desenvolvimento urbano e renda per capita muito acima da média nacional.

No Brasil, o açúcar é produzido a partir da cana, enquanto na Europa é quase que totalmente produzido a partir da beterraba. Hoje, no Brasil, a cana é também utilizada para a produção de álcool.

2.2. Água em indústria sucroalcooleira

A indústria açucareira é um dos seguimentos industriais mais antigos no Brasil, tendo a partir do Programa Nacional de Álcool (1975) se tornado ambientalmente importante em função do incremento na produção de etanol, sub-produto obtido de mel final - resíduo da fabricação de açúcar. O etanol passou a ser utilizado em larga escala diretamente como combustível e em substituição ao aditivo tóxico, utilizado na gasolina, o chumbo tetraetila. Embora seja um programa extinto na esfera governamental, trata-se do programa mais bem sucedido em produção de energia renovável em larga escala, com forte interesse internacional.

Atualmente, o setor sucroalcooleiro nacional passa por um processo de expansão significativo, em função das oportunidades no mercado nacional e internacional, havendo tanto as implementações de novas unidades, quanto ampliações e modernizações nas unidades existentes. Essa expansão é, sem sombra de dúvida, o fator mais marcante do agronegócio, diante da busca por energias alternativas e renováveis que venham a substituir e/ou reduzir a dependência do petróleo.

O setor sucroalcooleiro tem estado no centro dos debates das políticas públicas ambientais, sendo objeto de discussão: a sustentabilidade e o uso de água.

A escassez de água no mundo é agravada em virtude da desigualdade social e da falta de manejo e usos sustentáveis dos recursos hídricos. Em regiões onde a situação de falta d'água já atinge índices críticos de disponibilidade.

Conforme Donaire (1995), as portas do mercado e do lucro se abrem cada vez mais para as empresa que não poluem e poluem menos ou deixam de poluir. Segundo Luccas (2000), no Brasil, apesar de haver abundância de água a situação já está se tomando alarmante em vários pontos. Urge a necessidade de um controle sobre seu uso. Atualmente já estamos passando por um processo de transição através do qual a água deixará de ser um bem do qual se pode usufruir livremente.

O Estado de São Paulo já definiu os valores de cobrança pelo uso da água e despejo de efluentes industriais ou esgoto nas bacias. Essa cobrança será aplicada às empresas concessionárias (como a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – Sabesp) que fazem abastecimento e saneamento, indústrias, comércios e grandes

usuários urbanos, como shoppings, condomínios e hotéis, que usam o produto retirado dos mananciais e poços e não pagam nada por isso. Mas vai acabar sendo repassado ao bolso dos quase 20 milhões de habitantes da Grande São Paulo, o consumidor residencial.

As contas de água terão acréscimo de 2 a 3%, segundo estimativa do Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Hoje, os consumidores só pagam pela captação da água, tratamento e distribuição feita pelas empresas de abastecimento, mas nada pela água em si.

2.2.1. Necessidade de água na indústria sucroalcooleira

O setor canavieiro inclui-se entre os setores com uso intensivo de água para o desenvolvimento das atividades industriais, tal qual a matriz produtiva brasileira, que se apóia largamente no uso intensivo dos recursos hídricos, estando essa condição na base do processo de desenvolvimento, tornando-se necessário que a gestão integrada dos recursos hídricos esteja inserida entre as prioridades nacionais (MACEDO, 2005).

De acordo com Matioli (2001), o uso da água para irrigação da cana-de-açúcar no Brasil é mínimo. Praticamente toda a cana produzida no nordeste é cultivada em condições de sequeiro, isto é, sem o emprego da técnica de irrigação. A indústria sucroalcooleira utiliza, tradicionalmente, o chamado plantio de ano e meio com umidade natural, ou plantio de ano também com umidade natural. O chamado plantio de inverno, com ocorrência no período seco, exige irrigação de salvamento como segurança, com recomendação de duas lâminas de 30 a 40mm, sendo pouco utilizado.

A irrigação justifica-se como recurso tecnológico indispensável ao aumento da produtividade das culturas, em regiões onde a insuficiência ou má distribuição das chuvas inviabiliza a exploração agrícola (MACEDO, 2005).

A irrigação da cana-de-açúcar a nível nacional usa-se tanto a “irrigação de salvação”, após o plantio de cana, para garantir a brotação em longos períodos sem chuva, quanto a “irrigação suplementar”, para atenuar os déficits hídricos.

Em relação ao uso de água no processamento industrial, pretende-se a comparação entre necessidade de água e captação efetiva de água, sendo a primeira resultante da soma de todos os usos no processo, como se todos os circuitos de água

fossem abertos e a segunda resultante da captação efetiva de água para reposição nos circuitos existentes.

Elia Neto (1995) apresentou levantamento indicando que a necessidade de água de uma usina seria de $21\text{m}^3/\text{t.cana}$, se os circuitos fossem totalmente abertos.

Leite (2005) apresentou balanço hídrico prevendo as necessidades de água considerando: um mix de produção de 50% para açúcar e 50% para álcool, a implementação de sistema de cogeração, como também a não utilização de lavagem de cana, concluindo que seriam necessários $19\text{m}^3/\text{t.cana}$, se os circuitos fossem totalmente abertos, como pode ser observado na Figura 2.2.

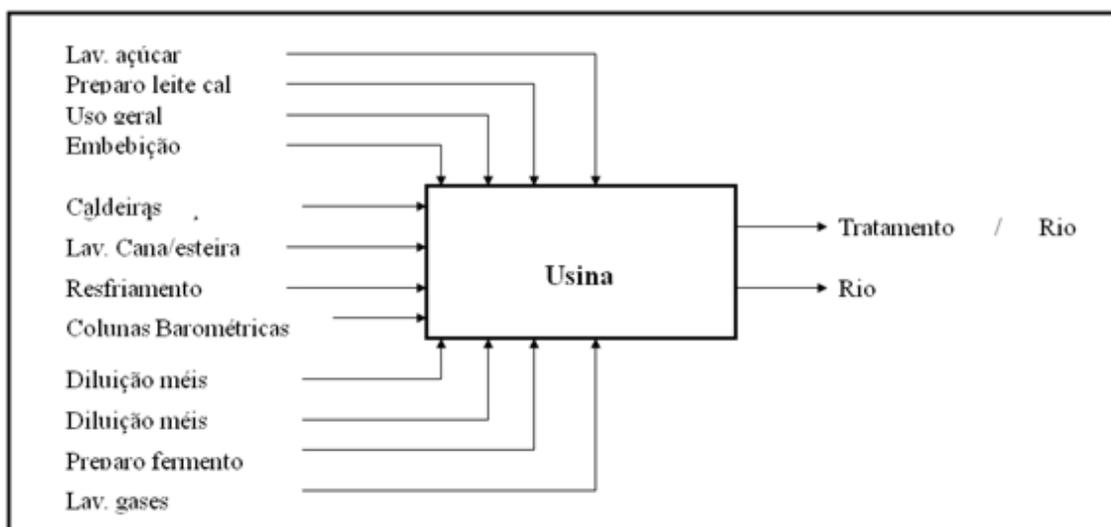


Figura 2.2. Esquema de captação - circuitos abertos.

Fonte: LEITE (2005).

Ressalta-se que este sistema aberto, foi utilizado no passado por várias unidades da indústria açucareira, instaladas nas proximidades de grandes cursos d'água, sendo a água captada, utilizada no processo e lançada em rio, após tratamento em lagoas de decantação, anaeróbia, facultativa e polimento, nos casos em que houvesse acréscimo de matéria orgânica (água de lavagem de cana), ou ainda lançada diretamente, quando a legislação permitia (águas de resfriamento).

Segundo Leite (2005), o uso de água está concentrado em seis grupos: resfriamento de condensadores, produção de vácuo nas colunas barométricas, resfriamento de dornas, lavagem de esteira, outras águas de resfriamento e outros usos, conforme Figura 2.3.

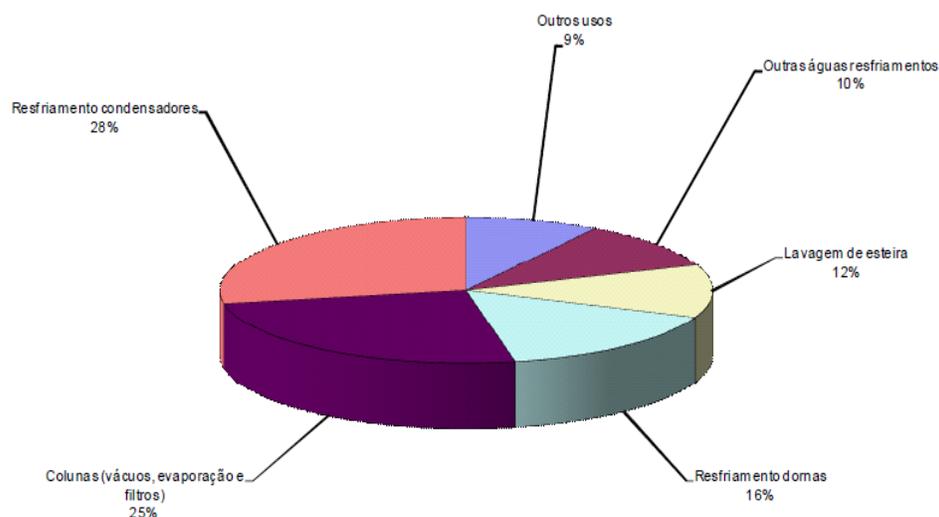


Figura 2.3. Distribuição do uso de água no processo industrial.
Fonte: LEITE (2005).

Segundo Barbieri (2007), a produção limpa estabelece uma hierarquia de prioridades de acordo com a seguinte sequência: Prevenção, redução, reúso, reciclagem, tratamento com recuperação de materiais e energia, tratamento e disposição final.

A indústria sucroalcooleira vem, há muito tempo, investindo no estudo e fechamento de circuitos de água, com maior intensidade a partir do Plano Estadual de Recursos Hídricos (1990), no estado de São Paulo, e do início da discussão pública sobre cobrança pelo uso da água. A evolução nos circuitos de água passam a ser apresentadas de forma sucinta.

Águas de resfriamento de condensadores e dornas – Este circuito passou a ser utilizado em conjunto por meio do efeito cascata – utilizando a água nas dornas e posteriormente nos condensadores, de tal forma a ter-se uma redução de volume de água necessário em cerca de 16%. O circuito passou a ser fechado, sendo adotados sistemas de resfriamento evaporativo – torres de resfriamento, com necessidade de água apenas para reposição das perdas por evaporação e arraste – cerca de 2 a 5% da água em circulação. Existem estudos em andamento, com intenção de utilizar água mais fria neste circuito – denominado “geladinho”, com ganhos em relação à redução do volume de água em circulação (BRAILE et al., 1993).

Águas de lavagem de cana e esteira – A cana-de-açúcar, geralmente, é lavada antes de ser processada. Esta operação destina-se a retirar os resíduos sólidos que são carregados durante a operação de corte, transporte e recepção na usina. Para a lavagem da cana-de-açúcar, utiliza-se uma quantidade significativa de água. Os fabricantes de equipamentos de usinas de açúcar e álcool recomendam, para o caso de carregamento mecanizado, a utilização de 6000 litros de água por tonelada de cana. Entretanto, a utilização é bastante variável nas usinas, indo de 2000 até 7000 litros de água por tonelada de cana, de acordo com a quantidade de água disponível. A água utilizada para a lavagem, tanto pode ser proveniente de um manancial qualquer ou ser da própria água utilizada nas colunas barométricas (BRAILE et al., 1993).

De acordo com Braile et al. (1993), as águas que saem do processo de lavagem da cana deverão passar por um gradeamento, de preferência de remoção mecânica, a fim de retirar os materiais sobrenadantes e outros sólidos separáveis. Após o gradeamento, essas águas deverão passar por um sistema de decantação, a fim de que sejam removidos os sólidos decantáveis. Após esse tratamento as águas poderão ser utilizadas na fertirrigação da lavoura juntamente com a vinhaça, evitando-se o lançamento desta diretamente ao corpo receptor.

Águas condensadas dos evaporadores ou amoniacais – O caldo clarificado é uma solução diluída de sacarose e outras substâncias. Antes que a cristalização da sacarose possa se efetuar, a maior parte da água deve ser removida. Esta remoção é feita em dois estágios, utilizando evaporadores aquecidos a vapor. Durante a evaporação do suco clarificado nos evaporadores, são retirados e condensados cerca de 500 a 550 litros de água por tonelada de cana. As águas condensadas por evaporadores devem ser reutilizadas no processamento industrial (BRAILE et al., 1993).

Água de colunas barométricas ou dos multijatos – Os vapores que saem da câmara de caldo do último vaso vão ao condensador. Esses vapores vêm acompanhados de gases incondensáveis e, como há necessidade de condensação intensa e de retirada dos mesmos, o condensador deve ser de grande potência e dotado de dispositivo que permitam sua

retirada. Os condensadores gastam 35 litros de água para condensar 1 kg de vapor, porém, como os gases são em parte incondensáveis, a bomba de água, por medida de segurança, deve fornecer de 40 a 50 litros de água, correspondendo a 12000 litros de água por tonelada de cana (BRAILE et al., 1993).

Águas de resfriamento – Nesta categoria se enquadram as águas de resfriamento de mancais da moenda e turbo - geradores. Circuito que, tradicionalmente, era aberto passa a ser fechado com torres de resfriamento, principalmente, nos sistemas envolvendo cogeração.

Água da lavagem de pisos e equipamentos – Segundo Braile et al. (1993), a quantidade de água utilizada para a lavagem dos pisos e equipamentos varia; entretanto, podemos considerar que o volume total de água de limpeza situa-se em torno de 200 a 300 m³ por lavagem de equipamentos e igual volume por lavagem dos pisos. As características das águas dessas lavagens são, também, bastante variáveis, tendo pH, às vezes, desde extremamente ácidos até extremamente alcalinos, de acordo com as substâncias químicas utilizadas. Portanto concluiu-se que em indústrias que produzem álcool e açúcar, as águas de lavagem de pisos devem ser enviadas à caixa receptora da vinhaça, pois é interessante fazer-se a diluição da mesma. Logo após, estes efluentes devem ser recalcados à lavoura para irrigação.

Outros despejos em usinas de açúcar e álcool – Água de resfriamento dos aparelhos da destilaria: este efluente praticamente não causa problemas, pois não entra em contato direto com qualquer poluente. O único inconveniente, porém de fácil solução, é o aumento da temperatura que pode causar poluição térmica. A temperatura média desta água é de ordem de 40°C (BRAILE et al., 1993).

Água da descarga das caldeiras: a DBO dessas descargas é bastante baixa, porém a concentração de lama inorgânica e sólido solúveis é alta. O resíduo pode ser isolado, ou pode ser incorporado à caixa receptora da vinhaça para a irrigação da lavoura (BRAILE et al., 1993).

Esgoto doméstico: as águas residuárias oriundas dos esgotos domésticos da indústria devem ser tratadas separadamente e seu efluente pode ser utilizado na lagoa de estabilização (BRAILE et al., 1993)

2.2.2. Reaproveitamento de água

O uso de condensados obtidos da concentração do caldo de cana permite uma redução da captação, bastando apenas resfriamento para utilização segura e sem riscos aos operadores, em algumas operações do processo (embebição da moenda, lavagem de torta, lavagem de piso, reposição em sistemas de abatimento de particulados, entre outras).

Encontra-se em estudo pela DEDINI (2010) a concentração de vinhaça que, além de possibilitar obtenção de um produto mais concentrado para aplicação como fertilizante, resulta separação de água que pode ser utilizada em outros circuitos, diretamente ou após o tratamento. As pesquisas estão em andamento, havendo equipamento instalado que proporcionará a redução do volume de vinhaça para 25% do total e disponibilidade de 75% do volume da vinhaça como água condensada.

A recirculação de água em todos os principais usos, conforme definido acima, associada à recuperação de condensado de processo (concentração de caldo), permite levar a necessidade de captação de água para valores em torno de 1m³/Tonelada de cana (BRAILE et al., 1993).

2.2.3. Etapas de maior demanda de água e geração de resíduos

Em geral uma planta de uma indústria de açúcar e álcool possui diferentes etapas que envolvem grandes volumes de água e geração de resíduos para a vinhaça. Especificamente na planta industrial da Usina Santa Terezinha – unidade Iguatemi os dados são os seguintes:

A etapa na qual ocorre a lavagem de cana proveniente da lavoura envolve cerca de 1.000 m³/h de água, sendo que esta água após a limpeza da cana sofre processo de decantação, retirando a impureza mineral contida e, em seguida, retorna para o processo

de limpeza da cana. Porém, cerca de 8 % desta água é descartada, gerando o resíduo da etapa de lavagem de cana, com elevado teor de sólidos e matéria orgânica.

Na moagem da cana de açúcar para melhorar eficiência de extração do açúcar adota-se o processo de embebição composta, que é a adição de água quente à cana desfibrada, conseguindo, dessa forma, extrair uma quantidade maior de açúcar no processo de moagem. Esse processo é feito com água condensada e água da represa Cocamar, sendo que diretamente não gera efluente. Na extração do caldo, além da água de embebição, utiliza-se água para limpeza e resfriamento dos mancais das turbinas. O resfriamento dos mancais não gera resíduo; existem perdas por vazamentos nos mancais e perdas no trocador de calor que são repostas com água da represa Chapecó. A água para limpeza das moendas é proveniente da represa Chapecó e essa etapa gera um resíduo que é coletado por canaletas no piso.

A água utilizada nas caldeiras transforma-se em vapor e posteriormente são condensadas em diferentes etapas do processo industrial, principalmente, nos pré- evaporadores. Industrialmente, estas corrente são chamadas de água condensada de escape. É importante ressaltar que esta etapa não produz água residuária, visto que a água de escape volta para alimentar as caldeiras. Nessa etapa existem perdas por evaporação (cerca de 5%) que são repostas com água condensada.

Outra água que merece destaque é a gerada por condensação dos gases dos evaporadores e cozedores denominadas de condensados vegetais. Essas águas são extraídas da cana, tanto água existente no próprio vegetal, quanto da adicionada no processo de embebição. São águas residuárias de elevada temperatura e com DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) causada principalmente pela presença de sacarose. Parte dessa água é reutilizada na indústria e parte é descartada.

Na destilaria uma importante demanda é a água proveniente do poço artesiano utilizada para diluir o melaço para fabricação do álcool. Esse processo de fabricação de álcool gera a vinhaça. Outra demanda de água na destilaria é a utilizada para resfriar o mosto, vinho e o álcool. Nesse processo a água esquenta e é enviada para um tanque de aspersão onde é resfriada sem gerar resíduo.

Para o processo de bombeamento da vinhaça, gerada na destilação do álcool, utiliza-se água na temperatura ambiente para resfriá-la. Esta água é proveniente da

captação da represa Chapecó. Este processo de resfriamento da vinhaça é realizado devido às tubulações existentes serem de fibra de vidro, e os fabricantes recomendam trabalhar com temperaturas abaixo de 60 °C.

2.3. Resfriamento evaporativo

Em muitos processos há necessidade de remover carga térmica de um dado sistema e usa-se, na maioria dos casos, água como o fluido de resfriamento. Devido à sua crescente escassez e preocupação com o meio ambiente, além de motivos econômicos, a água "quente" que sai desses resfriadores deve ser reaproveitada. Para tanto, ela passa por outro equipamento que a resfria, em geral uma torre chamada torre de resfriamento evaporativo ("evaporative cooling tower"), e retorna ao circuito dos resfriadores de processo. A Figura 2.4 mostra o esquema típico de um sistema de água de resfriamento, composto por torre de resfriamento e trocadores de calor:

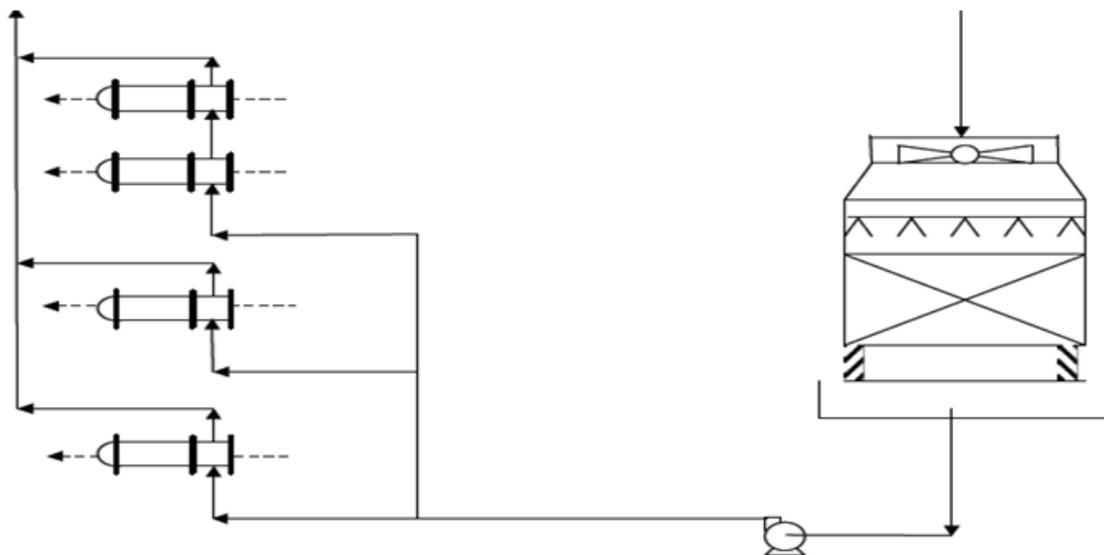


Figura 2.4. Sistema de resfriamento.

Fonte: - <http://www.hottopos.com/regeq14/giorgia.pdf>, 2010

A água que sai dos resfriadores de processo é alimentada e distribuída no topo da torre de resfriamento, constituída de um enchimento interno para melhor espalhar a água. Ar ambiente é insuflado através do enchimento, em contracorrente ou corrente

cruzada com a água que desce. Por meio desse contato líquido/gás, parte da água evapora e ocorre o seu resfriamento. O princípio de funcionamento da torre será descrito no item 2.3.1.

Em uma planta química ou petroquímica, a pressão de operação nos condensadores das colunas de destilação ou nos evaporadores de sistemas de concentração é estabelecida a partir da temperatura da água de resfriamento. Para que os condensadores de produtos voláteis possam operar com água de resfriamento, são necessárias pressões de operação suficientemente elevadas. A temperatura da água de resfriamento é um dado muito importante para o projeto de um condensador de topo de uma coluna de resfriamento, e também, para o dimensionamento da própria coluna de destilação.

Variações na temperatura da água de resfriamento influenciam diretamente na operação dos condensadores de topo de uma coluna de destilação e, conseqüentemente, a operação da própria coluna. Este é um exemplo interessante de como a temperatura da água de resfriamento é uma informação decisiva não só na operação de uma planta, mas também na fase de projeto de um equipamento (trocaador de calor, colunas, reatores).

Na prática, há outros sistemas de resfriamento de água. Por exemplo: lagoa de resfriamento (água quente entra num lado da lagoa e após atravessar a sua extensão, sai resfriada no outro lado da lagoa), torres de resfriamento não evaporativo (usadas em usinas nucleares) etc.

2.3.1. Princípio de funcionamento de uma torre de resfriamento

Alguns conceitos são fundamentais para entender o conceito das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar. A temperatura de bulbo seco do ar é a própria temperatura do gás (o bulbo do termômetro usado na medição está "seco").

A temperatura de bulbo úmido é medida com o bulbo do termômetro envolto com uma gaze umidificada com água, com outros cuidados específicos que não serão descritos aqui. Por definição, é a temperatura atingida, em regime permanente (não de equilíbrio termodinâmico), por uma pequena porção de água, em contato com uma

corrente contínua de ar, em condições adiabáticas (só há troca térmica entre o ar e essa massa de água), desprezando-se os efeitos de radiação térmica nessa troca.

A temperatura de bulbo úmido é menor ou no máximo igual em relação à temperatura de bulbo seco. Isso ocorre porque, exposta a uma corrente de ar não saturado (umidade relativa menor do que 100 %), parte da água presente na gaze evapora e com isso, a temperatura abaixa. Para entender esse fenômeno de resfriamento devido à evaporação, podem-se mencionar dois exemplos cotidianos. Quando você sai da piscina, tem uma sensação repentina de frio, pois vaporiza parte da água impregnada na sua pele. Quando você toma água guardada numa moringa de barro, ela é mais fresca, pois como o barro é poroso, parte da água armazenada exsuda (transpira) pelas paredes (a superfície externa da moringa parece "suada"), evapora no ar e com isso, resfria a água da moringa.

Numa torre de resfriamento, a principal contribuição para o resfriamento da água é dada pela evaporação de parte dessa água que recircula na torre. A evaporação da água – transferência de massa da fase líquida (água) para a fase gasosa (ar) – causa o abaixamento da temperatura da água que escoar ao longo da torre de resfriamento. Isso ocorre porque a água para evaporar precisa de calor latente, e esse calor é retirado da própria água que escoar ao longo da torre. A transferência de calor latente devido à vaporização de uma parte da água e, também, a transferência de calor sensível devido à diferença de temperatura entre a água e o ar, de uma maneira geral, considera-se que 80% deste resfriamento é devido à transferência de calor latente e 20% ao calor sensível (CHEREMISINOFF, 1981).

As vazões mais altas de ar e água provocam, até um determinado limite, uma convecção mais intensa, elevando os coeficientes globais de transferência de calor e massa. O aumento das vazões de ar e água causa um aumento da turbulência, o que favorece a transferência de calor e massa. No entanto, a partir de um determinado ponto, quando as vazões de água e ar tornam-se muito altas, o contato entre a água e o ar torna-se ineficiente, podendo ocorrer, por exemplo, excessivo arraste de água pela corrente de ar ou a dificuldade de se formar filmes na superfície do recheio que favorecem a transferência de massa. As vazões de água e ar da torre são limitadas pelo tipo de recheio empregado.

2.3.2. Variáveis de processo e especificação da torre de resfriamento

O *range* de uma torre de resfriamento é definido como a diferença entre a temperatura da água quente (alimentação da torre) e a temperatura da água fria (saída da torre) (CHEREMISINOFF, 1981). O *range* de uma torre varia conforme as condições climáticas e a vazão da água de resfriamento na torre.

O *approach* de uma torre de resfriamento é a diferença entre a temperatura da água fria (saída da torre de resfriamento) e a temperatura de bulbo úmido do ar na entrada da torre (BURGER, 1994). Para torres de resfriamento industriais, o *approach* gira em torno de 5 °C, sendo também um critério do projeto. Fazendo-se uma analogia com trocadores de calor, da mesma forma que seria necessária uma área infinita de troca térmica para que a temperatura do fluido quente seja a mesma do fluido frio na saída do trocador, seria necessária uma torre de resfriamento de altura infinita para que a água atinja a temperatura de bulbo úmido do ar.

A vazão de água de resfriamento que recircula na torre, juntamente com o *range* e *approach*, são as variáveis de processo necessárias para o dimensionamento de uma torre de resfriamento. Outro dado necessário ao dimensionamento da torre é o parâmetro de desempenho da torre, definido como o produto entre o coeficiente global de transferência de massa e a área específica do recheio da torre. O parâmetro de desempenho da torre depende do tipo de recheio e das vazões de água e ar empregadas. Nos catálogos dos fabricantes de torres de resfriamento o parâmetro de desempenho para o dimensionamento não é mostrado de forma explícita, sendo substituído por gráficos e ábacos que relacionam as demais variáveis necessárias (*range*, *approach* e vazão).

2.3.3. Aspectos operacionais

O desempenho de uma torre de resfriamento varia, entre outros fatores, conforme a temperatura do ar ambiente, umidade do ar, temperatura de bulbo úmido, ou seja, com o clima. No inverno, a temperatura do ar cai e a temperatura de saída da água também cai, caso a carga térmica seja mantida constante. Para manter a temperatura da água de saída constante, pode-se diminuir a vazão de água que recircula no sistema de refrigeração. No verão, ocorre o inverso; a temperatura de saída da água aumenta,

comprometendo a operação de um condensador em uma coluna de destilação, por exemplo. Pode-se aumentar a vazão de água no sistema, visando compensar o aumento de temperatura. Em países de clima quente como o Brasil, os principais problemas de queda de desempenho na operação de torres de resfriamento ocorrem durante o verão.

A pressão na tubulação de distribuição de água de resfriamento é importante para que se garanta que todos os consumidores recebam a vazão de água necessária e também do ponto de vista de segurança operacional. Por exemplo, em um trocador de calor tipo casco-tubo a água de resfriamento (que geralmente passa nos tubos) está a uma pressão de 5 kgf/cm^2 e o fluido processo, que é tóxico, passa no casco a uma pressão de 2 kgf/cm^2 . Caso ocorra um furo em um dos tubos do trocador, a água (que está a uma pressão mais alta) vazará para o lado do casco, contaminando o fluido de processo. Caso a pressão do fluido de processo fosse mais alta que a da água de resfriamento, ocorreria o inverso, e todo o sistema de resfriamento estaria contaminado, o que implicaria riscos maiores do ponto de vista de segurança operacional e meio ambiente.

A capacidade de resfriamento de qualquer torre, com uma dada temperatura de bulbo úmido e velocidade de vento fixa, varia com a taxa de água. Assim, o problema de calcular a dimensão da torre reduz-se ao de obter a correta taxa de água para uma altura escolhida, sob condições fixas de velocidade do vento e temperatura de bulbo úmido. Uma vez estabelecida a taxa de água, a área da torre de uma dada altura pode ser facilmente calculada dividindo-se a água recirculada, em m^3/h pela taxa de água em $\text{m}^3/\text{h.m}^2$. A dimensão da torre é então função de:

1. Faixa de resfriamento (diferença entre as temperaturas da água quente e da água fria);
2. Aproximação em relação à temperatura de bulbo úmido (diferença entre a temperatura da água fria e a temperatura de bulbo úmido);
3. Quantidade de água a ser resfriada;
4. Temperatura de bulbo úmido;
5. Velocidade do ar através do recheio;
6. Altura da torre.

2.4. Otimização

Com o crescimento do setor sucroalcooleiro, surgiram muitos problemas ou aumentaram a complexidade dos já existentes. Assim a gestão das empresas deste setor tem que lançar mão de todas as possíveis ferramentas que possam auxiliar as tomadas de decisões. Desta forma, a modelagem matemática pode contribuir em muitos campos desta área. A Modelagem não é novidade, é tão antiga quanto à própria Matemática e vem sendo aplicada desde os tempos primitivos pelos povos em situações do seu cotidiano. Seu conceito surgiu durante o Renascimento, para auxiliar na construção das ideias iniciais da Física (BIEMBENGUT; HEIN, 2003). Atualmente, é um método da matemática aplicada, usado em grande variedade de problemas econômicos, biológicos, geográficos, de engenharia e de outros (CHAVES, 2005).

Modelagem matemática é a arte de transformar um problema real em problema matemático, resolvê-lo e transpor as suas soluções na linguagem do mundo real, ou seja, auxiliar na solução dos problemas reais. (BASSANEZI, 2002).

A otimização em linha, ou otimização em tempo real (RTO), é o emprego de um sistema automático que ajusta as condições operacionais de uma unidade industrial para a obtenção do resultado ótimo, com base em uma escala de produtos e de controle da produção. Na maioria dos processos industriais, o ponto ótimo operacional varia constantemente para atender as exigências de demanda do mercado, as flutuações dos custos e disponibilidade das matérias-primas, produtos e insumos, assim como devido a mudanças na eficiência de equipamentos e aspectos ambientais. O bom desempenho operacional de um processo requer uma integração a mais concisa possível entre a otimização e o controle. De maneira geral, devem-se abordar os problemas de controle e de otimização de uma planta sob uma perspectiva ampla, devido principalmente a mudanças na concepção de projetos atuais, com integração térmica e material. Estes fatores certamente conduzem a mais interações dinâmicas e, portanto, à necessidade da análise dos problemas, além de uma unidade individual. A visão mais ampla da planta é o campo de estudo de estruturas de sistemas de otimização e controle global do processo.

2.4.1. Estratégia de otimização

O primeiro objetivo no projeto de um sistema de controle é o de estabilizar a planta e mantê-la operando dentro de suas restrições. Entretanto, mesmo após o uso dos graus de liberdade disponíveis originalmente para se estabilizar as diversas variáveis nos seus valores do estado estacionário desejado, há geralmente graus de liberdade não utilizados. O que se deve fazer com estes graus de liberdade remanescentes é uma tarefa que diz respeito à definição do problema de controle e otimização (Edgar et al. ,2001). Do ponto de vista formal e global, pode-se dizer que todos os graus de liberdade devem ser usados para “controlar e otimizar a operação simultaneamente”. Os diferentes objetivos envolvidos e suas inter-relações são usualmente quantificados por uma função escalar de índice de desempenho, que deve ser otimizada. O problema de otimização resultante pode ser de grande porte, mas apresenta um número reduzido de variáveis de decisão na maioria dos casos. Os métodos atualmente existentes para a análise do problema de controle e otimização de processos podem ser incorporados em três estruturas alternativas de solução. Estas alternativas correspondem à abordagem do problema nas seguintes formas hierárquicas: (i) otimização em malha aberta; (ii) otimização em malha fechada com controle separado; e (iii) otimização integrada.

2.4.2. Função Objetivo

Função objetivo é o objeto da otimização. Pode ser um problema de otimização, um conjunto de teste para identificar os indivíduos mais aptos, ou mesmo uma "caixa preta", e que sabe-se apenas o formato das entradas e retorna um valor que deseja otimizar. Nas indústrias químicas, a função objetivo muitas vezes é expressa em unidades monetárias, pois a meta da empresa é minimizar os custos ou maximizar os lucros sujeitos a uma variedade de restrições. Em outros casos, o problema a ser resolvido é maximizar a produção de um componente em um reator ou minimizar o uso de utilidades.

2.4.3. Classificações dos Modelos (Edgar et al. ,2001)

Existem duas categorias gerais de modelos:

1. Modelos baseados na teoria;
2. Modelos baseados em descrições estritamente empíricas.

Modelos matemáticos baseados nas leis da química e da física (balanços de massa e energia, termodinâmica, cinética das reações químicas) são freqüentemente empregados nas aplicações de otimização. Modelos empíricos são atrativos quando um modelo físico não pode ser desenvolvido devido ao limite de tempo ou recursos. Dados de entrada e saída são necessários para ajustar os coeficientes desconhecidos nos dois tipos de modelos.

Além da classificação de modelos teóricos *versus* empíricos, pode-se normalmente agrupar os modelos de acordo com os seguintes tipos:

- Linear *versus* não linear;
- Permanente *versus* transiente;

Linear *versus* não linear

Equações (modelos) são lineares se as variáveis dependentes ou suas derivadas aparecem somente na primeira potência; de outra forma são não lineares. Na prática, a habilidade de usar modelos lineares é de grande utilidade, pois são mais fáceis de manipular e resolver do que os modelos não lineares.

Permanente *versus* transiente

Permanente – variáveis dependentes permanecem constantes em relação ao tempo.

Transientes – variáveis dependentes variam com o tempo.

Um modelo transiente se reduz ao permanente quando $\partial/\partial t = 0$.

Definição e Formulação do Problema

Nesta fase o problema é definido e os elementos importantes que pertencem ao problema e sua solução são identificados. O grau de precisão necessário ao modelo deve ser determinado, para avaliar a estrutura e a complexidade do modelo, averigua-se:

1. O número de variáveis independentes a serem incluídas no modelo;
2. O número de equações independentes requeridas para descrever o sistema;

3. Número de parâmetros desconhecidos no modelo.

Antes de realizar a modelagem, é importante avaliar a justificativa econômica (e benefícios).

Fase de Projeto

Especificação do teor da informação, descrição geral da lógica de programação e do algoritmo necessário para desenvolver e empregar um modelo, formulação da descrição matemática do modelo e simulação do modelo:

- Primeiro definem-se as variáveis de entrada e saída e definem-se o sistema e o meio;
- Seleciona-se a(s) representação matemática a ser usada no modelo bem como as suposições e limitações;
- A implementação computacional do modelo requer que se verifique a adequação e disponibilidade de softwares, desenvolver a lógica de programação, definir módulos do programa e suas relações estruturais.

Fase de Avaliação

A avaliação do modelo é realizada de acordo com o critério de avaliação e plano de teste estabelecido na fase de definição do problema. Realizar testes de sensibilidade do modelo com relação às entradas e parâmetros, determinar se as relações são fisicamente significativas e usar dados existentes no modelo quando possível.

A validação do modelo requer a confirmação lógica, das suposições e comportamento. Esta tarefa envolve a comparação com dados da literatura, comparação com o desempenho da planta piloto e simulação.

2.4.4. Programação Linear

Programação linear (LP) é uma das técnicas mais utilizada na otimização. A seguir segue exemplos de LP utilizadas:

- Programa para o trabalhador adequado para cada dia da semana trabalhar com satisfação e obtendo alta produtividade;

- Selecionar produto para manufaturar em um período, com aproveitamento de recursos, objetivando um maior lucro;
- Minimização de rejeitos industriais.

2.4.5. Otimização do Consumo de Água na Indústria de Produção de Açúcar e Álcool

A otimização deste trabalho de minimização do consumo de água em um processo industrial de fabricação de açúcar e álcool foi realizada por meio de programação linear. O desenvolvimento do trabalho foi para reduzir a geração de água condensada em uma usina de açúcar e álcool, além de mostrar a condição ideal para que o descarte de água condensada resultasse em valor nulo.

Ravagnani et al., (2003) apresentaram uma metodologia para a redução de emissões de poluentes em processos industriais por reutilização da água, utilizando a Análise *Pinch*. Essa redução foi alcançada por meio da síntese de redes de equipamentos de transferência de massa (RETM). A metodologia proposta para a síntese da rede definiu inicialmente os seus objetivos com relação ao custo mínimo, ao número mínimo de equipamentos e à vazão mínima de água.

Tenório (2010) mostrou a importância do reuso das águas geradas nas agroindústrias do setor sucroalcooleiro, como forma de reduzir custos de produção e preservar os recursos hídricos.

Weiler (2005) realizou um trabalho na caracterização e reutilização dos efluentes das etapas de preparação e tingimento em uma indústria têxtil, visando aumentar a eficiência no uso de insumos, água e energia, por meio da minimização ou reciclagem de efluentes gerados no processo produtivo da indústria.

Ravagnani et al., (2002) publicaram um estudo de caso baseado em um processo industrial de destilação do etanol. Utilizando a análise *Pinch* implantaram um novo trocador de calor e reutilizaram água industrial. Com essa implantação o processo reduziu a captação de água de 12 m³ para 1 m³ por tonelada de cana moída.

Melo (2005) apresentou uma proposta de reuso de correntes aquosas de efluentes, visando aumentar a eficiência no uso de insumos, água e energia, por meio da

minimização ou reciclagem de efluentes gerados no processo produtivo da lavanderia das Indústrias Têxteis. O objetivo foi gerar um menor volume de efluentes, além de diminuir a captação de água bruta. Foi desenvolvido um algoritmo computacional para a determinação das possibilidades de reuso das correntes efluentes da etapa de lavagem contínua no processo têxtil, sendo este processo escolhido em função do elevado consumo de água, $30 \text{ m}^3/\text{h}$ por máquina.

3. ESTUDO DE CASO

Os objetivos específicos são:

- Levantar as correntes de captação de água no processo industrial;
- Quantificar o volume de captação de cada corrente;
- Desenvolver modelos de otimização para a minimização da água condensada descartada;
- Reaproveitar a água condensada por meio da instalação de uma torre de resfriamento e reutilizá-la essa água na embebição da moenda, diluição do fermento, diluição dos produtos químicos, limpeza de pisos e sanitários;
- Implantar uma torre para resfriar a vinhaça, dimensionada para eliminar a captação existente.

3.1. Usina Santa Terezinha

A família Meneguetti, que fundou em 1961 e detém o capital social da Usina de Açúcar Santa Terezinha, faz parte dos pioneiros da região de Maringá que chegaram antes mesmo que a cidade fosse fundada. O primeiro passo para o crescimento do grupo se deu em 1964. A empresa adquiriu uma quota de produção e transformou o engenho localizado no Distrito de Iguatemi, município de Maringá, na Usina de açúcar Santa Terezinha LTDA.

O início do seu grande salto se deu com o Proálcool instituído em 1974. A Usina Santa Terezinha implantou em 1975 o primeiro projeto para produção de 60 m³ / dia de álcool hidratado. O segundo projeto de ampliação da produção de álcool hidratado ocorreu em 1981, com a entrada em operação da unidade produtora de 120 m³ / dia, totalizando a capacidade nominal de 180 m³ / dia de álcool carburante.

Em paralelo ao aumento da produção de álcool, foi ampliada a produção de açúcar cristal que, na época, era comercializada integralmente no mercado interno.

3.1.1. Preparo e extração do caldo de cana

O primeiro equipamento a ser utilizado na etapa do preparo e extração da cana é a mesa alimentadora, no qual recebe as cargas de cana do estoque ou diretamente dos caminhões, transferindo-as a uma ou mais esteiras metálicas que conduzem a cana até as moendas, passando pelo sistema de preparo. A mesa alimentadora apresenta uma parte rolante, formada por eixos, correntes e taliscas, que conforme a sua inclinação, pode ser classificada como:

- Convencional: inclinação de 5° a 17°;
- Não convencional: grande inclinação 45°.

A lavagem da cana é efetuada sobre as mesas alimentadoras visando à retirada de matérias estranhas como a terra, a areia etc., com a finalidade de se obter de um caldo de melhor qualidade e proporcionar o aumento da vida útil dos equipamentos, pela redução do desgaste causado pelos corpos estranhos. Esta lavagem raramente é feita na cana picada, pois isto provoca um arraste muito grande de sacarose pela água, aproximadamente 1% da sacarose da cana (CTC, 2010).

A mesa alimentadora possui dispositivos que controlam a quantidade de cana sobre uma esteira metálica que a transfere ao setor de preparo. O objetivo básico do preparo da cana é aumentar a sua densidade e, conseqüentemente, a capacidade de moagem, bem como realizar o máximo rompimento das células, para liberação do caldo nelas contido, obtendo-se, portanto, uma maior extração.

O sistema de preparo é constituído por um ou dois jogos de facas, dos quais o primeiro é apenas nivelador, que prepara a cana a ser enviada ao desfibrador. O desfibrador, por sua vez, é formado por um tambor alimentador que compacta a cana na sua entrada, precedendo um rotor constituído por um conjunto de martelos oscilantes que giram em sentido contrário à esteira, forçando a passagem da cana por uma abertura de 1 cm ao longo de uma placa desfibradora.

Após o sistema de preparo, a altura do colchão de cana é uniformizada por um equipamento chamado espalhador, que se localiza no ponto de descarga da esteira metálica para uma correia transportadora de borracha. Esta correia trabalha em alta velocidade 90 m/mim, com a finalidade de reduzir a espessura da camada de cana e

facilitar o trabalho do eletroímã. O imã realiza a operação de remoção de materiais ferrosos, protegendo os equipamentos de extração, mais especificamente os rolos da moenda. Em seguida é realizada a alimentação da moenda por um dispositivo denominado bicão ou pela adoção de um sistema mais moderno, conhecido como “chute Donnelly” ou calha de alimentação forçada.

A moagem é um processo estritamente volumétrico e consiste em deslocar o caldo contido na cana para fora. Este deslocamento é realizado passando a cana 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, portanto, a um volume de caldo extraído. A cana, ao passar sucessivamente pelos vários ternos da moenda, tem o seu caldo removido ou extraído.

O artifício de adicionar água ao bagaço é denominado embebição e tem como finalidade diluir o caldo remanescente no bagaço, aumentando a extração da sacarose.

A embebição pode ser do tipo:

- Simples;
- Composta;
- com recirculação.

De acordo com o Copersucar (2007), com o sistema de embebição composta, consegue-se extração do caldo de 92 a 96%, e umidade final do bagaço de aproximadamente 50%, perdas de 3% da sacarose no bagaço. A figura 3.1 mostra o sistema de moagem com embebição composta.

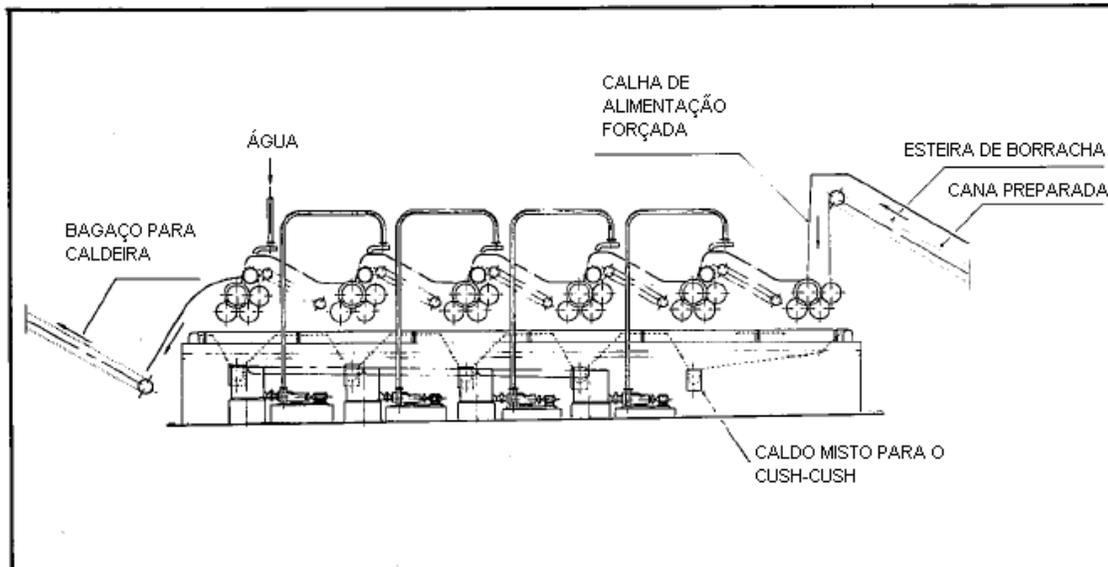


Figura 3.1. Sistema de moagem com embebição composta.
Fonte: COPERSUCAR (2007).

Após a extração do caldo, obtém-se o material denominado bagaço, constituído de fibra 46%, água 50% e sólidos dissolvidos 4% em massa. A quantidade de bagaço obtida varia de 240 a 280 kg de bagaço por tonelada de cana moída, dependendo da fibra da cana que vai ser processada, e o açúcar nele contido representa uma das perdas do processo. O bagaço alimentará as caldeiras, onde é queimado, e a energia liberada gera o vapor de água. Este vapor gerado, com pressão média de 21 kgf/cm^2 , é utilizado no acionamento das turbinas a vapor onde ocorrerá a transformação da energia térmica em energia mecânica.

O vapor liberado por estas turbinas é um vapor de baixa pressão $1,5 \text{ kgf/cm}^2$ denominado vapor de escape, que é reaproveitado como a energia básica necessária no processo de fabricação de açúcar e álcool.

3.1.2. Evaporação

Evaporação é um fenômeno no qual átomos ou moléculas no estado líquido (ou sólido, se a substância sublima) ganham energia suficiente para passar ao estado gasoso. O movimento térmico de uma molécula de líquido deve ser suficiente para vencer a tensão superficial e evaporar, isto é, sua energia cinética deve exceder o trabalho de

coesão aplicado pela tensão superficial à superfície do líquido. Por isso, a evaporação acontece mais rapidamente a altas temperaturas, a altas vazões entre as fases líquida e vapor e em líquidos com baixas tensões superficiais (isto é, com pressões de vapor mais elevadas). No processo utilizado nas usinas de açúcar, o caldo é concentrado de maneira contínua, até cerca de 70°Brix, sem atingir o ponto de cristalização do açúcar, pelo sistema de múltiplos efeitos, inventado por Norbert Rillieux, em 1844, na Louisiana, e que hoje é utilizado universalmente na indústria química. Foi também o próprio Rillieux que elaborou a idéia de se utilizar o vapor gerado no sistema de concentração no aquecimento e cozimento de açúcar - “sangrias dos evaporadores”. Atualmente, a maioria das usinas brasileiras possui instalações com duas configurações básicas: Quíntuplo ou quádruplo efeito. A utilização de vapor de sangrias varia de se utilizar somente o vapor gerado no primeiro efeito (V1), até a utilização de sangrias de vapor gerado em todos os efeitos (V1 até V4). (REVISTA OPINIÕES, 2010).

3.1.3. Produção de Álcool

O álcool é obtido após a fermentação do caldo ou de uma mistura de melaço, caldo e água, portanto por meio de um processo bioquímico. Todavia, antes de ser enviado ao processo fermentativo, este caldo deve receber um tratamento de purificação.

O caldo de cana obtido no processo de extração apresenta uma quantidade e qualidade variável de impurezas, que podem ser solúveis ou insolúveis. O tratamento primário tem por objetivo a máxima eliminação das impurezas insolúveis como areia, argila e bagacilho, cujos teores variam de 0,1 a 1% do volume de caldo (COPERSUCAR, 1988).

Após passar pelo tratamento primário, o caldo deverá sofrer pasteurização: aquecimento e resfriamento imediato a 30°C. Um tratamento mais completo do caldo implica adição de cal, aquecimento e posterior decantação. Livre de impurezas (areia, bagacilho etc.) e devidamente esterilizado, o caldo está pronto para ser encaminhado à destilaria.

O processo de fermentação mais comumente utilizado nas destilarias do Brasil é o de recuperação de leveduras pela centrifugação do vinho. 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 alta infecção bacteriana. Esta suspensão de fermento diluído e acidificado, conhecido na prática com o nome de pé de cuba, permanecem em agitação por 1 a 2 horas, antes de retornar aos tanques de fermentação (CTC, 2010).

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 é de 7 – 10%, e a mistura recebe o nome de vinho fermentado. Devido à grande quantidade de calor liberado durante o processo e à necessidade da temperatura ser mantida em 33°C , é preciso realizar o resfriamento do vinho, circulando água em serpentinas internas às dornas, ou em trocadores de calor a placas, por onde o vinho é bombeado continuamente com água em contra-corrente.

Após a fermentação, o vinho é enviado às centrifugas para recuperação do fermento. O concentrado do fermento recuperado, denominado leite de levedura, retorna às cubas para o tratamento. A fase leve da centrifugação, ou vinho “delevedurado”, é enviada para as colunas de destilação.

O vinho que vem da fermentação possui, em sua composição, 7 a 10% em volume de álcool, além de outros componentes de natureza líquida, sólida e gasosa. Dentro dos líquidos, além do álcool, encontra-se a água com teores de 89 a 93%, glicerina, alcoóis homólogos superiores, furfural, aldeído acético, ácidos succínico e acético. Já os sólidos são representados por bagacilho, leveduras e bactérias, açúcares não fermentescíveis, sais minerais, matérias albuminóides e outros, e os gasosos, principalmente pelo CO_2 e SO_2 (COPERSUCAR, 1988).

O álcool presente neste vinho é recuperado por destilação, processo este que se utiliza dos diferentes pontos de ebulição das diversas substâncias voláteis presentes, separando-as. A operação é realizada com auxílio de sete colunas distribuídas em quatro troncos: destilação propriamente dita, retificação, desidratação e debenzolagem.

Os álcoois produzidos, hidratados 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.

3.2. Situação atual do circuito de água

O sistema de captação de água opera com a represa Chapecó em circuito semi-aberto, sendo a água captada por moto-bomba e por gravidade.

Levantou-se o fluxograma da captação e reaproveitamento de água condensada, a fim de conhecimento das correntes de água no processo industrial. Verificou-se o volume de cada corrente para obter a demanda de água no processo.

A partir do fluxograma, dimensionaram-se duas torres de resfriamento para o reaproveitamento da água condensada. Uma torre foi instalada para reutilizar essa água na embebição da moenda, diluição do fermento, diluição dos produtos químicos, limpeza de pisos e sanitários. A outra torre foi implantada para resfriar a vinhaça, eliminando a captação de água existente.

A metodologia adotada para o desenvolvimento deste presente trabalho foi realizada conforme o fluxograma de águas apresentado na Figura 3.2.

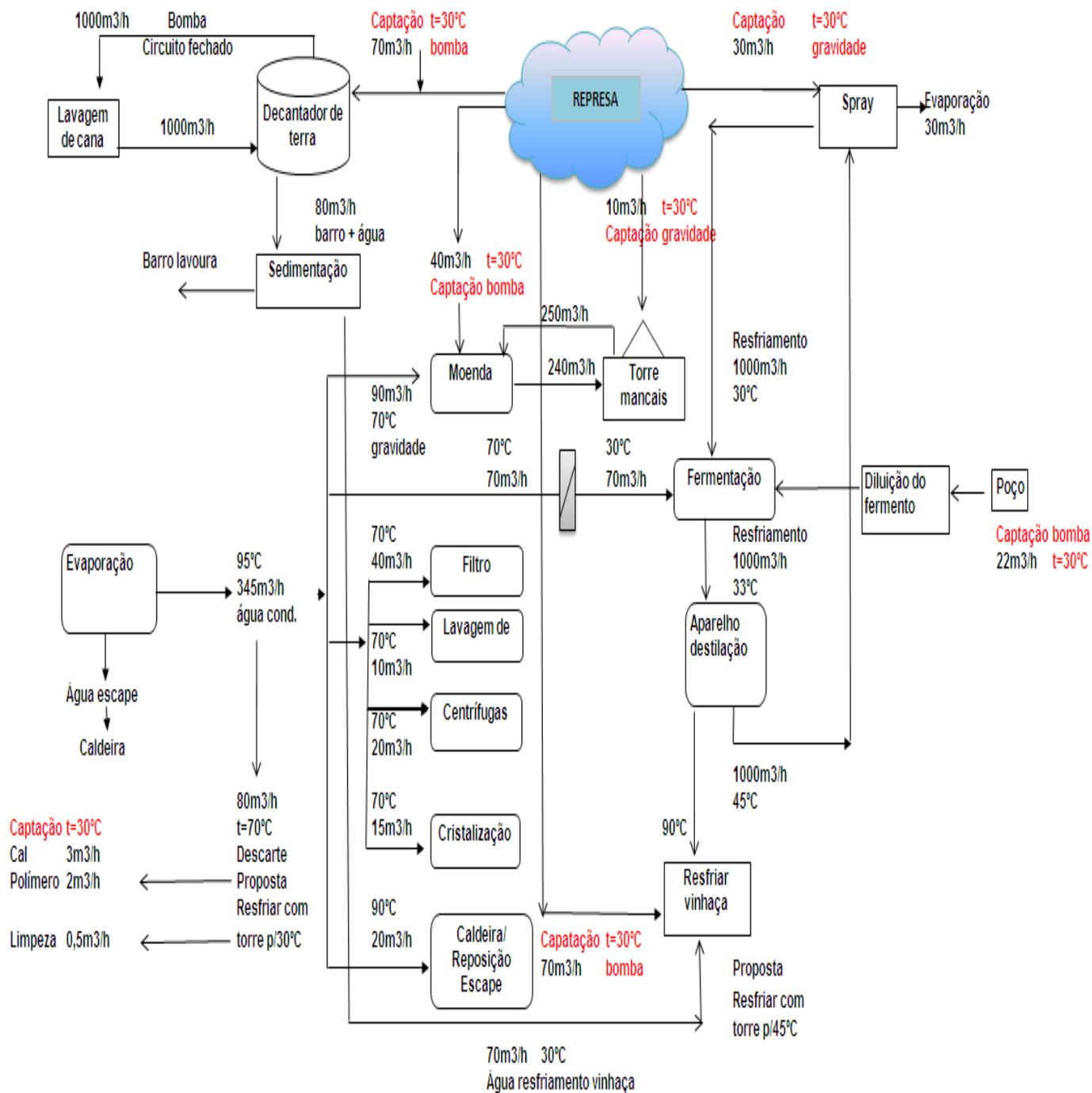


Figura 3.2. Fluxograma de águas.
Fonte: Usina Santa Terezinha.

3.2.1. Captação

A captação da água da represa Chapecó é feita por uma bomba com a seguinte especificação: EQ 250/29 ($Q = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 20 \text{ m.c.a.}$, $P = 100 \text{ CV}$, $R = 1750 \text{ rpm}$), totalizando $180,5 \text{ m}^3/\text{h}$ a uma temperatura média de 30°C , sendo que o restante da água bombeada retorna para a represa. A captação da água desta represa também ocorre por gravidade, totalizando $40 \text{ m}^3/\text{h}$. Além da captação da represa o parque industrial possui 01 poço semi-artesiano com captação de $22 \text{ m}^3/\text{h}$, com a seguinte especificação da moto-bomba: EBARA-BHS512-20. Seguem a seguir os pontos que utilizam a água captada:

LAVAGEM DE CANA

Com vazão de $70 \text{ m}^3/\text{h}$ e temperatura média de 30°C , esta água é depositada em um decantador de terra para ser utilizada na lavagem da cana. Isso é necessário devido a necessidade de manter o nível do decantador, pois por hora ocorre à retirada de 80 m^3 de barro misturado com água. Para esta etapa de lavagem, a água é recalçada com vazão de $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ para a mesa alimentadora, com a finalidade de realizar a lavagem da cana, esse processo ocorre em sistema fechado, apenas com a reposição da retirada do barro. Do decantador de terra a água juntamente com o barro ($Q = 80 \text{ m}^3/\text{h}$) é transferida para um tanque de sedimentação, onde o barro é separado da água. O barro é transferido para a lavoura, enquanto que a água é reutilizada para resfriar a vinhaça ($Q = 70 \text{ m}^3/\text{h}$, $T = 30^\circ\text{C}$).

MOENDA E EMBEBIÇÃO

Com vazão aproximada de $40 \text{ m}^3/\text{h}$ e temperatura média de 30°C a água captada é utilizada na embebição da moenda. A cana, ao passar sucessivamente pelos vários ternos de moagem, tem o seu caldo extraído.

RESFRIAMENTO DE VINHAÇA

A vinhaça é o resíduo da destilação do álcool, e depois de produzida é bombeada para a lavoura e utilizada como fertirrigação. Para ser bombeada para o tanque de vinhaça esse resíduo precisa ser resfriado de 90°C para 55°C , pois as tubulações existentes são de fibra de vidro e não suportam temperaturas acima de 60°C . Para ocorrer esse

resfriamento é necessário a captação de $70 \text{ m}^3/\text{h}$ a 30°C e conclui o resfriamento com a água da sedimentação de barro

CAPTAÇÃO POR GRAVIDADE

Da represa Chapecó, a água é direcionada pela de tubulação por gravidade, e distribuída para os seguintes pontos:

a) Refrigeração de óleo de mancais ($Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$), essa vazão é para complementar a água perdida por evaporação e pela purga da torre de resfriamento da água dos mancais, sendo que esta trabalha com vazão de $250 \text{ m}^3/\text{h}$, retornando na forma de circuito fechado;

b) Complementação do processo de evaporação ($Q = 30 \text{ m}^3/\text{h}$) a uma temperatura média de 30°C . Essa complementação é devido à perda causada pela evaporação no “spray” da destilaria. Exemplificando, ocorre a entrada de $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ a 45°C e sai do spray $970 \text{ m}^3/\text{h}$ a 30°C , havendo a necessidade de reposição;

c) Sanitários em geral, numa vazão de $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$, atendendo a NBR 24 da lei 6.514 de 22/12/1997 de segurança e medicina do trabalho, que prevê um consumo de 60 litros diários por trabalhador. Limpeza de pisos foi estimada $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

FERMENTAÇÃO

O processo de fermentação utilizado é o de recuperação de leveduras pela da centrifugação do vinho. Esta levedura recuperada, antes de retornar ao processo fermentativo, recebe um tratamento severo, que consiste em diluição com água e adição de ácido sulfúrico. Uma parte da água utilizada na etapa de fermentação é proveniente da etapa de evaporação do caldo (água condensada) e o restante é utilizado a partir da captação do poço semi-artesiano numa vazão de $22 \text{ m}^3/\text{h}$ a 30°C , conforme figura 3.2.

TROCA TÉRMICA NA FERMENTAÇÃO E NA PRODUÇÃO DE ÁLCOOL

Devido à grande quantidade de calor liberado durante o processo de fermentação e à necessidade da temperatura ser mantida em 33°C , é preciso realizar o resfriamento do vinho fermentado, circulando água em serpentinas internas às dornas, ou em trocadores

de calor a placas, por onde o vinho é bombeado continuamente com água em contracorrente. A vazão utilizada no resfriamento do vinho é de $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ em sistema fechado, com uma reposição que é captada na represa de $30 \text{ m}^3/\text{h}$.

Após a fermentação, o vinho é enviado para as colunas de destilação. O vinho que vem da fermentação possui, em sua composição, 7 a 10% em volume de álcool, além de outros componentes de natureza líquida, sólida e gasosa. A água de resfriamento da fermentação na temperatura de $33 \text{ }^\circ\text{C}$ é bombeada para um tanque e em seguida utilizada para resfriar o álcool. Em seguida, é encaminhada por gravidade para um spray numa vazão de $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ e temperatura média de $45 \text{ }^\circ\text{C}$. Do spray, a água retorna para o resfriamento das dornas de fermentação na temperatura de $30 \text{ }^\circ\text{C}$, fechando o circuito. A captação é realizada numa vazão de $30 \text{ m}^3/\text{h}$ e foi especificado no item acima (captação por gravidade, item b).

3.2.2. Água condensada

A água utilizada nas caldeiras transforma-se em vapor e posteriormente são condensadas em diferentes etapas do processo industrial, principalmente nos pré-evaporadores. Industrialmente é chamada de água condensada de escape. Esta etapa não produz água residuária, visto que a água de escape volta para alimentar as caldeiras. Nessa etapa existem perdas por evaporação e purgadores (cerca de 10%) que são repostas com água condensada, proveniente do próprio caldo da cana.

A água gerada por condensação dos gases dos evaporadores, chamada industrialmente de água condensada vegetal, pois é proveniente da cana, totaliza uma vazão de $345 \text{ m}^3/\text{h}$ em condições normais de operação, sendo utilizadas $265 \text{ m}^3/\text{h}$ em várias etapas do processo, como na destilaria que utiliza uma quantidade de $70 \text{ m}^3/\text{h}$, na moenda de cana $Q = 90 \text{ m}^3/\text{h}$, na caldeira $Q = 20 \text{ m}^3/\text{h}$ e na fábrica de açúcar, respectivamente. Esta água da fábrica é dividida entre a lavagem de pó ($Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$), centrifugas ($Q = 20 \text{ m}^3/\text{h}$), cozimento ($Q = 15 \text{ m}^3/\text{h}$) e o filtro ($Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$). Os $80 \text{ m}^3/\text{h}$ restante da água condensada é descartado na vinhaça.

3.3. Proposta de otimização do processo do uso de água numa indústria açucareira

Considerando a necessidade de minimizar o uso e perdas de água no processo de açúcar e álcool, é necessária a implantação de torres de resfriamento. 1- Para eliminar parte da captação de água existente por meio do reaproveitamento da água condensada, após ser resfriada na torre; 2- Utilizar uma torre de resfriamento de vinhaça para eliminar a captação de água atual utilizada na vinhaça.

Considerando o sistema atual e utilizando a quantidade suficiente de água em cada etapa do processo em circuito fechado necessita-se a instalação de torres de resfriamento para resfriar os seguintes volumes:

- 80m³/h de 70 °C para 30 °C para reaproveitar a água condensada e reutilizá-la na embebição da moenda, diluição do fermento, diluição dos produtos químicos, limpeza de pisos e sanitários;
- 160 m³/h de vinhaça de 65 °C para 45 °C para diminuir a captação de água existente no resfriamento da vinhaça. A vinhaça inicialmente foi resfriada com a água que sobrou da sedimentação de barro, sendo que o volume da vinhaça inicialmente era de 90 m³/h a 90 °C e passou para 160 m³/h, pois a troca térmica é com contato direto.

3.3.1 – Dimensionamento das torres

O projeto das torres foi realizado pela empresa Alpina e as informações solicitadas para que conseguisse dimensionar as torres foram os seguintes dados: Vazão, produto para resfriar, temperatura de entrada e saída do produto.

3.3.1.2. Vinhaça

Vinhoto, vinhaça ou restilo é o resíduo pastoso e malcheiroso que sobra após a destilação fracionada do caldo de cana-de-açúcar (garapa) fermentado, para a obtenção do etanol (álcool etílico). Para cada litro de álcool produzido, 12 litros de vinhoto são deixados como resíduo.

Para o resfriamento da vinhaça, obteve-se o dimensionamento de uma torre para resfriamento de $160 \text{ m}^3/\text{h}$ de vinhaça de 65°C para 45°C e temperatura de bulbo úmido de 24°C . O orçamento da torre foi realizado na Alpina Equipamentos Industriais e teve como principais características:

Resfriador modelo RVI – 122 – ST

Vazão Total = $200 \text{ m}^3/\text{h}$

Temperaturas = $65^\circ / 45^\circ\text{C}$

Custo de instalação:

Torre (R\$) = 61.280,00

Construção Civil: 15.678,00

Tubulações: 13.456,00

Elétrica: 45.432,00

Bomba: 33.432,00

Custo Total: 169.278,00

As torres de resfriamento secas apresentam-se como a alternativa com menor impacto ao meio ambiente próximo a usina, já que estas diminuem a necessidade de captação, emissão de vapores e geração de efluentes, mas devido ao seu alto custo de instalação e operação é preterida em relação as torres de resfriamento úmidas, estas muito prejudiciais não só pela grande necessidade de água como pelas contaminações de efluentes líquidos e gasosos com sais e metais. Diante disto propõem-se a implementação de sistemas híbridos que não apresentam custos muito elevados de instalação e operação e também trazem menores problemas ao ambiente.

3.3.1.3. Água condensada

O aproveitamento da água condensada por meio da instalação de uma torre de resfriamento irá favorecer a utilização desta água nos seguintes pontos: Embebição da moenda, diluição do fermento, diluição dos produtos químicos, limpeza de pisos e sanitários. A água condensada é resfriada de 70°C para 30°C .

O orçamento dos custos de implantação da torre foi realizado na Alpina Equipamentos Industriais e pode ser demonstrado na Figura 3.3.

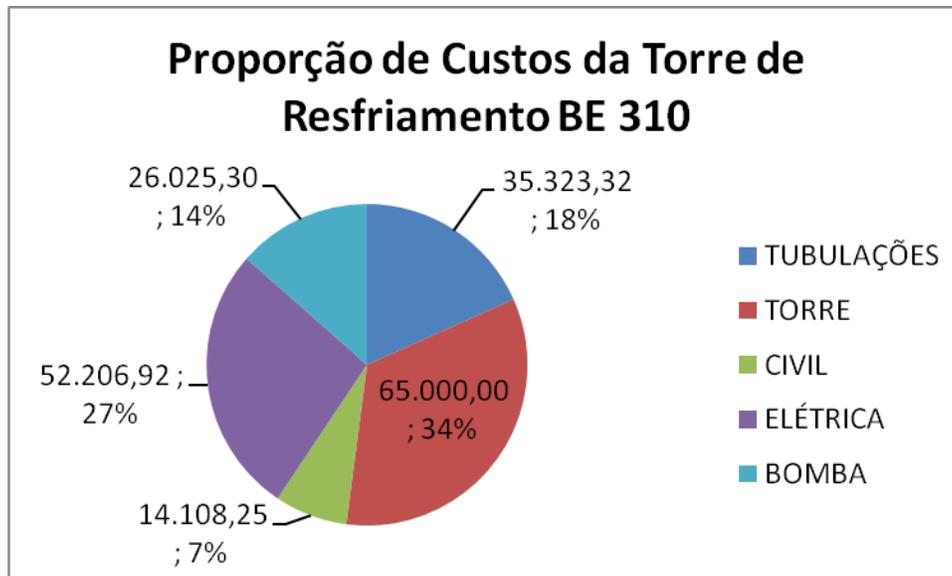


Figura 3.3. Proporção de custos da torre de resfriamento.
Fonte: Alpina Equipamentos Industriais.

Especificando:

Resfriador modelo BE 310

Vazão Total = 100 m³/h

Temperaturas = 70° / 30°C

Custo de instalação:

Torre (R\$) = 65.000,00

Construção Civil: 14.108,25

Tubulações: 35.323,32

Elétrica: 52.206,92

Bomba: 26.025,30

Custo Total: 192.663,79

3.4. Minimizar a geração de água condensada

Outra opção para que não tenha necessidade de investir em uma torre de resfriamento para água condensada (item **3.3.1.3**) é otimizar a moagem e seus parâmetros, para diminuir a geração de água condensada.

Um modelo para a otimização do processo foi proposto. Para o caso da minimização da vazão do caldo misto, do brix do caldo misto e do descarte de água, as funções objetivo são apresentadas nas Equações (1), que corresponde à vazão de caldo misto, (2), que corresponde ao Brix do caldo misto e (3), Descarte de água condensada.

$$QM = \frac{\left[M \left(\frac{EF * F}{100} \right) - \left(\frac{F * 100}{100 - UB - BB} \right) + 100 \right]}{100} \quad (1)$$

Sendo que:

QM: vazão de caldo misto (ton/h);

M: moagem de cana (ton/h);

F: teor de fibra da cana (%);

FBT: teor de fibra em percentagem de bagaço no primeiro terno da moenda (%);

UB: teor de umidade do bagaço (%);

BB: Brix do bagaço (%);

EF: percentual de embebição em relação às fibras (%);

A Equação (1) calcula a vazão de caldo misto em função das seguintes variáveis: Moagem de cana, teor de fibra da cana, teor de fibra em percentagem de bagaço no primeiro terno da moenda, percentual de embebição em relação às fibras, teor de umidade do bagaço e brix do bagaço.

$$BM = \frac{\left[100 * (1 - 0,01 * F) * BP - \left(\frac{F * 100}{100 - UB - BB} \right) * BB \right]}{\left[\left(\frac{EF * F}{100} \right) - \left(\frac{F * 100}{100 - UB - BB} \right) + 100 \right]} \quad (2)$$

Sendo que:

BM: Brix do caldo misto (%);

F: teor de fibra da cana (%);

UB: teor de umidade do bagaço (%);

BB: Brix do bagaço (%);

EF: percentual de embebição em relação às fibras (%);

BP: Brix do caldo primário (%);

A Equação 2 calcula o brix do caldo misto em função das seguintes variáveis: Teor de fibra da cana, brix do caldo primário, percentual de embebição em relação às fibras, teor de umidade do bagaço e Brix do bagaço.

$$D = \left[QM * \left(1 - \left(\frac{BM}{100} \right) \right) \right] + \left[CF * \left(1 - \left(\frac{BF}{100} \right) \right) \right] - [AU] \quad (3)$$

Sendo que:

D: Descarte de água condensada (m³/h);

QM: vazão de caldo misto (ton/h);

BM: Brix do caldo misto (%);

CF: vazão de caldo filtrado (ton/h);

AU: água condensada utilizada (m³/h), e

BF: Brix do caldo filtrado (%).

A Equação 3 calcula o descarte de água condensada em função das seguintes variáveis: Vazão de caldo misto, brix do caldo misto, vazão do caldo filtrado, brix do caldo filtrado e água condensada utilizada.

As restrições incorporadas ao modelo são apresentadas pelas Equações de (4) a (13).

$$0,11 < F < 0,14 \quad (4)$$

$$320 < M < 370 \quad (5)$$

$$FBT = 0,34 \quad (6)$$

$$EF = 25 \quad (7)$$

$$0,48 < UB < 0,52 \quad (8)$$

$$0,02 < BB < 0,04 \quad (9)$$

$$0,15 < BP < 0,20 \quad (10)$$

$$AU = 265 \quad (11)$$

$$CF = QM.0,2 \quad (12)$$

$$BF = 0,09 \quad (13)$$

Tomou-se como base de cálculo 1 hora e o sistema em regime permanente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para os resultados obtidos deve-se considerar uma usina que produz 75% de açúcar e 25% de álcool, ou seja, mix de 75% para o açúcar.

Neste capítulo são analisadas separadamente as etapas nas quais há o reaproveitamento da água de uma indústria sucroalcooleira a fim de reduzir a captação de água e diminuir a emissão de efluentes, além de analisar o balanço de massa da usina de açúcar e álcool.

4.1. Balanço de massa:

Para o estudo foram consideradas as seguintes especificações para a matéria prima (cana de açúcar):

Pol%Cana (Sacarose que contém na cana de açúcar):	14%
Teor de Fibra:	12,5%
Teor de Umidade:	68%
Impureza mineral:	10kg/tonelada de cana moída

A partir desses dados e considerando moagem de 355 ton/h tem-se :

Embebição:	130 m ³ /h
Lavagem de cana:	2,8 m ³ de água/tonelada de cana moída: 1000 m ³ /h
Caldo misto:	Moagem*1,04: 370 m ³ /h
Caldo filtrado:	20% da moagem: 71 m ³ /h
Caldo para evaporação:	Caldo misto+ Caldo filtrado: 441 m ³ /h

Foi determinada no laboratório industrial da Usina Santa Terezinha – unidade Iguatemi a densidade do caldo e do caldo concentrado. Foi também determinado o brix (%de sólidos solúveis) dos caldos.

Então, realizou-se o balanço de massa para determinar o volume de água condensada produzida na evaporação:

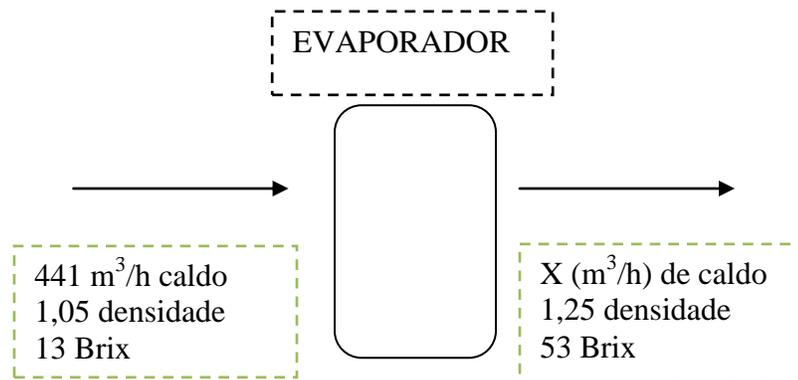


Figura 4.1. Evaporador
Fonte: Usina Santa Terezinha

Do balanço de massa chegou-se em $90 \text{ m}^3/\text{h}$ de caldo concentrado

Logo, o balanço de massa para a água condensada é:

$$\text{Água condensada} = (441 \text{ m}^3/\text{h} * 1,05 \text{ g/cm}^3) - (90 \text{ m}^3/\text{h} * 1,25 \text{ g/cm}^3) = 350 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Considerando perdas de 1,5% obteve-se um total de $345 \text{ m}^3/\text{h}$ de água condensada para utilizar no processo de açúcar e álcool.

A partir do fluxograma de captação e reaproveitamento de água, verificou-se o volume de cada corrente para obter a demanda de água nas etapas de moenda (lavagem da cana, embebição), fábrica de açúcar, destilaria e produtos químicos.

4.2. Água utilizada no processo produtivo

Lavagem de cana: Para a lavagem da cana, considerou-se uma vazão aproximada de $70 \text{ m}^3/\text{h}$ a temperatura média de $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Esta captação foi determinada utilizando-se da curva da bomba de lodo (barro + água). Nesta etapa do processo não houve mudanças, conforme mostra a figura 4.1.

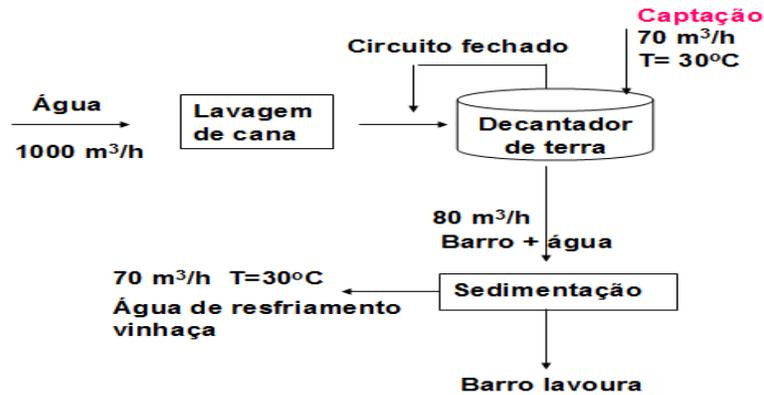


Figura 4.2. Lavagem de cana
Fonte: Usina Santa Terezinha

Embebição: Para a embebição da moenda são utilizadas duas correntes: uma com vazão aproximada de 40 m³/h e temperatura média de 30°C de água captada e uma outra corrente com vazão aproximada de 90 m³/h de água condensada, totalizando 130 m³/h conforme demonstrado na figura 4.2 abaixo.

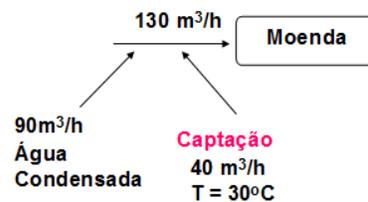


Figura 4.3. Embebição
Fonte: Usina Santa Terezinha

Para chegar nesses valores foi feito o seguinte balanço:

$$(90 \text{ m}^3/\text{h} * 70^\circ\text{C}) + (30^\circ\text{C} * 40 \text{ m}^3/\text{h}) = (130 \text{ m}^3/\text{h} * X^\circ\text{C})$$

X = 57 °C, temperatura ideal para utilizar na embebição, pois com temperatura maior, melhor será a extração do caldo, porém, acima disso prejudica a operação da moenda.

Com a instalação da torre de resfriamento essa captação existente será substituída por água condensada (40 m³/h e temperatura de 30°C). Com esta alteração a embebição terá água de melhor qualidade, pois a água da represa possui sólidos suspensos.

Evaporação: Na etapa de evaporação, a água gerada por condensação dos gases dos evaporadores, chamada de água condensada vegetal, pois vem da cana, totaliza uma vazão de $345 \text{ m}^3/\text{h}$, sendo utilizadas $265 \text{ m}^3/\text{h}$ em várias etapas do processo, conforme figura 4.3.



Figura 4.4. Evaporação
Fonte: Usina Santa Terezinha

A reposição da caldeira deve-se devido às perdas, que normalmente ficam em torno de 10%.

$$\text{Vazão da reposição caldeira} = 175 \text{ m}^3/\text{h} * 0,1 = 17,5 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Fabricação de açúcar: Na fábrica de açúcar, a água condensada é dividida entre a lavagem de pó ($Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$), centrífugas ($Q = 20 \text{ m}^3/\text{h}$), cozimento ($Q = 15 \text{ m}^3/\text{h}$) e o filtro ($Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$). Os $80 \text{ m}^3/\text{h}$ restante da água condensada eram descartadas na vinhaça. Esses volumes foram calculados conforme a necessidade dos equipamentos.

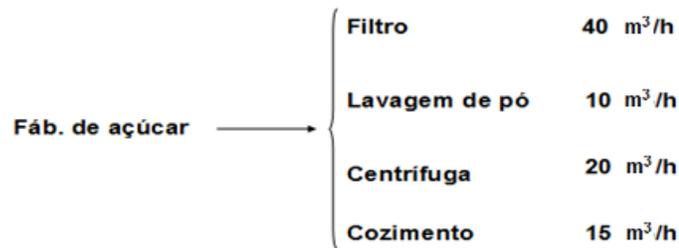


Figura 4.5. Fabricação de Açúcar
Fonte: Usina Santa Terezinha

Nos setores da evaporação e fabricação de açúcar não ocorreram mudanças com a instalação da torre de resfriamento. As mudanças foram em relação ao resfriamento e reaproveitamento dos 80 m³/h de água condensada que eram descartados na vinhaça.

Destilaria: A vazão utilizada no resfriamento do vinho é de 1000 m³/h em sistema fechado, com uma reposição captada na represa de 30m³/h a uma temperatura média de 30°C. Essa complementação é devido à perda causada pela evaporação no spray da destilaria que esta entre 2 a 5% . Exemplificando, ocorre a entrada de 1000 m³/h a 45 °C e sai do spray 970 m³/h a 30°C, havendo a necessidade de reposição. Neste setor não houve melhorias, conforme mostra a figura 4.4.

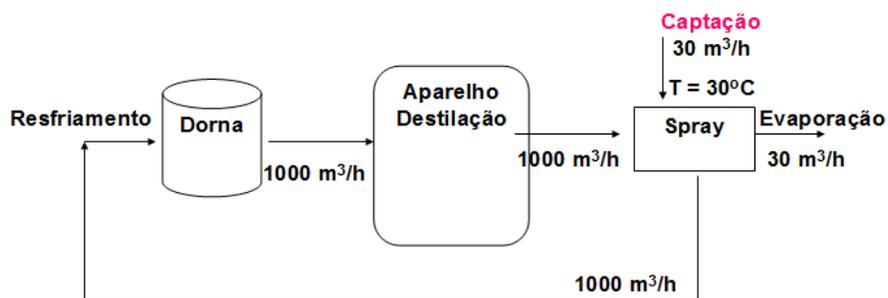


Figura 4.6. Destilaria
Fonte: Usina Santa Terezinha

Vinhaça: Após a destilação do álcool, o resíduo produzido, a vinhaça, precisa ser resfriada de 90 °C para 55 °C, a fim de ser utilizada como fertirrigação. Para ocorrer esse resfriamento é necessário a captação de uma vazão aproximada de 70 m³/h e

temperatura média de 30 °C e conclui o resfriamento com a água da sedimentação de barro, numa vazão de 70 m³/h. A figura 4.5 mostra o sistema da vinhaça.

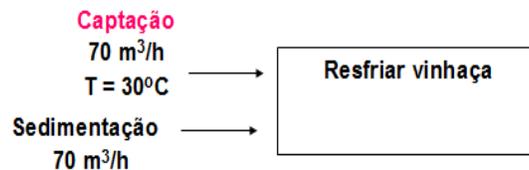


Figura 4.7. Vinhaça
Fonte: Usina Santa Terezinha

Para diminuir o volume de vinhaça e extinguir a captação de água nesse setor foi instalada uma torre de resfriamento para diminuir a temperatura da vinhaça de 65 °C para 45 °C.

Os resultados partiram de uma produção de 180 m³/dia de álcool hidratado.

Sendo que o teor alcoólico do vinho a ser destilado está em torno de 8% e o teor alcoólico do álcool hidratado de 95%, tem:

$$7,5 \text{ m}^3/\text{h} \text{ de álcool} * 95\% \text{ de álcool} = X(\text{m}^3/\text{h}) \text{ de vinhaça} * 8\% \text{ de álcool}$$

Vinhaça = 89 m³/hora ou aproximadamente 12 litros de vinhaça para 01 litro de álcool produzido.

Portanto:

$$90 \text{ m}^3/\text{h} * 90^\circ\text{C} + 70 \text{ m}^3/\text{h} * 30^\circ\text{C} = 160 \text{ m}^3/\text{h} * Y$$

Y = 65 °C que é a temperatura da vinhaça que entrará na torre de resfriamento.

As densidades são próximas de 1g/cm³, portanto foram consideradas 1g/ cm³.

Diluição do fermento: Para a diluição do fermento é feito a captação, por meio de bomba, de uma vazão aproximada de 22 m³/h a temperatura média de 30 °C de um poço artesiano. A figura 4.6 mostra o processo de diluição de fermento

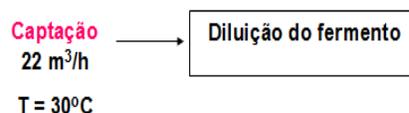


Figura 4.8. Diluição de fermento
Fonte: Usina Santa Terezinha

Chegou-se nesse valor de captação da seguinte forma:

$10 \text{ m}^3/\text{h}$ de fermento com 60% de concentração = 28% de concentração * Z

Z = $22 \text{ m}^3/\text{hora}$ de água. As densidades são próximas de $1\text{g}/\text{cm}^3$, portanto foram consideradas $1\text{g}/\text{cm}^3$

O poço semi-artesiano ficará em “stand-by” para eventuais necessidades, pois será utilizada água condensada da torre de resfriamento implantada.

Produtos químicos: Para o preparo dos produtos utilizados no processo de fabricação de açúcar, no caso, a cal e o polímero, ocorre a captação de água por meio de bomba, numa vazão aproximadamente de $3 \text{ m}^3/\text{h}$ a temperatura de 30°C para a cal e vazão de $2 \text{ m}^3/\text{h}$ a temperatura média de 30°C para o polímero. A água utilizada é apenas para diluir os produtos, conforme mostra abaixo.

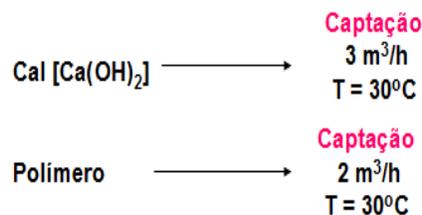


Figura 4.9. Produtos Químicos

Fonte: Usina Santa Terezinha

Essas captações existentes para preparo da cal e do polímero serão substituídas por água condensada da torre implantada.

Sanitários e limpeza de pisos: As águas utilizadas atualmente vêm da represa e serão substituídas por água condensada. A captação existente para essa etapa é aproximadamente $1 \text{ m}^3/\text{h}$, sendo $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$ para os sanitários e $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$ para limpeza dos pisos.

Dos $80 \text{ m}^3/\text{h}$ de água condensada que serão resfriados na torre $68 \text{ m}^3/\text{h}$ vão ser reaproveitadas na embebição, diluição de fermento, diluição de produtos químicos, sanitários e limpeza do piso, conforme foi explicado nos itens anteriores. Os $12 \text{ m}^3/\text{h}$ de água condensada que sobraram serão enviadas para a vinhaça ou reaproveitada em oscilações do processo.

A verificação da viabilidade econômica do projeto foi realizada segundo aspectos sociais, financeiros e ambientais tais como: redução da emissão de efluentes, pagamento da captação de água, qualidade da água utilizada, redução do consumo de energia elétrica.

Considerando-se a cobrança pelo uso da água num valor estimado de R\$ 0,23 / m³ captado e devolvido ao rio, tem-se no sistema proposto uma redução da captação de 138 m³/h. A safra tem um período de 200 dias com tempo aproveitado de 80%, isso significa 160 dias úteis. Ao final de 01 safra a redução de custo pelo pagamento de água captada será de aproximadamente R\$ 121.881,00 reais, visto que o custo de instalação das 2 torres de resfriamento ficou em torno de R\$ 362.000,00 reais, o retorno desse capital será em 3 anos. A depreciação dos equipamentos não foi considerada nos cálculos.

A qualidade da água condensada reutilizada no processo de produção de álcool e açúcar não tem grande interferência, uma vez que esta já é tratada, além de ser de melhor qualidade em relação a da represa, principalmente em dias chuvosos, no quais a água da represa possui um elevado nível de impureza mineral.

Com a implantação da torre de resfriamento no processo tende-se a diminuir o volume de água captada utilizada no processo de produção de álcool e açúcar e como consequência, o melhoramento do balanço hídrico da usina.

Em função do reaproveitamento da água condensada pode-se utilizar um volume maior de água na embebição da moenda, quando comparado ao sistema atual, sem necessidade de aumento de captação de água do rio, pois os 80 m³/h da torre de resfriamento de água condensada não estão sendo utilizados em sua totalidade.

Considerando que a usina tem moagem de 355 toneladas/hora a captação de água passou de 0,696 m³/tonelada de cana moída para 0,307 m³/tonelada de cana moída, isso significa redução de 56% na captação.

Com a implantação da torre de resfriamento da vinhaça o volume desse produto foi reduzido em 70 m³/h, o que irá favorecer na economia de energia pelo do bombeamento e distribuição desse produto na lavoura.

A captação de água passou de 247 m³/h para 138 m³/h o que significa uma redução de efluentes que anteriormente eram despejados na vinhaça.

4.3. Minimização da geração de água condensada

A aplicação do modelo de otimização por meio do otimizador comercial GAMS proposto nas equações de (1) a (13) apresentou os seguintes resultados:

Descarte de água condensada = 68,94 m³/h

Vazão de caldo misto = 328 ton/h

Brix do caldo misto = 16,39 %

Teor de fibra da cana = 11 %

Moagem = 320 ton/hora

Teor de umidade do bagaço = 52 %

Brix do Bagaço = 4 %

Brix do caldo primário = 20 %

O descarte de água condensada foi de 68,94 m³/h, sendo este valor inferior ao demonstrado nos cálculos para a torre de resfriamento que era de 80 m³/hora.

Foi também considerada a possibilidade de que não existisse o descarte de água. Neste caso, os valores ótimos encontrados foram os seguintes:

Descarte de água condensada = 00,00 m³/h

Vazão de caldo misto = 260,35 ton/h

Brix do caldo misto = 16,39 %

Teor de fibra da cana = 11 %

Moagem = 254 ton/hora

Teor de umidade do bagaço = 52 %

Brix do Bagaço = 4 %

Brix do caldo primário = 20 %

Para que não ocorra descarte de água a moagem teria que ser de 254 toneldas/hora, o que não seria viável para a unidade produtiva.

5. CONCLUSÕES

A instalação de torres de resfriamento satisfaz ao balanço térmico e de massa. Por conseguinte atende, ainda, os objetivos deste trabalho, pois se alcança a minimização da captação de água na Usina de açúcar Santa Terezinha.

Com a instalação de torres de resfriamento se consegue obter um menor volume de captação, ou seja, 109 m³/h. Isto representa um consumo específico de 0,307 m³/tonelada de cana esmagada.

Outra importante conclusão é que, com a implantação do circuito quase que totalmente fechado de água, consegue-se a minimização dos efluentes e minimização do volume de vinhaça, fazendo com que diminua os custos de aplicação na lavoura.

A qualidade da água condensada reutilizada no processo de produção de álcool e açúcar não tem grande interferência, uma vez que esta já é tratada.

Com a implantação de torre de resfriamento no processo tende-se a diminuir o volume de água captada utilizada no processo de produção de álcool e açúcar e como consequência, o melhoramento do balanço hídrico da usina.

Quanto aos aspectos econômicos, deve-se levar em consideração o valor inicial de investimento, o seu tempo de retorno e ainda possíveis custos de manutenção. Os custos de implantação para torres de resfriamento são próximos de R\$ 362.000,00.

O retorno do investimento inicial, considerando o pagamento da água captada, ficará próximo dos três anos.

Em função do reaproveitamento da água condensada pode-se utilizar um volume maior de água na embebição da moenda, quando comparado ao sistema atual, sem necessidade de aumento de captação de água do rio.

A captação de água passou de 0,696 m³ por tonelada de cana moída para 0,307 m³/tonelada de cana moída, isso significa redução de 56% na captação.

Desta forma, com a instalação de torres de resfriamento, consegue-se a redução da captação de água, satisfazendo plenamente os objetivos desse estudo.

Os parâmetros ótimos para minimizar a geração de água condensada são:

Descarte de água condensada = 68,94 m³/h

Vazão de caldo misto = 328 ton/h

Brix do caldo misto = 16,39%

Teor de fibra da cana = 11%

Moagem = 320 toneladas/hora

Tero de umidade do bagaço = 52 %

Brix do Bagaço = 4 %

Brix do caldo primário = 20%

Com a otimização dos parâmetros de moagem obteve-se descarte de água condensada no valor de 68,94 m³/h, inferior aos 80 m³/h atual.

Para evitar o investimento em uma torre de resfriamento de água condensada, pode-se adequar os parâmetros de moagem e da cana, e como consequência diminuir o volume de água condensada descartada no processo atual. E para eliminar o descarte de água totalmente não é viável em virtude da redução de moagem que deveria ser feita.

6. SUGESTÕES

A seguir são apresentadas as principais sugestões para trabalhos futuros:

- Reduzir o volume água na lavagem de cana, pois é um dos pontos de maior perda de açúcar.
- Substituir multi-jatos (sistema de formação do vácuo) da evaporação por colunas barométricas, reduzindo dessa forma a quantidade de água.
- Substituir multi-jato do filtro de torta (sistema de formação do vácuo) por colunas barométricas, reduzindo dessa forma a quantidade de água.
- Otimizar a utilização da água condensada no processo industrial, para que não ocorra captação.

REFERÊNCIAS

BARBIERI, J. C. Gestão Ambiental Empresarial: conceitos, modelos instrumentos. 2ed. São Paulo: Saraiva, 2007.

BASSANEZI, R. C. Ensino-aprendizagem com modelagem matemática: uma nova estratégia. São Paulo: Contexto, 2002.

BIEMBENGUT, M. S.; HEIN, N. Modelagem matemática no ensino. São Paulo: Contexto, 2003.

BRAILE, Pedro Marcio; CAVALCANTI, José Eduardo W.A. Manual de Tratamento de Águas Residuárias. In: São Paulo: CETESB, 1993.

BURGER, Robert. Cooling tower technology: maintenance, upgrading and rebuilding. 3ed, The Fairmont Press, Inc. India. 1994.

CHAVES, M. I. A. Modelagem Matemática: Elaboração de Atividades. I Encontro Regional das Sociedades. Dezembro de 2005. Belém – PA

CHEREMISINOFF, N. P., Cooling towers: selection, design and practice. Michigan. Ann Arbor Science. 1981.

COPERSUCAR - Centro de Tecnologia Copersucar. Série 20, 1ª Ed, 1988.

COPERSUCAR. Centro de Tecnologia Copersucar, 2007.

CTC - Centro de Tecnologia Canavieira. Disponível em: <http://www.ctc.com.br> Acesso em: 10 abr. 2010.

DEDINI: <http://www.dedini.com.br> Acesso em: abr. 2010.

DONAIRE, Denis. Gestão Ambiental na Empresa. São Paulo - SP, Editora Atlas, 1995.

EDGAR, T.F; HIMMELBLAU, D.M; LASDON, L.S; Optimization of chemical processes, 2ed, 2001.

ELIA NETO, A. Tratamento de efluentes da agroindústria sucroalcooleira, Simpósio Febral, 1995.

EPUSP - <http://www.hottopos.com/regeq14/giorgia.pdf> Acesso em: 10 abr. 2010.

GLEICK, P.H Basic water requirements for human activities. Vol. 21, 1996.

GOMES, F. P.; LIMA, U. A. A cana-de-açúcar no mundo. In: cultura e adubação de cana-de-açúcar. Instituto brasileiro de potassa. São Paulo, 1964.

LEITE, H.T.C. Cobrança pelo uso da água e redução deste recurso natural no setor sucroalcooleiro, Simpósio UDOP, 2005.

LUCCAS, J. Revista Expressão. São Paulo, março, 2000.

MACEDO, I. C. A Energia da Cana-de-açúcar: Doze estudos sobre a Agroindústria da Cana-de-açúcar no Brasil e a sua Sustentabilidade. UNICA, 2005.

MATIOLI, C.S. Viabilidade econômica da irrigação suplementar de cana de açúcar, *Saccharum spp*, para a região Norte do estado de São Paulo, *Acta Scientiarum*, Maringá, 2001.

MELO, A. R. Otimização do reuso de água em lavadores contínuos da indústria têxtil., 2005.

PELLEGRINI, L. F.. Análise e otimização termo-econômica-ambiental aplicada à produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade. São Paulo, 2009.

RAVAGNANI, M. A. S. S.; MÓDENES, A. N.; MENON, R. Redução da emissão de poluentes líquidos por reutilização de água em processos industriais. Acta Scientiarum Technology, 2003.

RAVAGNANI, M. A. S. S.; RIGHETTO, A. R.; MARQUINI, M. F. Otimização energética no processo industrial da destilaria Cocafé, Maringá, 2002.

REVISTA OPINIÕES – [HTTP://www.revistaopinioes.com.br](http://www.revistaopinioes.com.br) Acesso em: 08 dez. 2010.

ROCHA, C. L. Curso de Especialização em Gestão dos Recursos Hídricos. Gestão de Recursos Hídricos I. Florianópolis: Campus Virtual e Tutoria a Distância: Fundação Universitária Iberoamericana. Financiamento CNPQ, MCT e CT Hidro-Fundo Setorial de Recursos Hídricos. 2005.

TENÓRIO, R. M. B. II-131 - Águas de reuso em uma indústria açucareira de Alagoas. 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2010.

TORQUATO JR, H.; CALLADO, N. H.; MENEZES, A. C. V.; PIMENTEL; I. M. C.; OMENA, S. P. F.; PEDROSA, V. A. Qualidade das águas de lavagem de cinzas e gases das caldeiras de uma indústria sucroalcooleira. 2004, VIII Jornada Alagoana de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES/AL.

WEILER D. K, Caracterização e otimização do reuso de águas da indústria têxtil, 2005.