

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DE PRODUÇÃO INDUSTRIAL  
SUCROENERGÉTICA – MTA**

**REDUÇÃO E REAPROVEITAMENTO DE ÁGUA NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE  
ETANOL: UM ESTUDO DE CASO**

**ALEXANDRE GALVÃO BRASILEIRO DE MELLO**

**Piracicaba  
2012**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DE PRODUÇÃO INDUSTRIAL  
SUCROENERGÉTICO – MTA**

**REDUÇÃO E REAPROVEITAMENTO DE ÁGUA NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE  
ETANOL: UM ESTUDO DE CASO**

**ALEXANDRE GALVÃO BRASILEIRO DE MELLO**

Monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação MTA em Gestão de Produção Industrial Sucoenergética.

Aluno: Alexandre Galvão Brasileiro de Mello

Orientador: Prof. Cláudio Hartkopf Lopes

**Piracicaba  
2012**

*Dedico esse trabalho inicialmente à minha família, em especial à minha esposa Viviane e minha princesinha Lívia pela paciência e compreensão nos vários sábados em que estive ausente e pelo mau humor em alguns momentos. Dedico também aos demais familiares, mãe, pai e irmã, pela ajuda e incentivo nos momentos mais difíceis nessa caminhada. Dedico ainda à Petrobras Biocombustível e a todos da equipe da Diretoria de Etanol pelo apoio durante todo o curso.*

## ***RESUMO***

MELLO, Alexandre Galvão Brasileiro. **REDUÇÃO E REAPROVEITAMENTO DE ÁGUA NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ETANOL: UM ESTUDO DE CASO.** Piracicaba, 2012. Monografia (Programa de Pós-Graduação MTA em Gestão de Produção Industrial Sucroenergética) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos, Piracicaba, 2012.

A escassez progressiva de água no planeta nos obriga, cada vez mais, a buscar caminhos de redução e reaproveitamento dos recursos hídricos disponíveis. O setor sucroenergético vem ao longo dos anos diminuindo seu consumo de água, mas há ainda espaços para maiores reduções, seja através da utilização de tecnologias inovadoras, ou através de reaproveitamento de correntes existentes, otimizações de processos, integração mássica etc.. Uma Planta de produção de etanol convencional demanda, em seus diversos processos, quantidades significativas de água, seja através de lavagens de cana, esteiras, gases, pisos etc., nas diluições, nas reposições (excessiva) das torres de resfriamento e das caldeiras, nos diversos resfriamentos, entre outros usos. Vários são os pontos no processo onde há onde se ganhar em economia de água. A tecnologia de limpeza de cana a seco, por exemplo, elimina a água na lavagem, que inclusive arrasta açúcares contidos na cana em quantidade significativa. A tecnologia de concentração de vinhaça, por outro lado, aproveita a água da vinhaça que pode ser reutilizada em aquecimentos, embebições e / ou diluições de correntes; idem para outras tecnologias inovadoras. Esse trabalho buscou estudar alguns anexos em uma destilaria convencional, considerando inicialmente um anexo de uma unidade com 100% de cana inteira e com lavagem, sem concentrar a vinhaça e com todas suas torres de resfriamento trabalhando com baixa concentração de impurezas, ou seja, elevado consumo de água de reposição. Anexos variando estas três situações foram realizados no sentido da redução do consumo inicial identificado. Os resultados obtidos mostram de forma distinta a influência de cada uma dessas situações na diminuição da vazão necessária de água captada. O aumento da vazão de vinhaça para concentração com reaproveitamento da água evaporada mostrou que, além de outros aspectos importantes de processo e de custos, proporciona uma redução bastante significativa na vazão de água captada. Diferentemente, a variação no percentual de cana lavada, que por ser um processo em circuito fechado e com baixa vazão de reposição, mostrou muito pouca influência nesse aspecto. Em relação à melhoria na eficiência do sistema de resfriamento de água, através

da variação do ciclo de concentração, verificou-se uma redução do consumo de água significativa, porém não tão evidente quanto no parâmetro de vazão de vinhaça para concentração. Há, evidentemente, outros aspectos importantes que devem ser considerados na viabilidade da aplicação dessas mudanças no processo, porém é importante destacar que todos esses são alternativas já aplicadas em algumas unidades existentes e em novos projetos; todos eles tendem a estar cada vez mais presentes nas unidades de produção de etanol e também de açúcares. Como já enfatizado, a adoção de práticas e aplicações com o viés de redução do consumo de água é um caminho sem volta.

**Palavras-chave:** água, redução, reaproveitamento, resfriamento, ciclo de concentração, tecnologias, limpeza, cana, concentração, vinhaça, balanços.

**LISTA DE ILUSTRAÇÕES**

<b>1</b>	DISTRIBUIÇÃO MÉDIA DOS USOS PONTUAIS DE ÁGUA	5
<b>2</b>	DIAGRAMA DE BLOCOS - PRODUÇÃO DE ETANOL DE CANA	8
<b>3</b>	FLUXOGRAMA DA FERMENTAÇÃO EM BATELADA (MELLE-BBOINOT)	18
<b>4</b>	CICLO TÉRMICO DE UMA UNIDADE SUCROENERGÉTICA	21
<b>5</b>	SISTEMA DE RESFRIAMENTO ABERTO COM RECIRCULAÇÃO	23
<b>6</b>	REPRESENTAÇÃO – TORRE DE RESFRIAMENTO	24
<b>7</b>	PROBLEMAS EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO	26
<b>8</b>	BALANÇO HÍDRICO EM UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO	28
<b>9</b>	IMPUREZAS NA CANA	31
<b>10</b>	ESQUEMA - CONCENTRADOR DE VINHAÇA CONVENCIONAL	37
<b>11</b>	CONCENTRADOR DE VINHAÇA COM CONDENSADOR EVAPORATIVO	39
<b>12</b>	ÁGUA CAPTADA (M <sup>3</sup> /H)	51
<b>13</b>	CONSUMO ESPECÍFICO (M <sup>3</sup> /TC)	51

**LISTA DE TABELAS**

<b>1</b>	<b>USOS MÉDIOS DA ÁGUA EM UNIDADES PRODUTORAS</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA VINHAÇA (MÉDIA)</b>	<b>35</b>
<b>3</b>	<b>PARÂMETROS DE QUALIDADE e QUANTIDADE DA CANA PROCESSADA</b>	<b>40</b>
<b>4</b>	<b>PREMISSAS DE PROCESSO (BALANÇOS de MASSA)</b>	<b>40</b>
<b>5</b>	<b>PREMISSAS DE PROCESSO (BALANÇOS de ENERGIA)</b>	<b>42</b>
<b>6</b>	<b>PREMISSAS DE USOS DE ÁGUA NO PROCESSO</b>	<b>43</b>
<b>7</b>	<b>ÁGUA CAPTADA E CONSUMO ESPECÍFICO – ANEXOS 1, 2 E 3</b>	<b>48</b>
<b>8</b>	<b>ÁGUA CAPTADA E CONSUMO ESPECÍFICO – ANEXOS 3, 4 E 5</b>	<b>49</b>
<b>9</b>	<b>ÁGUA CAPTADA E CONSUMO ESPECÍFICO – ANEXOS 6, 7 E 8</b>	<b>50</b>

**SUMÁRIO**

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>8</b>
<b>2.1. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ETANOL</b>	<b>8</b>
2.1.1. RECEPÇÃO DE CANA	8
2.1.2. PREPARO DE CANA E EXTRAÇÃO DO CALDO	9
2.1.3. TRATAMENTO DE CALDO	11
2.1.4. CONCENTRAÇÃO DO CALDO	13
2.1.5. FERMENTAÇÃO ETANÓLICA	14
2.1.5.1. PREPARO E RESFRIAMENTO DO MOSTO	14
2.1.5.2. FERMENTAÇÃO	15
2.1.5.3. CENTRIFUGAÇÃO DO VINHO BRUTO	16
2.1.5.4. TRATAMENTO DO FERMENTO	17
2.1.6. DESTILAÇÃO	18
2.1.7. DESIDRATAÇÃO	19
2.1.8. GERAÇÃO DE VAPOR	20
2.1.9. GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	21
<b>2.2. SISTEMAS DE RESFRIAMENTO</b>	<b>22</b>
2.2.1. CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE RESFRIAMENTO	22
2.2.2. TORRES DE RESFRIAMENTO	23
2.2.3. ÁGUA DE RESFRIAMENTO	25
2.2.4. REPOSIÇÃO EM TORRES DE RESFRIAMENTO	27
2.2.5. BALANÇOS DE MASSA - CICLOS DE CONCENTRAÇÃO	28
<b>2.3. SEPARAÇÃO DE IMPUREZAS</b>	<b>30</b>
2.3.1. IMPUREZAS	30
2.3.2. CANA INTEIRA E CANA PICADA	32
2.3.3. LAVAGEM DE CANA E LIMPEZA DE CANA A SECO	32
2.3.3.1. LAVAGEM DE CANA	32
2.3.3.2. LIMPEZA DE CANA A SECO	33
<b>2.4. CONCENTRAÇÃO DE VINHAÇA</b>	<b>34</b>
2.4.1. VINHAÇA	34
2.4.2. CONCENTRAÇÃO DE VINHAÇA EM MÚLTIPLOS EFEITOS	37



<b>3. METODOLOGIA UTILIZADA (ESTUDO DE CASO)</b>	<b>40</b>
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA E DO PROCESSO	40
3.2. PREMISSAS HÍDRICAS	43
3.3. ANEXOS ESTUDADOS	45
3.3.1. OTIMIZAÇÃO DO CICLO DE CONCENTRAÇÃO	45
3.3.1.1. CÁLCULO DOS CICLOS DE CONCENTRAÇÃO (CC)	45
3.3.2. PERCENTUAL DE CANA PROCESSADA COM LAVAGEM	46
3.3.2.1. CÁLCULO DA REPOSIÇÃO DE ÁGUA DE LAVAGEM	46
3.3.3. PERCENTUAL DE VINHAÇA PARA CONCENTRAÇÃO	46
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>48</b>
4.1. CICLO DE CONCENTRAÇÃO – TORRES DE RESFRIAMENTO	48
4.2. LAVAGEM DE CANA	49
4.3. CONCENTRAÇÃO DE VINHAÇA	50
4.4. ANÁLISE GLOBAL DOS RESULTADOS	51
<b>5. CONCLUSÕES</b>	<b>53</b>
<b>6. SUGESTÕES</b>	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>55</b>
<b>BALANÇOS HÍDRICOS (ANEXOS 1 A 8)</b>	<b>58</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O aumento populacional e o desenvolvimento humano impõem uma necessidade cada vez maior dos recursos hídricos. O controle e a posse dos corpos d'água geram inúmeros conflitos, uma vez que a água limita o desenvolvimento sustentável, como um recurso natural não renovável e finito (Branco - 2004).

O aumento de população e de consumo enfrenta o fato de que a quantidade de água disponível é limitada. A água doce está sendo convertida em um recurso cada vez mais escasso e valioso especialmente pelo volume de resíduos nela lançados, provocando aumento da poluição e dificultando cada vez mais sua reutilização. Os processos naturais não são suficientes para purificar a água, surgindo a necessidade de se tratar todos os efluentes líquidos antes do lançamento nos corpos de água receptores (Branco - 2004).

E é nesse contexto, que cresce cada vez mais, a importância dos sistemas de tratamento de águas e efluentes. Através do uso racional do recurso hídrico, evitando desperdícios e promovendo máximo aproveitamento dentro do processo, além de reusos dos efluentes de processo gerados, buscando o menor despejo possível e atendendo aos padrões pré-determinados.

Em relação aos biocombustíveis, cada vez mais o pensamento como substituto ou complemento aos combustíveis fósseis, tem se intensificado. As possibilidades de aumento das capacidades das indústrias produtoras de etanol e do surgimento de novos projetos “greenfields” é o caminho, mesmo sabendo-se dos atuais problemas que o setor vem enfrentando, desde o surgimento da crise econômica mundial a partir de 2008.

A produção de biocombustíveis pode (IEA - 2006):

- Contribuir para atingir várias das “Metas de Desenvolvimento do Milênio”, fazendo uma importante contribuição para os objetivos de política energética;
- Contribuir para a segurança energética diversificando o fornecimento de recursos energéticos para o transporte;
- Reduzir as emissões de gases de efeito estufa;
- Reduzir poluição local;
- Desenvolver uma nova indústria e conseqüentemente atrair novos investimentos.

Nesse contexto, devemos pensar o setor sucroenergético, além de potencial produtor de combustível alternativo renovável, como também um potencial consumidor de utilidades, mais especificamente de água, já que em relação à energia elétrica, são normalmente autossuficientes.

Em relação à parte industrial, o consumo sempre foi historicamente bastante elevado, principalmente em função da quantidade de captação de água praticada.

Porém, é importante ressaltar que os níveis de captação e lançamento de água têm sido reduzidos substancialmente nos últimos anos nesse segmento especificamente, através de gestões mais preocupadas com a área ambiental e a de recursos hídricos. Hoje existem unidades que captam volumes bem menores por tonelada de cana processada, principalmente naquelas em que se observa a substituição parcial ou total de processos altamente consumidores de água, ou o reaproveitamento de correntes hídricas em outro ponto do processo.

Vale a pena comentar a diferença entre a água captada, que nos últimos anos tem diminuído consideravelmente. Segundo DEDINI, 2008, a redução em foi de 5m<sup>3</sup>/t cana em 1997 para 1 m<sup>3</sup>/t cana em 2008, com 98% de recuperação, ou seja, na forma de águas residuárias que podem ser reutilizadas na lavoura, e o uso médio nos diversos processos, diferente de consumo, que é a água captada que não retornou ao corpo receptor. Devem-se considerar as reutilizações e os aspectos de racionalização do uso, resultando em valores de captação bem menores. Esses usos de água do processo hoje se encontra na casa dos 22,1 m<sup>3</sup>/ t de cana processada, segundo tabela 1 abaixo para o caso de uma usina com destilaria anexa (ANA – Agência Nacional de Águas - 2009).

TABELA 1: USOS MÉDIOS DA ÁGUA EM UNIDADES PRODUTORAS DE AÇÚCAR E ETANOL

Setor	Finalidade	Uso Específico	Uso médio		
			[m <sup>3</sup> /t cana]	[%]	
Alimentação, preparo e extração (moendas e difusores)	Lavagem de cana	2,200 m <sup>3</sup> /t cana total	2,200	9,9	
	Embebição	0,250 m <sup>3</sup> /t cana total	0,250	1,1	
	Resfriamento de mancais	0,035 m <sup>3</sup> /t cana total	0,035	0,2	
	Resfriamento óleo	0,130 m <sup>3</sup> /t cana total	0,130	0,6	
<b>Subtotal</b>			<b>2,615</b>	<b>11,8</b>	
Tratamento de caldo	Resfriamento coluna sulfitação <sup>(*)</sup>	0,100 m <sup>3</sup> /t cana açúcar	0,050	0,2	
	Preparo de leite de cal	0,030 m <sup>3</sup> /t cana total	0,030	0,1	
	Preparo de polímero <sup>(*)</sup>	0,015 m <sup>3</sup> /t cana açúcar	0,008	0,0	
	Aquecimento do caldo	p/açúcar <sup>(*)</sup>	160 kg <sub>-vapor</sub> /t cana açúcar	0,080	0,4
		p/etanol <sup>(*)</sup> e <sup>(*)</sup>	50 kg <sub>-vapor</sub> /t cana etanol	0,025	0,1
	Lavagem da torta	0,030 m <sup>3</sup> /t cana total	0,030	0,1	
Condensadores dos filtros	0,300 a 0,350 m <sup>3</sup> /t cana total	0,350	1,6		
<b>Subtotal</b>			<b>0,573</b>	<b>2,6</b>	
Fábrica de açúcar <sup>(*)</sup>	Vapor para evaporação	0,414 t/t cana açúcar	0,207	0,9	
	Condensadores/multijatos evaporação	4 a 5 m <sup>3</sup> /t cana açúcar	2,250	10,2	
	Vapor para cozimento	0,170 t/t cana açúcar	0,085	0,4	
	Condensadores/multijatos cozedores	8 a 15 m <sup>3</sup> /t cana açúcar	5,750	26,0	
	Diluição de méis e magas	0,050 m <sup>3</sup> /t cana açúcar	0,030	0,1	
	Retardamento do cozimento	0,020 m <sup>3</sup> /t cana açúcar	0,010	0,0	
	Lavagem de açúcar (1/3 água e 2/3 vapor)	0,030 m <sup>3</sup> /t cana açúcar	0,015	0,1	
	Retentor de pó de açúcar	0,040 m <sup>3</sup> /t cana açúcar	0,020	0,1	
<b>Subtotal</b>			<b>8,367</b>	<b>37,8</b>	
Fermentação <sup>(*)</sup>	Preparo do mosto	0 a 10 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> <sub>etanol residual</sub>	0,100	0,5	
	Resfriamento do Caldo	30 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> <sub>etanol</sub>	1,250	5,6	
	Preparo do pé-de-cuba	0,010 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> <sub>etanol</sub>	0,001	0,0	
	Lavagem gases CO <sub>2</sub> fermentação	1,5 a 3,6 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> <sub>etanol</sub>	0,015	0,1	
	Resfriamento de dornas	60 a 80 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> <sub>etanol</sub>	3,000	13,6	
<b>Subtotal</b>			<b>4,366</b>	<b>19,7</b>	
Destilaria <sup>(*)</sup>	Aquecimento (vapor)	3,5 a 5 kg/m <sup>3</sup> <sub>etanol</sub>	0,360	1,6	
	Resfriamento dos condensadores	80 a 120 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> <sub>etanol</sub>	3,500	15,8	
<b>Subtotal</b>			<b>3,860</b>	<b>17,4</b>	
Geração de Energia	Produção de vapor direto	400 a 600 kg/t cana total	0,500	2,3	
	Dessuperaquecimento	0,030 L/kg vapor	0,015	0,1	
	Lavagem de gases da caldeira	2,0 m <sup>3</sup> /t vapor	1,000	4,5	
	Limpeza dos cinzeiros	0,500 m <sup>3</sup> /t vapor	0,250	1,1	
	Resfriamento óleo e ar dos turbogeradores	15 L/kW	0,500	2,3	
	Água torres de condensação <sup>(*)</sup>	38 m <sup>3</sup> /t vapor	6,0 <sup>(*)</sup>	27,1	
<b>Subtotal</b>			<b>2,265</b>	<b>10,2</b>	
Outros	Limpeza pisos e equipamentos	0,050 m <sup>3</sup> /t cana total	0,050	0,2	
	Uso potável	70 L/funcionário.dia	0,030	0,1	
<b>Subtotal</b>			<b>0,080</b>	<b>0,4</b>	
<b>Total</b>			<b>22,126</b>	<b>100</b>	

Segundo ALMEIDA e SANTOS (2003) entende-se por reuso a utilização de águas servidas pós-tratadas para atendimento do processo industrial e a reutilização como sendo o emprego de águas servidas para outras finalidades sem a necessidade de tratamento específico. Desta forma, a racionalização do uso da água numa indústria como a sucroenergética requer um profundo conhecimento dos processos e dos parâmetros (qualitativos e quantitativos) envolvidos, e tem como objetivo a redução da captação e do lançamento de efluentes no corpo hídrico do qual a indústria se serve.

Vários são os processos potenciais usuários de água, como o de lavagem da cana, mesmo sendo aos poucos substituído por processos a seco ou parcialmente ou totalmente eliminado em unidades que processam cana picada, obtida através de colheita mecânica. Existem usos também em outros processos como: lavagem de pisos e equipamentos; resfriamentos de mosto, de vinho e de outras correntes de processo, em reposições e descargas excessivas de torres de resfriamento e de caldeiras, em diluições de mosto ou levedo etc.. Algumas dessas operações, por não serem realizadas em circuito fechado, possuem significativa influência no volume total demandado pela unidade, porém, podem representar potenciais pontos no processo de reaproveitamento, o que significa redução de captação.

Em uma unidade de produção de etanol podemos citar como potenciais casos de redução do consumo:

- Lavagem de cana, sendo hoje substituído por sistemas de separação de impurezas a seco;
- Máximo reaproveitamento dos condensados limpos (de vapor de escape das turbinas);
- Reaproveitamento da água de lavagem das correntes e taliscas (nas esteiras de cana desfibrada, por exemplo – com acompanhamento das possíveis contaminações);
- Otimizar o ciclo de concentração das torres de resfriamento, de forma a minimizar as reposições;
- Utilização de tecnologias que permitam direta ou indiretamente a redução ou o reaproveitamento de água.

Uma tecnologia atualmente empregada em algumas unidades, não diretamente aplicada em função da necessidade de redução de água, mas que indiretamente possui esse benefício, é o sistema de concentração de vinhaça. Esse sistema se dá através de evaporadores em múltiplos efeitos, acoplados ou não ao sistema de destilação, que gera vinhaça evaporada e condensada, que pode ser reaproveitada no processo, seja em diluições, embebições, lavagens etc..

Em relação a outras tecnologias também potenciais de redução hídrica, podemos destacar os Condensadores Evaporativos como substitutos às torres de resfriamento em turbinas de condensação e precipitadores eletrostáticos em substituição às Estações de Lavagem dos Gases de Combustão de caldeira(s). Esse último ainda não aplicado no setor em função de seu elevado investimento inicial, mas que pode surgir nos próximos anos como alternativa viável.

De acordo com o “Manual de Conservação e Reuso de Água na Agroindústria Sucroenergética” (ANA, Agência Nacional de Águas - 2009), a distribuição média dos usos pontuais de água na Indústria Sucroenergética hoje em dia encontra-se conforme mostrado na figura 1 abaixo:

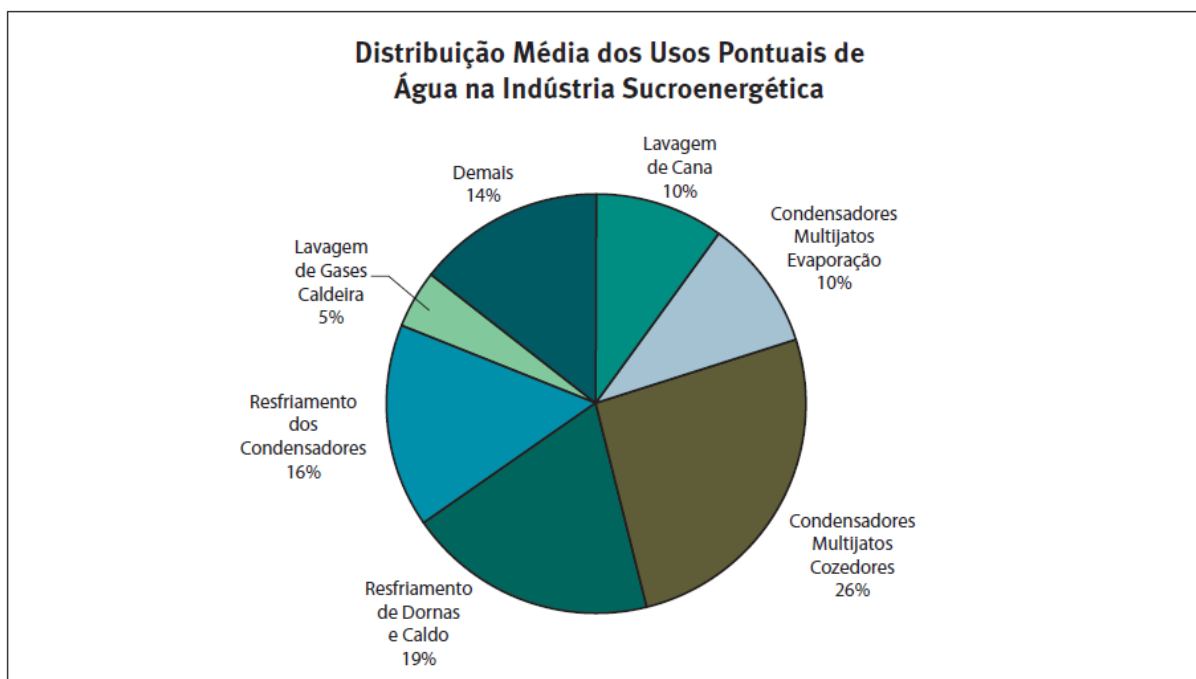


FIGURA 1: DISTRIBUIÇÃO MÉDIA DOS USOS PONTUAIS DE ÁGUA

Observa-se nesse gráfico que, diferentemente do que se imaginava, e era o que acontecia há alguns anos, o percentual do uso na lavagem de cana não está entre os maiores. Segundo Elia Neto (2008), esse uso correspondia a 25% em 1996. Podemos perceber também no gráfico o enorme uso de água em resfriamentos, o que significa maior atenção para aumento do potencial de otimização nos sistemas de resfriamentos, seja através de torres, “sprays-pounds” ou outro.

No caso de uma unidade produtora apenas de etanol, proporcionalmente os maiores percentuais que podemos identificar seriam nos resfriamentos diversos (dornas, mosto e condensadores), lavagens, entre outros.

Portanto, identificando quais seriam as possibilidades de redução do uso e captação de água em uma destilaria autônoma, como poderemos quantificá-las e em que situação?

Uma forma de se obter visualmente um diagnóstico de usos e possibilidades de reduções é através do balanço de massa de água ou simplesmente, do balanço hídrico. É uma ferramenta fundamental como início do processo de maximização do uso e reuso, identificando onde podemos atuar na redução, seja no processo ou no tipo de equipamento. Certamente, para se produzir o balanço hídrico, é necessário que se conheça primeiro o processo e as premissas (em caso de novo projeto) ou dados históricos de boletins (unidade existente) para se construir os balanços mássicos e energéticos da planta, que são as fontes de informações das necessidades hídricas em cada circuito.

Esse trabalho buscou estudar alguns anexos em uma destilaria convencional a partir de três parâmetros:

- Ciclo de concentração das torres de resfriamento;
- Lavagem de cana;
- Concentração de vinhaça.

Considerou-se inicialmente um anexo de uma unidade com 100% de cana inteira e com lavagem, sem concentrar a vinhaça e com todas suas torres de resfriamento trabalhando com baixa concentração de impurezas, ou seja, elevado consumo de água de reposição. Anexos variando estas 3 variáveis foram realizados no sentido da redução do consumo inicial identificado. A partir dos cálculos e do diagrama hídrico obtido em cada anexo, o consumo específico ( $m^3$  água bruta / t

cana) foi analisado e algumas conclusões e sugestões foram feitas. Como qualquer tecnologia nova, o investimento inicial desses equipamentos mencionados tende a ser elevado e a garantia de eficiência incerta, porém são caminhos normalmente sem volta, por possuírem objetivos com relevância elevada. Não foram abordados nesse trabalho os aspectos econômicos da aplicação das tecnologias existentes e citadas no trabalho

Este trabalho está dividido em seis capítulos, da seguinte forma:

- Introdução / objetivos;
- Revisão Bibliográfica: definição dos conceitos teóricos sobre sistema de resfriamento, processo de produção de etanol de cana, limpeza de cana, vinhaça e a tecnologia de concentração de vinhaça;
- Materiais e Métodos: caracterização do processo, premissas hídricas e os anexos estudados da unidade produtora de etanol;
- Resultados e Discussões: apresentação, avaliação e comparação dos resultados obtidos em cada caso estudado;
- Conclusões: a respeito dos resultados obtidos;
- Sugestões: para futuros trabalhos.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ETANOL

A figura 2 mostra o diagrama de blocos do processo de produção de etanol com as eficiências esperada (típicas) global e em cada etapa:

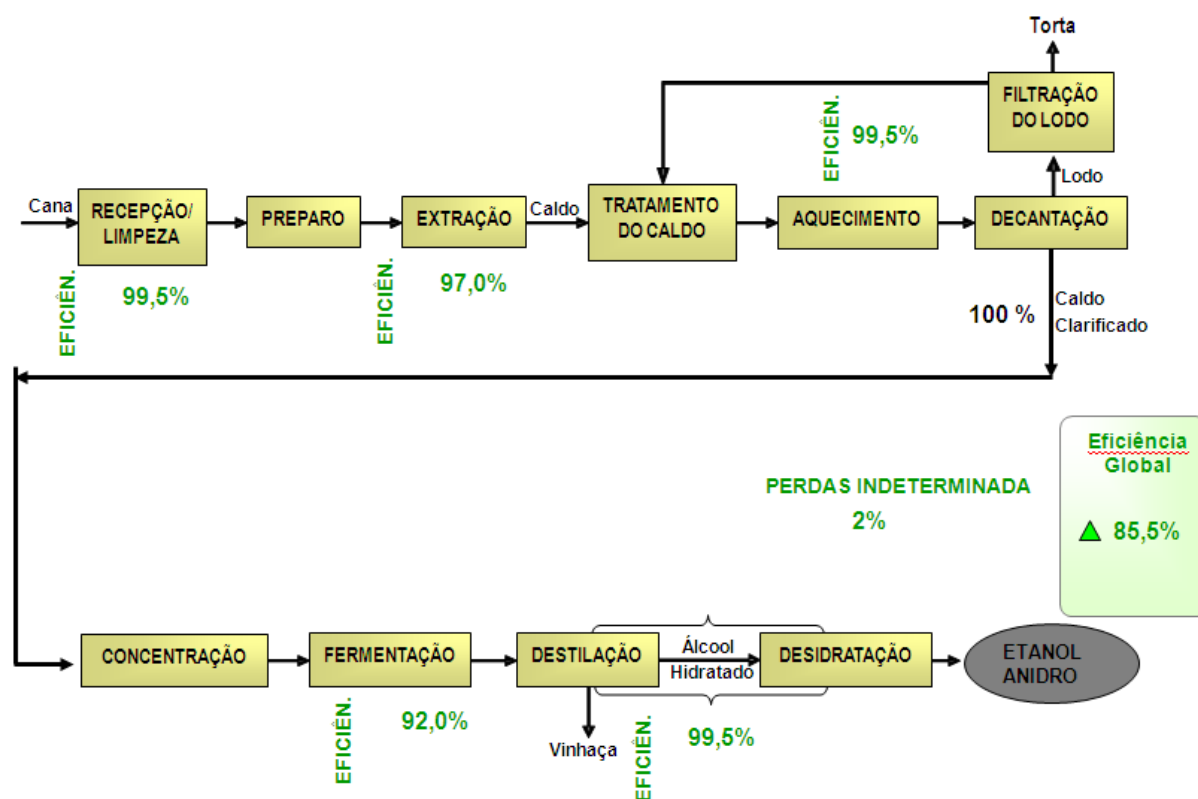


FIGURA 2: DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ETANOL DE CANA

A seguir uma descrição simplificada de cada etapa do processo de produção de etanol de cana.

#### 2.1.1 RECEPÇÃO DE CANA

A cana que chega à unidade, nas plantas mais modernas, é armazenada em carretas no pátio de cana. Posteriormente, a matéria-prima é então conduzida para a balança de recepção de cana, na unidade industrial, por um trator “escravo”. A carga é pesada, permitindo assim obter o controle agrícola e de moagem.

A carreta, então, é diretamente descarregada em mesas de alimentação de cana por meio de um hilo mecânico. O sistema de alimentação de

cana é composto por mesa(s), normalmente de 45°, e de 10 a 12 metros de comprimento.

As mesas alimentadoras de 45° despejam a matéria-prima em uma esteira metálica, cuja função é conduzir esta matéria-prima ao sistema de preparo de cana.

Na mesa alimentadora geralmente ocorre a separação das impurezas que vem com a cana. Dependendo do tipo de cana que chega à unidade, o sistema de separação de impurezas é diferente, conforme descrito abaixo:

➤ Cana Picada: Prevê-se sistema limpeza a seco (ventiladores), para retirar parte das matérias estranhas (terra e areia) e obter um caldo de melhor qualidade e evitar desgaste excessivo de equipamentos. Além disso, pode significar uma diminuição do consumo de água e conseqüente redução do volume de efluente a ser tratado. Não há perda de sacarose nesse sistema;

➤ Lavagem de cana inteira: cana colhida manualmente; limpeza mais adequada quando recebida cana úmida após dia chuvoso; há perda de até 2% da sacarose.

Aleatoriamente, após a pesagem, uma carreta é conduzida até a parte externa do laboratório de PCTS (Pagamento de Cana), onde uma sonda oblíqua, coleta amostras da matéria-prima para análises. Este procedimento é importante porque, através destas análises, podem-se determinar as características da matéria-prima.

Também é através destas análises que se realiza o pagamento para os fornecedores de cana.

### **2.1.2 PREPARO DE CANA E EXTRAÇÃO DO CALDO**

O setor de preparo de cana é normalmente composto por picador de facas oscilantes, desfibrador de martelos oscilantes, nivelador e eletroímã. O acionamento do preparo de cana é realizado por motores elétricos ou turbinas a vapor (unidades mais antigas).

Após passar pelo preparo de cana, a matéria-prima é encaminhada para o setor de Extração de Caldo.

A extração dos sólidos da cana é feita, na maioria das unidades existentes, pelo esmagamento nos rolos das moendas que exercem forte pressão.

As moendas separam água e sólidos da fibra, que formará o bagaço. A sacarose está dissolvida no caldo, portanto, o objetivo da moagem é extrair a maior quantidade possível de sólidos da cana.

Um ponto fundamental no processo para se conseguir tal objetivo na extração do caldo é o sistema de embebição. É de grande importância a embebição, como fator de incremento do nível de extração pela substituição do caldo absoluto que ficaria retido no bagaço final por um caldo diluído através da água adicionada ao sistema.

A eficiência do sistema de embebição exige que tenhamos uma vazão regular constante dos caldos de embebição bem como uma distribuição uniforme em relação ao fluxo de bagaço, a fim de conseguirmos a mistura mais homogênea possível. Também é importante o nível de preparo do bagaço, isto é, cana / bagaço com altos níveis de células abertas facilitam a interação caldo/bagaço. Essa abertura de células é conseguida na preparação da cana, após o desfibrador e esse acompanhamento da eficiência do preparo é realizado através da análise em laboratório denominada “open cell” ou “índice de preparo (I.P.)”. Valores de I.P.  $\geq$  85% para moendas são considerados satisfatório, enquanto que, para difusor, esse índice deverá ser próximo de 92%.

Geralmente, a embebição utilizada nas Usinas de Açúcar e Etanol é do tipo composta e pressurizada com uma vazão de água de embebição de:

$$\text{Emb.} = 230 \times (\text{fibra}\% \text{cana}) / 100$$

A embebição pressurizada tem o princípio básico de injetar água à pressão elevada e a uma temperatura adequada (de 50°C a 70°C), com o objetivo de melhorar a penetração do líquido ao longo da espessura da camada de bagaço.

Há unidades existentes que fazem a extração de caldo através de difusores. Como características desse equipamento, podemos destacar:

- Extraem caldo pelo princípio de difusão e lixiviação (97-98%). As moendas extraem o caldo por pressão e com uma eficiência menor (96-97%);
- Desgastam-se menos e têm custo de manutenção inferior às moendas;

- Gera bagaço com granulometria maior devido a não dilaceração das fibras (que ocorre na moagem). Caldo com menos impurezas minerais, porém essas impurezas ficam no bagaço que vai para caldeira;

### 2.1.3 TRATAMENTO DE CALDO

Após passar pelo setor de extração, o caldo misto é bombeado para uma peneira rotativa, cuja função é retirar as impurezas mais grosseiras do caldo (tratamento físico). Posteriormente, o caldo é bombeado para um tanque de caldo misto. Este tanque serve como pulmão para o setor de tratamento de caldo.

O Tratamento do caldo é necessário porque impurezas menores (solúveis, insolúveis ou coloidais) não são removidas apenas com a utilização de peneiras. É preciso realizar uma série de procedimentos, físico-químicos e químicos, no intuito de coagular estas impurezas, de maneira que a decantação possa separá-las.

Primeiramente processa-se a calagem, isto é, adição de leite de cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) no caldo misto, para correção do pH deste caldo (pH entre 6,6 e 6,8 para caldos destinados à fermentação). Poderá haver a necessidade de adição de ácido fosfórico, de forma a complementar, se a cana processada for deficiente em  $\text{P}_2\text{O}_5$ , agente coagulante.

Esta adição permite que ocorra a coagulação (redução da força eletrostática de repulsão existente entre as partículas e o meio), floculação (formação de partículas maiores) dos coloides (gorduras, ceras, gomas e graxas) e posterior decantação devido à sua maior densidade. O controle do processo se dá pelo ajuste do pH.

A calagem é realizada normalmente em linha, antes da troca térmica (regeneração) do caldo misto com o caldo proveniente da evaporação.

O caldo após a calagem, “dosado”, é bombeado a o regenerador a placas, onde é aquecido até cerca de 60 °C com o calor do caldo pré- evaporado ou evaporado. Esta regeneração tem o intuito de tornar a planta mais econômica energeticamente, uma vez que será necessário menor quantidade de vapor para aquecer o caldo na etapa seguinte.

Após trocar calor com o caldo evaporado, o caldo misto passa por aquecedores verticais tubulares em série, sendo que o aquecimento nos primeiros

se dá com vapor vegetal 2, no caso de 2 efeitos de evaporação e nos demais com vapor vegetal 1. Se a unidade tiver apenas 1 efeito de evaporação, normalmente todo o aquecimento se dá com vapor vegetal 1 ou, em último caso, com vapor de escape. A temperatura do caldo na saída dos aquecedores deverá ser de 105°C.

O aquecimento do caldo até 105 °C é importante porque acelera as reações químicas, promove a coagulação das proteínas, diminui a densidade e viscosidade do caldo, auxilia na floculação do lodo e diminui o desenvolvimento de bactérias.

Este aquecimento visa essencialmente aumentar a eficiência do processo de decantação e promover a posterior retirada de gases “incondensáveis”.

O caldo aquecido segue para o “*flasheamento*”. A finalidade básica de um balão de “*flash*” é garantir a máxima remoção do ar presente no caldo, através do aquecimento à 105°C e posterior expansão à pressão atmosférica, visando com isto melhorar o processo de decantação.

O caldo, após sofrer o “*flasheamento*”, é conduzido, por gravidade, para a etapa de decantação. É dosado, na linha de caldo, polímero na entrada do decantador para auxiliar o processo de sedimentação das partículas.

A decantação, também chamada de clarificação, é a etapa de purificação do caldo pela remoção das impurezas floculadas nos tratamentos anteriores, através da sedimentação destas partículas.

O caldo clarificado, com temperatura média de 95°C, é enviado a turbo filtros, ou peneiras, para a retirada de pequenas partículas em suspensão no caldo, que não foram eliminadas durante a decantação.

Posteriormente, o caldo clarificado é armazenado em um tanque, sendo então bombeado para o setor de concentração de caldo.

O lodo, proveniente da decantação, é bombeado para os filtros de lodo tipo rotativo à vácuo ou tipo prensa desaguadora. Este processo tem o objetivo de recuperar ao máximo os açúcares presentes no lodo, através da lavagem e filtração do mesmo.

É incorporado bagacilho ao lodo, para melhorar a filtrabilidade nos filtros. Este bagacilho é conduzido da caldeira até o tanque de lodo normalmente através de um sistema de transporte pneumático.

O caldo filtrado retorna para o processo no tanque pulmão de caldo misto e a torta de filtro é misturada à fuligem (proveniente das chaminés da caldeira). Esta mistura é coletada em uma moega, e posteriormente encaminhada para o processo de compostagem.

Parte da água utilizada para a lavagem das telas dos filtros prensa pode ser utilizada na embebição da moenda em função dos açúcares nela contida, e o restante é descartado em canaletas como água residual.

A água residual normalmente é incorporada à vinhaça resfriada, sendo então utilizada pela agrícola no processo de fertirrigação dos canaviais.

#### **2.1.4 CONCENTRAÇÃO DO CALDO**

Antes de iniciar o processo de concentração, é necessário elevar a temperatura do caldo até 115°C. Se a temperatura de alimentação no pré-evaporador for inferior a 115°C parte de sua superfície disponível será destinada a aquecer o caldo até 115°C e posteriormente evaporar.

A Unidade deverá possuir um pré-aquecedor, onde o caldo clarificado é aquecido indiretamente por vapor (escape ou vegetal 1), até a temperatura de 115°C. O caldo pré-aquecido é encaminhado ao sistema de evaporação, que em unidades que produzem apenas etanol, se dá através de um ou dois efeitos.

A função do pré-evaporador (1º efeito) e do evaporador (2º efeito) é promover a evaporação da água contida no caldo clarificado e gerar maior quantidade possível de vapor vegetal, resultando um caldo mais concentrado.

O vapor utilizado no pré-evaporador é o vapor de escape, com pressão de 2,5 bar (a) e aproximadamente 130°C de temperatura. O condensado deste vapor é armazenado em um tanque, e posteriormente retorna para o desaerador da caldeira.

O vapor vegetal gerado possui pressão de 1,7 bar (a) e temperatura de aproximadamente 117°C. Este vapor será utilizado para o evaporador, e sangrado para a destilaria (Colunas A e B), os aquecedores verticais tubulares e também no pré-aquecedor a placas, se for o caso.

O caldo pré-evaporado é bombeado a um evaporador, caso a unidade possua 2 efeitos. Neste efeito, é utilizado o vapor vegetal gerado na pré-evaporação para concentrar o caldo até cerca de 20 °Brix.

O vapor vegetal 2 gerado na evaporação, com pressão de 0,8 a 1,0 bar (a) e aproximadamente 105°C de temperatura, é utilizado normalmente nos aquecedores verticais tubulares (primeiro aquecimento).

É importante concentrar o caldo em torno de 20 a 22 °Brix, pois favorece a fermentação e possibilita trabalhar na destilaria com um teor alcoólico do vinho mais elevado.

## **2.1.5 FERMENTAÇÃO**

### **2.1.5.1 PREPARO E RESFRIAMENTO DO MOSTO**

O caldo pré-evaporado, que em destilaria autônoma, é o mosto que alimentará as dornas de fermentação, tem de ser resfriado até 30-32°C, pois ele chega á fermentação, após trocar calor com o caldo misto, com temperatura de 60°C. Esse resfriamento normalmente se dá através de permutadores a placas com água de resfriamento.

Isto se faz necessário para evitar que a elevação da temperatura venha a afetar o processo de fermentação, possibilitando a proliferação de contaminantes, tornando o meio inadequado para o desenvolvimento do processo, chegando até a prejudicar o rendimento do mesmo.

O mosto deve ser isento de sólidos (bagacilho, areia, terra), com temperatura entre 28°C e 32°C, ter seus nutrientes preservados e contaminação microbiológica menor que 10<sup>2</sup>.

Água tratada pode ser utilizada na diluição do mosto, mas somente em casos esporádicos, nas quais não se tem o volume desejado de caldo.

Os resfriadores de mosto são um dos pontos críticos de contaminação bacteriana na fermentação alcoólica, devido à baixa velocidade e temperatura do mosto.

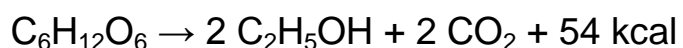
Para remoção destas bactérias somente a limpeza mecânica não é suficiente, é necessário um agente “mantenedor” para que a assepsia seja eficaz.

Para esta limpeza é recomendado à utilização de flegmaça, proveniente da coluna B, devido à sua alta temperatura, baixo custo de instalação e alta eficiência na remoção de bactérias e leveduras das placas dos resfriadores.

### 2.1.5.2 FERMENTAÇÃO

É durante o processo de fermentação que ocorre a transformação dos açúcares em álcool, através dos agentes da fermentação, que são as leveduras.

As leveduras foram os primeiros micro-organismos encontrados capazes de crescer na ausência de oxigênio. Em anaerobiose (ausência de oxigênio) o açúcar é convertido principalmente em álcool e dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), conforme o equacionamento:



A fermentação alcoólica ocorre em tanques fechados de fundo cônico (geralmente 45°) denominados dornas de fermentação.

No processo fermentativo, a conversão dos açúcares disponíveis no caldo em etanol se dá através da seguinte relação:

$$1,0 \text{ kg ART} = 0,6475 \text{ litros de etanol (100\%)} \times \eta$$

Onde  $\eta$  = rendimento fermentativo

No processo fermentativo há perdas e reações paralelas, outros subprodutos gerados, e contaminações que faz com o seu rendimento máximo seja em torno de 92% (média de safra).

Em virtude do calor desprendido no processo de fermentação, necessitamos de um controle de temperatura nas dornas. É recomendado trocadores de calor a placas, mas também é encontrado serpentinas de resfriamento (unidades antigas).

Trocadores de calor a placas apresenta um melhor desempenho no controle de temperatura. Este equipamento é provido de trocadores a placas e bombas de recirculação. Este controle faz-se necessário porque ao fermentar os açúcares do mosto há um desprendimento de energia na forma de calor, que agrega temperatura a solução de levedura + mosto, sendo que a levedura tem uma temperatura ótima de trabalho que se situa entre 28 – 33°C podendo chegar ao máximo em 35°C.



Além dos trocadores de calor, as dornas de fermentação possuem boca de visita, local para coleta de material para análise laboratorial ou microbiológica, coletor de CO<sub>2</sub> e sistema de injeção de antiespumante.

O desprendimento de gás carbônico durante a fermentação arrasta vapores de etanol, por isso é necessário coletar estes vapores e recuperá-los, diminuindo assim as perdas durante o processo.

A coluna de recuperadora de etanol é um equipamento que propicia a lavagem do CO<sub>2</sub> proveniente das dornas para recuperação de parte do álcool arrastado com ele, antes de ir para atmosfera.

As dornas também são equipadas com válvulas diversas para alimentação do mosto, alimentação de levedura, controle de temperatura, entrada de ar comprimido. Nas unidades mais modernas, estas válvulas são automatizadas, facilitando o monitoramento e controle do processo.

É recomendado que as dornas sejam dotadas de sistema de lavagem, que irá promover a limpeza e assepsia em seu interior, pois o uso contínuo das mesmas, sem nenhum sistema de limpeza, leva a altas taxas de infecção.

As unidades atualmente utilizam flegmaça para promover esta lavagem. Esta flegmaça é bombeada para as dornas onde será distribuída por “*spray-balls*”, para realização da assepsia.

Outro fator a ser monitorado durante a fermentação para diminuir as perdas, é quanto à formação de espumas durante o processo microbiológico. Recomenda-se adicionar dispersante durante o tratamento do fermento para prevenir a formação de espumas e adicionar antiespumante nas dornas quando há formação excessiva de espuma.

### **2.1.5.3 CENTRIFUGAÇÃO DO VINHO BRUTO**

O principal objetivo desta etapa do processo é separar o levedo do vinho, retornando o levedo ao processo fermentativo nas melhores condições possíveis.

Antes de o vinho bruto ser centrifugado, é importante a realização da filtração do vinho, para evitar que impurezas causem entupimento das centrífugas e também para evitar desgastes excessivos do equipamento, que comprometeria sua eficiência e rendimento.

A separação do levedo, atualmente é realizada por máquinas denominadas separadoras Centrifugas.

A Unidade deverá concentrar o levedo em torno de 70% a 80%, o que ajuda no controle microbiológico da fermentação através da eliminação de bactérias no momento da centrifugação.

O vinho centrifugado é armazenado em tanques denominados dorna volante, que serve de pulmão para os aparelhos de destilação.

#### **2.1.5.4 TRATAMENTO DO FERMENTO**

O levedo concentrado é encaminhado ao sistema de tratamento, denominado pré-fermentação. A pré-fermentação é uma etapa de fundamental importância no processo de fabricação do álcool, pois nesta etapa consegue-se obter uma avaliação das condições das células de levedura e proceder, através destas análises, o tratamento adequado para manter-se a “saúde” da levedura.

Os pré-fermentadores são equipamentos simples, geralmente são tanques fechados (ou não) com sistema de agitação e válvulas de alimentação e descarga bem como sistema para dosagem de produtos químicos.

O volume dos pré-fermentadores deve satisfazer o volume suficiente para suprir a demanda para fermentação bem como o volume do álcool a ser produzido. Normalmente o seu volume corresponde a um terço do da dorna.

O fermento recuperado das centrifugas de vinho é enviado para as cubas de fermentação, onde é tratado com a adição de água tratada e ácido sulfúrico diluído, baixando o pH do fermento entre 2,0 e 2,5.

É necessário trabalhar com o pH baixo do fermento para evitar floculação das leveduras e contaminação bacteriana.

A figura 3 abaixo mostra um fluxograma da fermentação em batelada (Melle-Boinot), típico na maioria das unidades produtoras de etanol no Brasil:

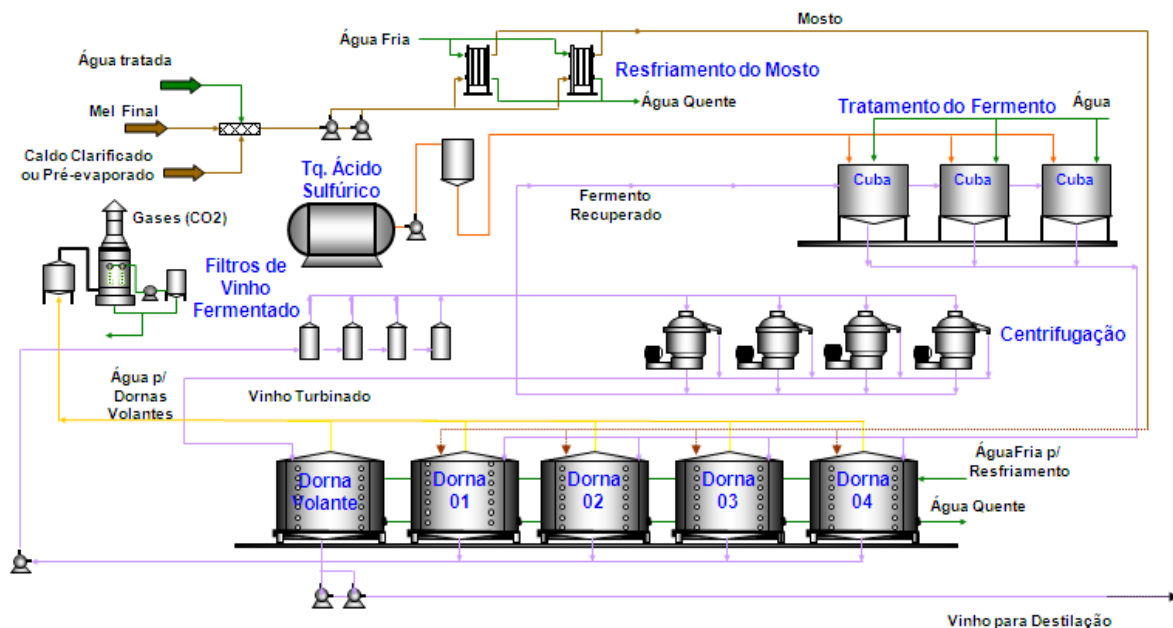


FIGURA 3: FLUXOGRAMA DA FERMENTAÇÃO EM BATELADA (MELLE-BOINOT)

### 2.1.6 DESTILAÇÃO

Destilação é o processo pela qual se vale da diferença do ponto de ebulição para a separação de um ou mais composto de uma mistura. Neste caso, o processo visa separar o etanol de compostos mais e menos voláteis que o acompanham no vinho centrifugado.

O vinho centrifugado, com teor alcoólico entre 7°GL e 11°GL, é bombeado da dorna volante para o setor de destilação, onde é produzido etanol hidratado e anidro.

Na coluna "A", primeira etapa, ocorre a separação de álcool da vinhaça e leves (ésteres e aldeídos, chamados de álcool de 2ª com 92°GL), há a formação de flegma (álcool com graduação alcoólica de 45-50°GL), que será a carga da coluna B, de retificação;

O vinho, carga da 1ª coluna (colunas A), é aquecido com a própria vinhaça que deixa a coluna pelo fundo (a uma proporção de 8 a 15 litros/litro de álcool, dependendo do teor alcoólico do vinho, e com teor alcoólico de 0,01°GL). Vapor vegetal (ou de escape) é utilizado para aquecimento (indireto) da coluna. O consumo de vapor nesse processo (convencional) é de cerca de 3,0 kg/litro de etanol;

Na retificação na 2ª coluna (coluna B) a flegma é concentrada até a graduação de 92,8 INPM e impurezas, alcoóis superiores (amílicos e isoamílicos), chamados também de óleo fúsel, são retiradas lateralmente na coluna B;

No sistema convencional, ocorre alimentação do vapor (vegetal ou escape) para aquecimento da coluna B e flegma é alimentado no fundo da coluna B. Nesse caso, ocorre a produção de flegmaça, que pode ser utilizada para lavagem das dornas (para assepsia) após um ciclo fermentativo, e limpeza de trocadores.

No processo denominado “flegstil”, a flegma é alimentada algumas bandejas acima do fundo da coluna B1 e não há produção de flegmaça. Há retorno de flegmaça para a coluna A. A desvantagem é a diminuição da capacidade da coluna A e aumento da quantidade de vinhaça. A vantagem é o não consumo de vapor na coluna B1 e a despreocupação com possíveis perdas de álcool na base da coluna.

Os condensadores localizados no topo das colunas, para condensar os leves para refluxo e retirada, utilizam água de resfriamento;

### **2.1.7 DESIDRATAÇÃO**

No processo de desidratação azeotrópica, utiliza-se ciclohexano como agente desidratante, onde ocorre a formação de um composto ternário, que possui um PE (Ponto de Ebulição) menor do que qualquer um dos três componentes em separado (63°C). Dessa forma, o álcool anidro, com PE maior sai pelo fundo da coluna com a graduação mínima desejada para especificação de 99,3INPM. O ternário sai pelo topo, passa por condensadores e segue para um decantador, onde o ciclohexano é recuperado diretamente para retornar à coluna C (parte rica, superior) e indiretamente, via coluna P (parte inferior do decantador).

As colunas C e P são aquecidas com vapor de escape.

No processo com Peneira Molecular, as moléculas de água (menores que as de álcool) ficam “presas” na estrutura cristalina do equipamento e o álcool, sem essas moléculas, sai do equipamento praticamente isento de água.

Como vantagens dessa tecnologia, que é a mais utilizada em novos projetos, podemos citar:

- Eliminação de agentes químicos desidratantes (ciclohexano) da destilação tradicional;

- Eliminação de perdas no processo;
- Menor consumo de vapor (30% menos em relação ao processo azeotrópico) e água industrial;
- Álcool Anidro de melhor qualidade (sem traços de hidrocarbonetos).

### **2.1.8 GERAÇÃO DE VAPOR**

Processo termodinâmico onde o combustível (bagaço) é queimado em uma caldeira geradora de vapor (de alta pressão), que alimenta turbinas a vapor, que transforma a energia térmica do vapor em energia mecânica (gerando trabalho) que, por sua vez, é transformada em energia elétrica no gerador acoplado à turbina. O vapor de escape da turbina, parcela da energia do vapor não convertida em energia mecânica, a baixa pressão, é utilizado para alimentar o processo, retornando posteriormente à caldeira na forma de condensado;

O combustível utilizado na caldeira é o bagaço de cana resultante do processo de extração do caldo. A queima do bagaço é realizada em suspensão na caldeira. É importante obter uma umidade do bagaço abaixo de 50% para que não prejudique a queima na caldeira.

O consumo de bagaço, que a 50% de umidade apresenta um poder calorífico de 1800 kcal/kg (7524 kJ/kg), é de aproximadamente 250 kg/TC (se o percentual de fibra na cana = 12,5%).

O retorno de condensado de vapor de escape do processo deve ser o máximo possível ( $\geq 90\%$ ), o que diminui a captação de água de alimentação e os custos de tratamento desta água.

Para reposição de água de alimentação das caldeiras, utiliza-se, como complemento aos condensados retornados, água desmineralizada (por Troca Iônica ou por Osmose Inversa) e polida, de forma a baixar ainda mais o teor de sílica e sólidos totais, devido a elevada pressão da caldeira.;

O desaerador térmico, que tem a função de retirar  $O_2$  dissolvido na alimentação de água para as Caldeiras, recebe toda a água desmineralizada e os condensados retornados do processo para alimentação da caldeira, fechando o ciclo térmico desse processo.

Para os gases de combustão gerados, a caldeira deve possuir

lavadores de gases que captam a fuligem da chaminé através do contato das partículas de fuligem com água, que é circulante. A fuligem coletada é bombeada para um sistema de separação normalmente composto por decantador e filtro. A fuligem recuperada é geralmente mesclada à torta de filtro de lodo e encaminhada ao processo de compostagem. Já se fala atualmente em precipitadores eletrostáticos como uma alternativa a essa tecnologia, pois não utiliza água. O maior obstáculo ainda é o grande investimento inicial necessário.

### 2.1.9 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

As turbinas a vapor, acopladas a geradora de energia elétrica, fazem o papel de geração de energia elétrica para consumo próprio da Planta e excedente para comercialização.

O vapor gerado na turbina de contrapressão/extração, denominado vapor de escape, possui pressão de 2,5 bar (a) e temperatura de 130°C. Esse vapor é utilizado na evaporação do caldo e, em alguns casos, na destilaria e nos aquecedores.

A figura 4 abaixo ilustra, de forma simplificada, o circuito termoelétrico de uma unidade sucroenergética:

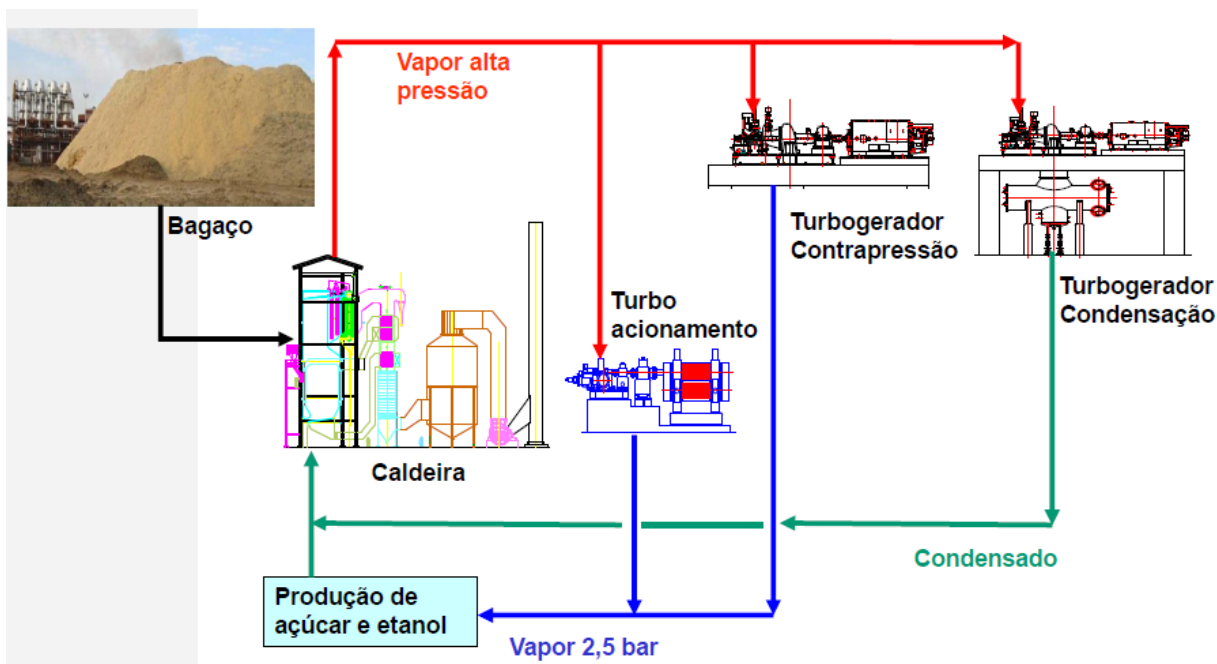


FIGURA 4: CICLO TÉRMICO DE UMA UNIDADE SUCROENERGÉTICA

## 2.2 SISTEMAS DE RESFRIAMENTO

Em muitos processos industriais, durante o funcionamento de certas máquinas ou dispositivos, desenvolve-se certa quantidade indesejada de calor, que deve ser dissipado para não causar a degradação dos óleos lubrificantes ou a perda da especificação de determinados produtos.

O produto utilizado para dissipar o calor é a água, porém, dependendo das condições do processo, a água terá que sofrer algum tipo de tratamento, a fim de evitar o ataque aos equipamentos como também para manter a eficiência do processo.

Os sistemas de Resfriamento são classificados como diretos ou indiretos. Os primeiros representam aqueles casos mais raros onde a água é aspergida diretamente sobre o objeto a ser resfriado (alguns processos siderúrgicos, por ex.). Os indiretos são aqueles nos quais o resfriamento se dá através de permutadores de calor, com a água atuando como fluido refrigerante. .

### 2.2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE RESFRIAMENTO

De acordo com Dantas (1989), basicamente, os sistemas indiretos de resfriamento a água são classificados em três tipos:

**2.2.1.1 Sistema aberto:** São sistemas em que a água é captada de rios ou do mar, bombeada através dos permutadores de calor ou outros sistemas a serem resfriados e retorna para o corpo receptor. Esse sistema vem sendo combatido pelos riscos de agressão ao meio ambiente através de contaminações provenientes do processo e pela necessidade de tratamento de redução da temperatura da água antes do despejo.

**2.2.1.2 Sistema fechado:** São sistemas onde praticamente não há perda de água, porém, compatíveis com sistemas pequenos, como a refrigeração de máquinas.

**2.2.1.3 Sistema semiaberto ou aberto com circulação:** De acordo com Dantas (1989), este sistema é utilizado quando há pouca disponibilidade hídrica e / ou quando há elevada demanda de água de resfriamento. É utilizado, portanto, quando se deseja, principalmente, economizar água. Em decorrência, algumas

medidas tornam-se necessárias, como:

- Clarificação da água de reposição (alimentação);
- Uso de inibidores de corrosão e de dispersantes;
- Controle microbiológico rígido, a fim de evitar o aparecimento de

pilhas de aeração diferencial e controlar a corrosão microbiológica.

Segundo Trovati (2004), este sistema apresenta um custo inicial elevado, porém resolve o problema de eventual escassez de água, possibilita menor volume de captação e evita o transtorno da poluição térmica. Também pode ser submetido a um tratamento químico adequado, capaz de manter o sistema em condições operacionais satisfatórias e, com isto, podem-se reduzir os custos operacionais do processo.

Alguns exemplos deste sistema são as diversas disposições de torres de resfriamento, condensadores evaporativos e “spray-pounds” (reservatórios onde a água quente é pulverizada e resfriada naturalmente pelo próprio ar que a circunda).

A seguir, na figura 5 o esquema típico do sistema de resfriamento do tipo semiaberto:

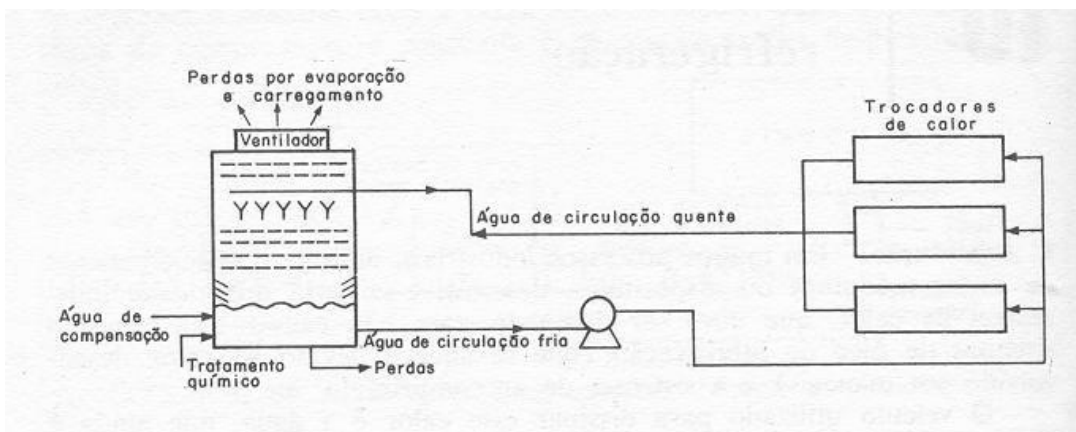


FIGURA 5: SISTEMA DE RESFRIAMENTO ABERTO COM RECIRCULAÇÃO

### 2.2.2 TORRES DE RESFRIAMENTO

As torres de resfriamento são equipamentos utilizados para o resfriamento de água industrial, proveniente de condensadores de usinas de geração de potência, ou de instalações de refrigeração, trocadores de calor etc.. A água aquecida é gotejada na parte superior da torre e desce lentamente através de “enchimentos” de diferentes tipos, em contracorrente (ou em corrente cruzada) com



uma corrente de ar frio (normalmente à temperatura ambiente). No contato direto das correntes de água e ar ocorre evaporação de parte da água, principal fenômeno que produz seu resfriamento.

Uma torre de resfriamento é essencialmente uma coluna de transferência de massa e calor, projetada de forma a permitir uma grande área de contato entre as duas correntes (água – ar).

A água de resfriamento é aquecida nos trocadores de calor do processo e retorna para a parte superior da Torre de Resfriamento. Ao cair através do enchimento da torre, a água é dividida em pequenas gotas.

A queda das gotas ocorre em contracorrente ou em corrente cruzada com o fluxo de ar, que pode ser induzido (por ventiladores localizados no topo das torres), ou forçado (ventiladores na base). Quando em contato com o ar, um fluxo espontâneo de calor (calor sensível) passa desta para o ar frio. O calor predominante na água (calor latente) é transferido por evaporação, e como consequência, ocorre uma queda em sua temperatura. A água resfriada chega então, à bacia de água fria, de onde é novamente bombeada para os trocadores de calor (Mello – 2008).

A figura 6 abaixo mostra a representação de uma torre de resfriamento.

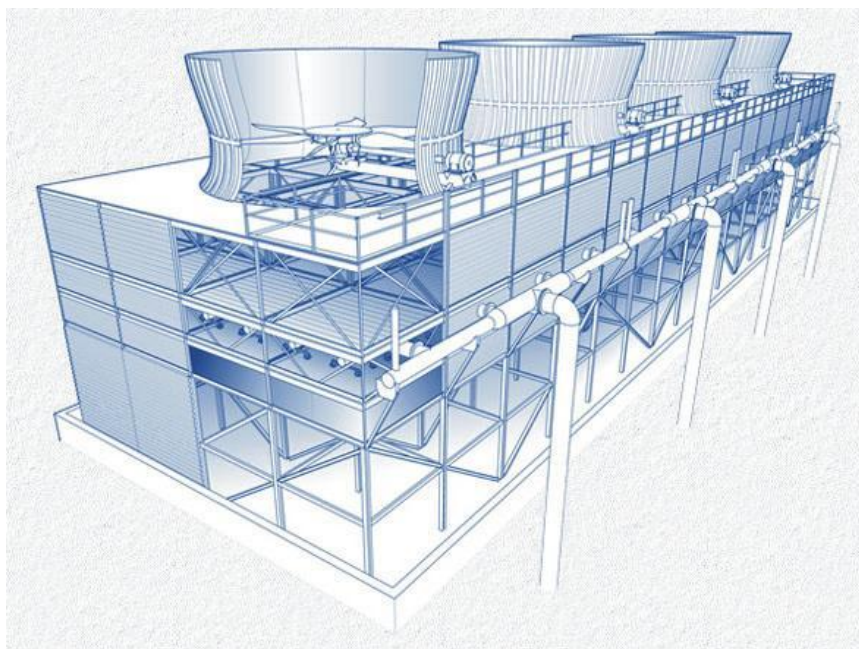


FIGURA 6: REPRESENTAÇÃO – TORRE DE RESFRIAMENTO (FONTE: BRANCO,J. – 2004)

Há dois modos principais para se caracterizar uma torre de resfriamento, conforme o tipo de tiragem ou conforme as direções dos fluxos de ar e água (Mansur – 2004).

- Conforme o tipo de tiragem:
  - Tiragem natural;
  - Tiragem mecânica, que pode ser induzida ou forçada.
- Conforme as direções dos fluxos de ar e água:
  - Contra corrente;
  - Correntes cruzadas.

### 2.2.3 ÁGUA DE RESFRIAMENTO

A maior parte das águas de resfriamento tem caráter corrosivo e contêm ingredientes que podem, em determinadas condições, causar problemas de incrustação. As incrustações trazem alguns problemas ao processo, sendo os mais comuns, a corrosão “sob depósitos”, perda de eficiência nos trocadores de calor e obstrução de linhas.

Essas águas, como já mencionado no item 2.1.1.3, devem e recebem tratamento químico adequado no sentido de evitar a formação de depósitos, inibir a corrosão dos equipamentos e a formação de colônias de microrganismos.

De acordo com o Manual Kurita (1999), os problemas que ocorrem em sistemas de resfriamento são:

- **Corrosão:** É a tendência natural dos metais retornarem ao seu estado mais estável, ou seja, na forma de óxidos e sais;
- **Incrustação:** É o aparecimento de depósitos nos circuitos devido aos sólidos em suspensão, sais dissolvidos e características dos sistemas;
- **“Slime”** (biofloculação): Trata-se do desenvolvimento de microrganismos e formação de depósitos de origem orgânica.

A figura 7 abaixo (Kurita -1999) mostra as principais consequências ocasionadas pelos três parâmetros:

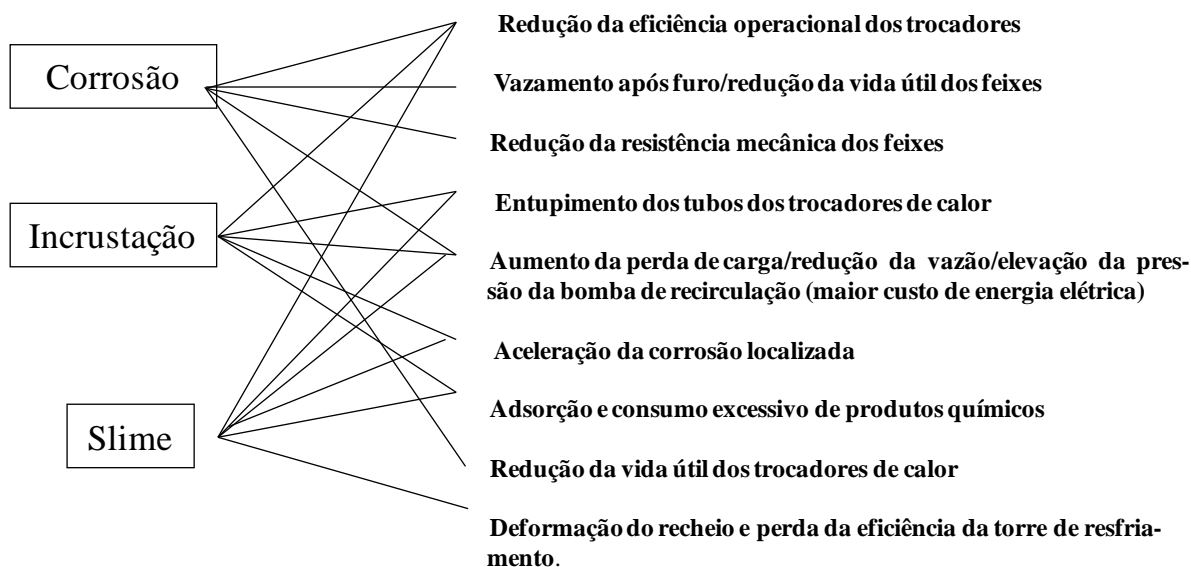


FIGURA 7: PROBLEMAS EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO (FONTE: KURITA - 1999)

A forma de se combater esses problemas é através da adição de agentes químicos inibidores de corrosão, inibidores de incrustação (é um agente dispersante) e biocidas.

Os produtos mais comumente utilizados em unidades industriais são:

- Fosfato e zinco – formam o filme de fosfato de zinco sobre o metal inibindo a formação de pilhas e o surgimento de processos de corrosão;
- Dispersantes inorgânicos – têm a finalidade de promover a distribuição igualitária do fosfato de zinco por todo o sistema evitando seu depósito e a formação de depósitos de materiais inorgânicos, principalmente em pontos de baixa velocidade;
- Dispersantes Orgânicos – utilizados quando ocorre alguma contaminação por hidrocarbonetos na água de refrigeração, sua ação de detergente remove os hidrocarbonetos das paredes dos equipamentos e permite, que através da purga do sistema, esses sejam eliminados do processo;
- Cloro ou hipoclorito de sódio – agente biocida oxidante que tem a função de oxidar a matéria orgânica evitando a formação de colônias de microrganismos.

#### **2.2.4 REPOSIÇÃO EM TORRES DE RESFRIAMENTO**

A água utilizada na reposição em torres de resfriamento normalmente é uma água proveniente do processo de clarificação, com redução, a níveis aceitáveis, dos sólidos suspensos da água bruta obtida na fonte. É comumente denominada no setor sucroenergético como água “tratada” ou “filtrada”.

Pode-se definir clarificação como sendo a remoção da matéria finamente dividida e em suspensão em uma determinada água. Quando necessária, é o primeiro passo a ser dado nos tratamentos convencionais de água. Parte da matéria insolúvel na água sedimenta com relativa facilidade, porém a matéria mais finamente dividida é mantida em suspensão. Essas são mantidas em suspensão, pelo fato de possuírem cargas elétricas negativas que se repelem. Para se efetuar a clarificação de uma água é imprescindível a neutralização das cargas negativas da matéria em suspensão e a aglutinação dessas partículas para que se tornem maiores e mais pesadas e possam sedimentar-se.

A coagulação é a primeira etapa no processo da clarificação, que é referente à reação dos coagulantes com a alcalinidade natural ou adicionada. Os tipos mais comuns de coagulantes utilizados em estações de tratamento de água são: sulfato de alumínio, sulfato ferroso e sulfato férrico. Estes coagulantes reagem com a alcalinidade natural presente na água ou adicionada (quando necessária), formando, hidróxido de alumínio e hidróxido de ferro. Os hidróxidos formados possuem cargas superficiais positivas.

A floculação é a segunda etapa do processo da clarificação, na qual o hidróxido formado pela reação entre o coagulante e a alcalinidade natural, ou adicionada, neutraliza a carga negativa dos colóides em suspensão, formando os flocos.

A sedimentação é a última etapa no processo da clarificação, onde os flocos formados ganham volume e peso, precipitam, deixando a água praticamente isenta de turbidez.

A água de reposição, clarificada, é utilizada para compensar a água perdida nos sistemas (Dantas – 1989).

### 2.2.5 BALANÇOS DE MASSA - CICLOS DE CONCENTRAÇÃO

Com a evaporação da água no sistema de resfriamento, há a necessidade de reposição da mesma. Além disso, a evaporação causa aumento na concentração de sais dissolvidos e, por isso, deve-se proceder com um regime adequado de descargas a fim de evitar uma concentração excessiva dos mesmos. Ao entrarem em contato com o fluxo de ar, pequenas gotículas de água são arrastadas pelo mesmo e também causam perda de água do sistema. Finalmente, existem outras perdas indeterminadas de líquido, tais como vazamentos, outros usos etc. (Trovati - 2004).

Esquemáticamente, um sistema de resfriamento pode ser representado pela seguinte ilustração (figura 8):

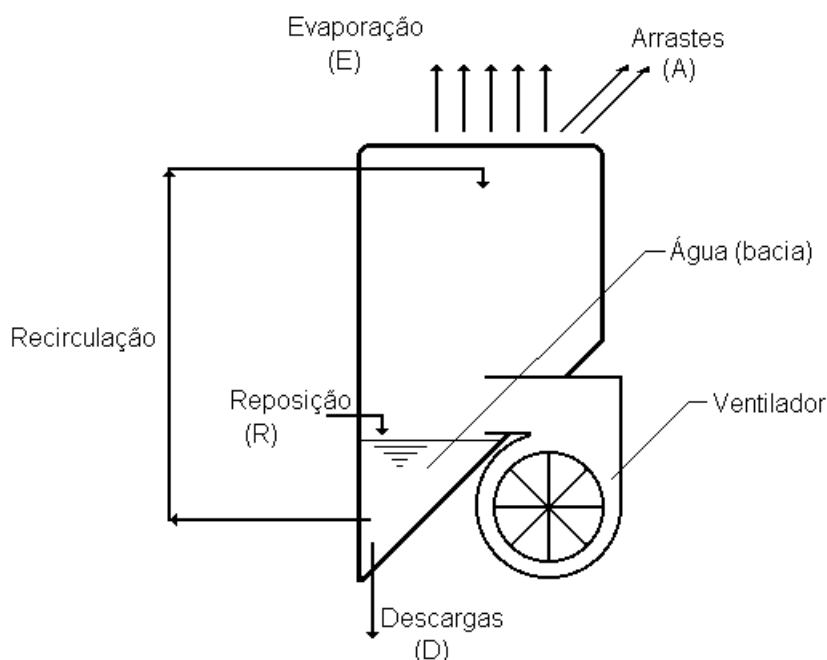


FIGURA 8: BALANÇO HÍDRICO EM UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO (FONTE: TROVATI - 2004).

Fazendo-se um balanço material em um sistema de resfriamento, pode-se definir a seguinte equação, que define a água de reposição como:

$$R = E + A + D$$

Onde, em m<sup>3</sup>/h, temos:

R = Reposição;

E = Evaporação;

A = Arrastes ou respingos;

D = Descargas ou Purga;

A+D = Dt = Descarga ou Purga Total

A quantidade de vezes em que a água se concentra no um sistema aberto com recirculação é denominado “Ciclo de Concentração”. Através do balanço de algum componente “X”, podemos chegar à equação abaixo:

$$R [X] = E \overset{0}{\cancel{[X]}} + (A+D) \overset{Dt}{\cancel{[X]}}$$

Como a concentração do componente “X” na evaporação é zero, teremos:

$$R [X] = (Dt)[X].$$

A relação reposição R / Descarga Total (Dt) é chamado de ciclo de concentração.

$$CC = R / (Dt)$$

Sendo  $R = Dt + E$

$$Dt = E / (CC - 1)$$

De acordo com as equações acima, verificamos que com o aumento da evaporação da água (E), maior é o Ciclo de Concentração do sistema. Por outro lado, com o aumento da descarga total (Dt), percebemos uma diminuição nos ciclos. Assim, as descargas são utilizadas para manter a água de resfriamento em níveis aceitáveis de concentração de sais.

Se o calor retirado da água para a sua evaporação é o calor necessário para o seu resfriamento na torre, a vazão de água evaporada pode ser calculada através da equação abaixo:

$$E = \Delta T \times Q \times C_p / H_L$$

onde

E = Evaporação, em m<sup>3</sup>/h;

$\Delta T$  = Diferença de temperatura na chegada e na saída da torre, em °C

Q = Vazão de água do sistema (circulante), em m<sup>3</sup>/h

$H_L$  = Calor Latente de Evaporação (578 Kcal/ Kg a 40°C);

$C_p$  = Calor Específico da água (0,998 Kcal/ Kg °C a 40°C)

Observação: Na maior parte dos casos, não se consegue facilmente obter os ciclos de concentração através de medições e cálculos das vazões das correntes de reposição, descarga, arrastes e evaporação. Nesses casos, costumam-se calcular, para um sistema de resfriamento, o ciclo através das relações de concentração entre a água do sistema (circulante) e a água de reposição de algum componente (sal dissolvido) estável, como sílica, cálcio, cloreto etc.. No caso específico da sílica, a equação é:

$$CC = [Si] (\text{sistema}) / [Si] (\text{reposição})$$

Esta equação deve ser usada somente quando se há certeza da estabilidade química deste componente, de sua não precipitação ou, caso de estar incrustado, de sua não dissolução, além da ausência de qualquer interferência externa.

Observação: Para que seja possível concentrar a água de resfriamento, a água de reposição deve ser clarificada (passada pelo processo de decantação e filtração, de forma a retirar a sua turbidez - item 2.1.3). É muito importante que esta água, para permitir o controle da água “purgada” e da redução de captação de água e geração de efluentes, esteja com baixas concentrações de sais e material orgânico, bem como baixos níveis de materiais suspensos e microrganismos.

## **2.3 SEPARAÇÃO DE IMPUREZAS**

### **2.3.1 IMPUREZAS**

Tanto a cana inteira, queimada e colhida manualmente, quanto à cana picada, normalmente não queimada e colhida mecanicamente, trazem impurezas para a unidade industrial, seja ela mineral ou vegetal (principalmente no caso da cana picada).

Segundo Beltrão (2006), as impurezas (“matéria estranha”) podem ser classificadas em Material fibroso (Folhas secas, Ponteiros, Material em

decomposição, Raízes, Cana seca, Mato, capim).

- Terra (Argila, Areia, Barro);
- Rochas (Pedras, Pedregulho);
- Metais

De acordo com Lopes e Borges (2009), a cana inteira, colhida após a queima da palha, é amontoada em “ruas” e carregada por máquinas. Esse processo incorpora terra aos colmos. Quando a colheita é mecanizada, no corte da base da cana ocorre eventualmente o “arrancamento” de raízes que trazem terra agregada. Parte dessa terra é assoprada pela colhedora, e parte continua incorporada aos colmos. Assim, a cana inteira colhida à mão e a cana picada colhida à máquina, vêm acompanhadas de terra.

Dessa forma, dependendo do período (chuvoso ou não), normalmente são esperados teores de impurezas minerais da ordem de 5 a 10 kg / t cana processada, enquanto que, no caso de impurezas vegetais (ponteiro, folhas verdes, folhas secas etc.), de 5 a 12% em relação à cana processada<sup>1</sup> (figura 9).



FIGURA 9: IMPUREZAS NA CANA

As impurezas minerais e vegetais, agregadas à cana-de-açúcar durante as operações de corte e transporte, além de provocarem efeitos negativos

---

<sup>1</sup> Na safra 2012 / 2013 observou-se em algumas unidades picos de impurezas, com percentuais de até 18% (vegetais) e 1,5 a 2% (minerais).



aos processos de fabricação de açúcar e álcool, alteram sua composição e distorcem a avaliação de sua qualidade através do pagamento da cana pelo teor de ATR em vigor. As impurezas da cana-de-açúcar na indústria contribuem para (Albuquerque – 2009):

- Distorção na avaliação e valor da matéria-prima;
- Redução da capacidade de moagem;
- Desgaste de equipamentos;
- Redução do poder calorífico do bagaço;
- Redução da produção de açúcar e álcool.

### **2.3.2 CANA INTEIRA E CANA PICADA**

Avaliando-se as vantagens e as desvantagens de cada um dos dois tipos de cana, podemos destacar:

- Cana Inteira: as perdas na lavagem são menores, porém tem de ser queimada para possibilitar o corte manual;
- Cana Picada: maior capacidade de transporte do canavial para a unidade, maior facilidade de ser limpa a seco e maior uniformidade e densidade de carga no preparo de cana.

### **2.3.3 LAVAGEM DE CANA E LIMPEZA DE CANA A SECO**

#### **2.3.3.1 LAVAGEM DE CANA**

A lavagem de cana realizada nas mesas alimentadoras do setor de recepção de cana de uma unidade produz um efluente com alto teor de sólidos e de matéria orgânica, o que impossibilita o seu lançamento direto em corpos receptores. Dessa forma, é necessário se realizar tratamento, visando atender os padrões de lançamento para evitar a poluição hídrica, e para possibilitar o seu reuso na própria operação de lavagem de cana, já que esse processo se dá em circuito “fechado” (CTC – Centro de Tecnologia Canavieira - 2006).

É importante destacar que a lavagem só é recomendada para a cana inteira, em função das menores perdas de açúcares, e porque esse tipo de cana traz quantidades significativas de impurezas minerais para a unidade. Na operação agrícola de carregamento mecânico para transporte à usina, agrega-se mais terra, havendo necessidade de sua retirada (através da lavagem) para diminuir o

desgaste em equipamentos (moendas, bombas, ventiladores e outros), sobrecarga no tratamento de caldo (excesso de lodo), além de contaminação que prejudica a eficiência do processo.

No caso de cana picada (colheita mecânica de cana sem queimar) não é recomendável à lavagem de cana. A impureza mineral é normalmente menor, pois não há contato com o solo (é enviada diretamente ao caminhão), muito embora possa haver carregamento de terra devido ao corte de base da colhedora que esteja desregulado, desnivelamento do solo ou outra condição. De qualquer forma, a cana picada não deve ser lavada, principalmente pela grande perda de açúcar que provocaria esta operação na cana picada, sendo neste caso, a retirada de impurezas realizada num sistema de limpeza a seco.

Na operação de lavagem da cana, a água de lavagem percorre transversalmente o colchão de cana, arrastando assim as impurezas minerais. Nesta lavagem também há arraste de açúcares (face cortada, esmagamentos e exsudação da cana), representando perdas de processo e conferindo ao despejo uma alta carga orgânica (CTC – Centro de Tecnologia Canavieira - 2006).

O efluente em seguida é enviado para o sistema de tratamento, num sistema fechado de recirculação onde se tem o tratamento em decantadores circulares. Neste processo de reuso, há necessidade da manutenção do pH básico da água em recirculação para evitar a sua degradação e consequentemente corrosão dos equipamentos. Normalmente cal é utilizada para esse fim (CTC – Centro de Tecnologia Canavieira - 2006).

### **2.3.3.2 LIMPEZA DE CANA A SECO**

O sistema de limpeza de cana a seco separa impurezas vegetais e minerais da cana e possibilita que se use a palha como combustível das caldeiras. Com o aumento da mecanização da colheita de cana e a diminuição da prática de queima prévia da palha dos canaviais, cresce significativamente a quantidade de palha (folhas, ponteiros e frações de colmos e raízes) que vai para as indústrias. E a quantidade de resíduos minerais que acompanham a cana crua também é significativa. Para evitar grandes perdas de sacarose no processo industrial, é preciso separar essas impurezas e isso pode ser feito através do sistema de limpeza a seco, instalado logo no descarregamento de cana na entrada da usina.

Trata-se de uma solução já praticada em algumas unidades e algumas delas separam e mandam para a lavoura a palha e a terra recolhida. Já outras separam a palha da terra e passam-na pela moenda. Outras recuperam a palha, trituram-na e a reaproveitam como combustível suplementar para as caldeiras de bagaço, possibilitando um aumento de geração de energia excedente, que pode ser vendida.

Este sistema possui um rendimento operacional na faixa de 50 a até 75%, proporcionando um caldo mais limpo e conseqüentemente um maior rendimento para os sistemas de decantação e fermentação.

## **2.4 CONCENTRAÇÃO DE VINHAÇA**

### **2.4.1 VINHAÇA**

Resíduo da destilação de uma solução alcoólica (vinho) obtida no processo de fermentação de uma solução açucarada (mosto). Este mosto pode ser composto por caldo de cana, melaço e água, ou pela mistura destes.

Este efluente pode ser também denominado como vinhoto ou restilo. Sua produção varia de acordo com os processos de fabricação, mas em geral, para cada litro de etanol produzido são gerados entre 10 e 15 litros de vinhaça, dependendo do teor alcoólico do vinho alimentado. Este resíduo possui um altíssimo potencial poluidor das águas superficiais (possui elevado teor de matéria orgânica, o que impossibilita seu lançamento diretamente no corpo receptor). Possui também concentração de sais (potássio, principalmente) que podem ser lixiviados e contaminar as águas subterrâneas.

De acordo com Pinto (1999), A composição da vinhaça depende de uma série de fatores enumerados a seguir:

- Natureza e composição da matéria-prima (se mosto é de melaço ou não, se o melaço é diluído em água ou caldo, ou ainda se o mosto é proveniente de caldo puro).
- Natureza e composição dos vinhos;
- Sistema de fermentação;
- Aditivos utilizados na fermentação, produtos químicos, ácidos, antibióticos e nutrientes à base de nitrogênio e fósforo;
- Tipos de aparelhos utilizados na destilação;

- Linhagem de levedura utilizada;
- Qualidade da água usada;
- Sistema de trabalho e influência dos operadores.

Abaixo a tabela 2 com a caracterização média da vinhaça (Elia Neto - 2008):

TABELA 2: CARACTERIZAÇÃO DA VINHAÇA (MÉDIA) (FONTE: ELIA NETO, 2008)

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>pH</b>	<b>4,0</b>	<b>-</b>
<b>Temperatura</b>	<b>90</b>	<b>°C</b>
<b>Vazão de vinhaça</b>	<b>10,85</b>	<b>L / L etanol</b>
<b>DBO<sub>5</sub></b>	<b>16950</b>	<b>mg / L</b>
<b>DQO</b>	<b>28450</b>	<b>mg / L</b>
<b>Sólidos Totais</b>	<b>25155</b>	<b>mg / L</b>
<b>Potássio</b>	<b>2</b>	<b>Kg / m<sup>3</sup></b>
<b>Carga Orgânica</b>	<b>300</b>	<b>g</b>

O principal uso da vinhaça utilizado hoje nas unidades, até em função dessa caracterização, é na fertirrigação. Várias são as técnicas de aplicação da vinhaça no solo, tais como canhões, carretel, caminhões,

Conforme Albers (2007), juntamente com o aumento da produção de vinhaça, teve-se que aumentar o uso desta no solo, e isso acabou gerando alguns problemas, tais como:

- O uso da vinhaça no solo, em regiões onde o lençol freático é próximo à superfície, acabou sendo contaminado;
- Ao aumentar a capacidade da usina, torna-se necessário uma maior quantidade de cana que nem sempre é da usina, e sim de fornecedores, diminuindo assim a área para aplicação da vinhaça;
- Da mesma forma que se a usina comprar novas terras, ela pode ficar em regiões descontínuas e mais distantes, inviabilizando o transporte por tubos ou mesmo pelo caminhão, quando muito distantes;
- Pelas características da vinhaça, esta quando aplicada ao solo,

acaba alterando as qualidades do mesmo, principalmente quando utilizada em excesso, o que pode causar saturação de alguns nutrientes, principalmente o potássio (K).

Dentro do próprio processo de produção de etanol, há formas de se tentar a diminuição da vinhaça gerada, dependendo do tipo e capacidade dos equipamentos existentes.

Como um exemplo, aumentando-se o teor alcoólico do vinho. Para isso, deve-se atuar na fermentação e / ou na evaporação do caldo de forma a aumentar o “Brix” do caldo / mosto. Aumentando-se o teor alcoólico, diminui-se a quantidade de água, ou seja, de vinhaça gerada.

Outro exemplo: alterando o tipo de aquecimento de vapor nas colunas “A” (Destilação do vinho gerado na fermentação) e “B”(Retificação da flegma gerada na coluna “A”), para o tipo “indireto”, ou seja, através de refeedores na base. Dessa forma o vapor não é incorporado à vinhaça e gera condensados que podem e devem ser reaproveitados. Quando se usa vapor vegetal, torna-se mais difícil esse aquecimento em função da pequena diferença de temperatura entre o vapor (vegetal) e a base da(s) coluna(s). Algumas alternativas, como trocadores do tipo fluxo descendente (“falling films” ou “por névoa turbulenta”) permitem essas menores diferenças de temperaturas.

Além dessas situações descritas, a substituição do sistema comumente denominado “flegstil”, com retorno da flegmaça (produto de fundo da coluna “B” aquoso e isento de álcool) para a coluna “A”, para o sistema convencional, com geração de flegmaça, com reaproveitamento dessa corrente em lavagens e assepsias no processo. O não retorno dessa corrente de fundo da coluna “B” também diminui o volume de vinhaça gerado na coluna “A”.

Além dessas alternativas dentro do próprio processo, há aquelas que envolvem novos equipamentos, ou seja, requer investimentos, muitas vezes bem elevados, até em função do material necessário envolvido. A alternativa mais inserida atualmente, presente em alguns projetos novos, é a de concentração por evaporação em múltiplos efeitos.

## 2.4.2 CONCENTRAÇÃO DE VINHAÇA EM MÚLTIPLOS EFEITOS

Trata-se da evaporação de parte da água presente na vinhaça, de forma a concentrá-la a um valor tal que justifique, a partir dos benefícios obtidos, o investimento nesse sistema.

Abaixo na figura 10 um esquema simplificado de um concentrador convencional (Ferreira – 2011):

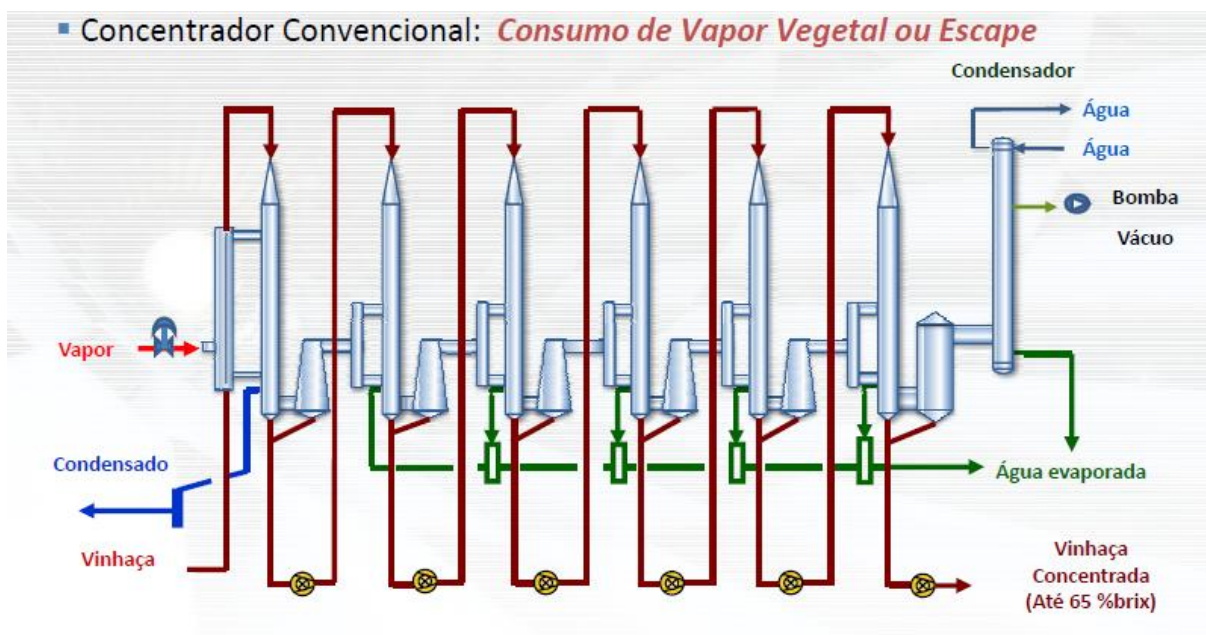


FIGURA 10: ESQUEMA - CONCENTRADOR DE VINHAÇA CONVENCIONAL (FONTE: FERREIRA - 2011)

Dentre os benefícios dessa tecnologia, os principais são (Albers – 2007):

- Redução de seu volume consideravelmente (cai o custo do transporte – viabiliza a aplicação em canais mais longos da usina);
- Uso para ração animal;
- Aumento do seu poder fertilizante;
- Possibilidade de queima em caldeiras especiais gerando energia;
- Diminuição da captação de água da usina, se o condensado retirado da evaporação for tratado e reutilizado no processo.
- Até 30° Brix, podem-se utilizar os mesmos equipamentos e técnicas das utilizadas para a vinhaça *in natura* (FARIA, DUDA e OLIVEIRA - 2011)

Em uma planta de concentração de vinhaça, similar à planta de evaporação em múltiplo efeito, com concentração a até aproximadamente 25° - 30°

Brix (valores maiores podem causar problemas de incrustação), alguns pontos relevantes precisam ser levados em consideração ao se fazer um projeto. Essa planta é integrada ao processo industrial, portanto precisa de utilidades como vapor (escape ou vegetal), água e energia elétrica. Uma das mais importantes utilidades é o vapor, que junto com a quantia do investimento inicial indicará como será a planta de concentração de vinhaça. Por exemplo: se a quantidade de vapor é maior, pode-se ter uma menor quantidade de efeitos, conseqüentemente um menor investimento inicial. Ou o inverso, se pelo balanço da usina, não se tem vapor, é necessário aumentar o número de efeitos, aumentando o investimento inicial.

De acordo com o a ANA (Agência Nacional de Águas) - 2009, as tecnologias de concentração de vinhaça por evaporação requerem equipamentos em aço inox e que o consumo específico de vapor, para o caso de evaporação em cinco efeitos, é de aproximadamente 0,2 kg / l de vinhaça ou 2,0 kg / l de etanol para concentra a vinhaça em 10 vezes.

Observação: Em alguns novos projetos, e mesmo em algumas unidades produtoras existentes, já existe sistema de concentração integrada ao sistema de destilação de vinho, mais especificamente ao topo da coluna "B". Nesse sistema, se utiliza os vapores alcoólicos como fonte de calor para o primeiro efeito da evaporação da vinhaça, possibilitando a condensação desses vapores que retornam ao topo da coluna (refluxo). Esse primeiro efeito de evaporação faz a função dos condensadores. Dessa forma, há uma economia de vapor no processo, porém causa uma dependência mútua entre esses dois sistemas, que passam a funcionar como um só.

A água também é importante no processo de concentração de vinhaça. A quantidade de água de recirculação da torre também depende do número de efeitos, se tiver menos efeitos, maior a água de recirculação, com mais efeitos, menor a quantidade necessária para recircular.

Em algumas plantas, o sistema possui, acoplado ao seu último efeito (vácuo), condensadores evaporativos. Possui a vantagem de consumir menos água devido à recuperação do condensado<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Condensador Evaporativo pode ser definido como sendo uma torre de resfriamento dotada de feixe tubular, onde ocorre a condensação dos vapores da vinhaça no contato indireto com a água de resfriamento.

Na figura 11 abaixo, um concentrador de vinhaça conectado a um condensador evaporativo instalado em uma unidade produtora de etanol no Brasil.



FIGURA 11: CONCENTRADOR DE VINHAÇA COM CONDENSADOR EVAPORATIVO

No que se refere ao reaproveitamento do condensado de vinhaça no processo, dependendo do uso, haverá a necessidade de se realizar um resfriamento, já que esse condensado normalmente está a 60°C (gerado sob vácuo). O resfriamento a 30°C normalmente é realizado em torres ou “Air Coolers”. Dentre os pontos do processo em que se pode reaproveitar esse condensado, podemos citar:

- Diluição de leveduras;
- Lavagem na torre de CO<sub>2</sub>;
- Embebições (moendas, difusores, filtros de lodo);
- Lavagem das telas dos filtros;
- Preparação do leite de cal etc..



### 3 METODOLOGIA UTILIZADA (ESTUDO DE CASO)

Para a obtenção dos resultados propostos nesse trabalho, utilizou-se planilha BM&E (balanço de massa e energia) elaborada em Excel 2007 como ferramenta para a elaboração de todos os balanços e diagramas nos anexos estudados.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA E DO PROCESSO

Na tabela 3 abaixo é mostrado os dados de qualidade e quantidade da cana processada pela unidade produtora de etanol. Nas tabelas 4 e 5 são mostrados os parâmetros de processo da unidade estudada. Estes dados da matéria-prima e do processo são necessários para a realização dos balanços mássicos e energéticos dessa unidade em cada anexo, assim como para a elaboração dos balanços hídricos respectivos.

TABELA 3: PARÂMETROS DE QUALIDADE e QUANTIDADE DA CANA PROCESSADA

Parâmetros	Unidade	Valor
Moagem horária	t/h	860
Pol%cana	%	14,5
Pureza%cana	%	86
Fibra%cana	%	13,2
AR%cana	%	0,8
Pureza%caldo 1º	%	86
Umidade%bagaço	%	50
Pol%bagaço	%	2,1
Dias de Safra	-	230

TABELA 4: PREMISSAS DE PROCESSO (BALANÇOS de MASSA)

Parâmetros	Unidade	Valor
<b>LAVAGEM DE CANA</b>	<b>%</b>	<b>100 (Anexos 1 a 3)</b> <b>50 (Anexo 4)</b> <b>0 (Anexo 5)</b>
<b>TRATAMENTO CALDO</b>		
Razão de "Flash"	%	1,0

Leite de cal%caldo a calear	%	0,1
Lodo%caldo a decantar	%	10
Polímero para Decantador	g/TC	3,0
Área Total Pré-evaporador	m <sup>2</sup>	7295
Área Total Evaporador	m <sup>2</sup>	1392
Taxa Pré-evaporador	kg/hm <sup>2</sup>	27
Taxa Evaporador	kg/hm <sup>2</sup>	25
% caldo para 2ºefeito	%	63
Torta%lodo	%	29
Bagacilho%torta	%	3,5
Água de lavagem%torta	%	270
Pol%Torta	%	2
<b>FERMENTAÇÃO</b>		
Rendimento da Fermentação	%	90
Pé-de-cuba%vinho a centrifugar	%	32
Vinho centrifugado para destilação	°GL	10,4
Pé-de Cuba	°GL	3,0
<b>DESTILAÇÃO</b>		
Rendimento da destilação	%	99,5
Perdas indeterminadas%álcool produzido	%	1,0
<b>CONCENTRAÇÃO DE VINHAÇA</b>		
<b>Vinhaça para Concentrador</b>	<b>t/h</b>	<b>0 (Anexos 1 a 5)</b>
	<b>t/h</b>	<b>200 (Anexo 6)</b>
	<b>t/h</b>	<b>400 (Anexo 7)</b>
	<b>t/h</b>	<b>615 (Anexo 8)</b>
Vinhaça a concentrar	Brix%	1,8
Vinhaça concentrada	Brix%	25
Número de Efeitos	-	5
Taxa de Evaporação 1º efeito	kg/m <sup>2</sup> /h	20
Taxa de Evaporação 2º efeito	kg/m <sup>2</sup> /h	20
Taxa de Evaporação 3º efeito	kg/m <sup>2</sup> /h	20
Taxa de Evaporação 4º efeito	kg/m <sup>2</sup> /h	20
Taxa de Evaporação 5º efeito	kg/m <sup>2</sup> /h	20
Cond. Vinhaça p/ Repos. Cond. Evaporativo	%	25
Evap. Torre de resf. Vinhaça in natura	%	6
Evap. Torre de resf. Cond. Vinhaça	%	6

TABELA 5: PREMISSAS DE PROCESSO (BALANÇOS de ENERGIA)

Parâmetros	Unidade	Valor
<b>REGENERADOR CALDO x CALDO</b>		
Caldo Misto com Filtrado - ÁLCOOL	Ti (°C)	33,3
Caldo Misto com Filtrado - ÁLCOOL	Tf (°C)	66,4
Caldo Pré-evaporado / Clarificado	Ti (°C)	115
Calor Específico caldo frio	kJ/kg°C	3,8
Calor Específico caldo quente	kJ/kg°C	3,8
Coefficiente Global de Transferência de Calor	kW/m <sup>2</sup> °C	2,5
<b>EVAPORAÇÃO ÁLCOOL</b>		
Efeitos	N°	2
<b>CONCENTRADOR DE VINHAÇA</b>		
Vinhaça in natura	Ti (°C)	0
Vinhaça concentrada	Tf (°C)	50
Condensado de VG	Tf (°C)	100
Condensado de Vinhaça	Tf (°C)	60
<b>AQUECEDORES FABRICAÇÃO DE ÁLCOOL</b>		
<b>Caldo Misto com Filtrado (AQ1)</b>	<b>Tf (°C)</b>	<b>80 (Anexos 1 a 6)</b>
	<b>Tf (°C)</b>	<b>85 (Anexos 7 e 8)</b>
Caldo Misto com Filtrado (AQ2)	Tf (°C)	105
Caldo Decantado (AQ3)	Ti (°C)	95
Caldo Decantado (AQ3)	Tf (°C)	110
Caldo Decantado (AQ4)	Tf (°C)	115
Vinhaça	Ti (°C)	90
Vinhaça	Tf (°C)	100
Calor específico Vinhaça	kJ/kg°C	4,2
<b>DESTILAÇÃO</b>		
CONS. ESP. COLUNA A	kg/l	1,8
CONS. ESP. COLUNA B	kg/l	0,8
CONS. ESP. COLUNAS A e B	kg/l	0,0
CONS. ESP. COLUNAS C e P	kg/l	1,7
<b>CALDEIRA - DESAERADOR</b>		
CAPACIDADE EFETIVA	t/h	500
CONSUMO ESPECÍFICO VAPOR - BAGAÇO	kgv/kgb	2,11
Bagaço Necessário para Paradas	%	3
Purgas	%	2

Entrada no Desaerador	°C	90
Desaerador	°C	105
Tipo Vapor	-	E
<b>CASA DE FORÇA</b>		
	<b>POTÊNCIA</b>	<b>RENDIMENTO</b>
<b>TIPO</b>	<b>NOM.(kW)</b>	<b>TÉRMICO (%)</b>
CONTRAPRESSÃO	40000	80%
CONTRAPRESSÃO	40000	80%

### 3.2 PREMISSAS HÍDRICAS

A tabela 6 abaixo apresenta as premissas de usos de água necessárias que, juntamente com os dados das tabelas 3, 4 e 5 permitirão a elaboração do balanço hídrico da unidade nos diversos anexos estudados.

TABELA 6 – PREMISSAS DE USOS DE ÁGUA NO PROCESSO

Parâmetros	Unidade	Valor
Consumo humano / Administração	m <sup>3</sup> / h	10
Lavagem de Correntes	l / tc	5
Lavagem das Peneiras rotativas	l / tc	0,4
Resfriamento de Óleos e Mancais	m <sup>3</sup> / tc	0,94
Limpezas gerais	m <sup>3</sup> / tc	0,01
Limpeza Evaporadores (hidrojato)	m <sup>3</sup> / tc	0,01
Lavagem de Gases da Caldeira	m <sup>3</sup> / tv	1,0
Lavagem telas filtros de Lodo % moagem	%	9
Resfriamento de Dornas	m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> et.	70
Condensadores Destilação	m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> et.	80
Lavagem de Óleo Fúsel	m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> et.	0,2
Resfriamento de etanol	m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> et.	5
Resfriamento de Ar Condicionado	m <sup>3</sup> / tc	0,25
Limpezas (dornas, tanques, trocadores)	m <sup>3</sup> / tc	0,02
Condensado p/ Polimento % Condensado total	%	30
Perdas Indeterminadas % moagem	%	5
Diluição de Soda	m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> et.	0,06
Preparo de Polímeros	m <sup>3</sup> / tc	0,01
Selagem de Bombas de Vácuo % moagem	%	6,5

<b>Purga da ETA % água filtrada gerada</b>	%	<b>5</b>
<b>Purga da desmi % água desmi gerada</b>	%	<b>25</b>
<b>Purga Torres Destilaria e Óleos % circulante</b>	%	<b>2 (Anexo 1 )</b>
	%	<b>0,8 (Anexo 2)</b>
	%	<b>0,5 (Anexos 3 a 8)</b>
<b>Purga Torres Polimento de Cond. % circulante</b>	%	<b>6 (Anexo 1 )</b>
	%	<b>3 (Anexo 2)</b>
	%	<b>1,8 (Anexos 3 a 8)</b>
<b>Purga Torres Ar Condicionado % circulante</b>	%	<b>1,5 (Anexo 1 )</b>
	%	<b>0,5 (Anexo 2)</b>
	%	<b>0,4 (Anexos 3 a 8)</b>

Outras considerações a respeito do processo foram estabelecidas para a realização dos balanços. São elas:

- Equipamentos principais considerados no trabalho:
  - Extração: 5 ternos de moendas, sendo:
    - 2 ternos maiores (46" x 84") e 3 ternos menores (42" x 78")
  - Caldeiras: 2 de 250 t/h, 68 bar (a) e 515°C;
  - Decantador: 2 do tipo rápido de 500 m<sup>3</sup>;
  - Evaporação tipo Robert em 2 efeitos;
  - Sistema de fermentação do tipo batelada alimentada com recirculação de levedura;
    - Destilação (colunas A e B) de capacidade total de 1500 m<sup>3</sup>/dia;
    - Sistema de desidratação do tipo azeotrópico de 500 m<sup>3</sup>/dia com ciclohexano como agente desidratante.
- Relação vinhaça / etanol 100% produzido = 10 litros / litro.
- Aquecimentos colunas:
  - A: Indireto;
  - B: Direto.

### 3.3 ANEXOS ESTUDADOS

#### 3.3.1 OTIMIZAÇÃO DO CICLO DE CONCENTRAÇÃO

A partir do caso base (anexo 1), alterou-se a vazão de purga das torres de tal forma a permitir o aumento do ciclo de concentração até o valor 4,0 (anexo 2). O mesmo foi feito para se atingir o ciclo de concentração 6,0 (anexo 3). Considerou-se nesses anexos, que os contaminantes (sólidos dissolvidos) da água de resfriamento circulante não se tornaram excessivamente altos de forma a prejudicar o sistema, seja por incrustação e / ou corrosão. Considerou-se que o tratamento químico dessas águas é satisfatório, através do uso adequado de agentes anti-incrustantes, inibidores de corrosão e biocidas para permitir os ciclos de concentração simulados.

##### 3.3.1.1 CÁLCULO DOS CICLOS DE CONCENTRAÇÃO (CC)

Para os cálculos das taxas de corrosão dos cupons, foi utilizada a seguinte equação:

$$CC = (E / P) - 1$$

CC = ciclo de concentração da torre de resfriamento;

E = perda de água por evaporação, em m<sup>3</sup>/h;

P = purga ou descarga da torre de resfriamento (inclui a perda por arraste), em m<sup>3</sup>/h.

A dedução dessa equação é mostrada no capítulo 2. De acordo com a equação acima, percebe-se a influência direta e inversamente proporcional da vazão de purga com o ciclo de concentração. A evaporação das torres foi calculada a partir da seguinte equação abaixo:

$$E = Q \times (T_f - T_i) / 589$$

E = perda de água por evaporação, em m<sup>3</sup>/h;

Q = vazão de água circulante, em m<sup>3</sup>/h;

T<sub>f</sub> = temperatura da água quente para resfriamento, em °C;

T<sub>i</sub> = temperatura da água após o resfriamento nas torres, em °C;

“589” = 578 kcal / kg a 40°C (calor latente de evaporação) / 0,98 kcal/kg °C a 40°C (calor específico da água)

### 3.3.2 PERCENTUAL DE CANA PROCESSADA COM LAVAGEM

A partir do anexo 3 (sistema de resfriamento de água “ótimo” com ciclo e concentração em 6,0 e lavagem de 100% da cana entrada na unidade), buscou-se a atuação em outro parâmetro de processo considerado crítico na questão avaliada nesse trabalho (consumo de água). Foram feitas simulações para o caso da unidade substituir parcial ou totalmente o sistema de colheita de cana, passando a trazer para a unidade cana picada, seja no percentual de 50% (anexo 4) ou integralmente (anexo 5). Está sendo considerado que toda a cana inteira é lavada e que a picada, colhida por máquinas colhedoras não, em função da elevada perda de açúcares na lavagem desse tipo de cana. Não foi enfoque nesse trabalho a implantação ou não do sistema de separação de impurezas a seco, normalmente utilizado em novos projetos e em algumas unidades existentes que já processam cana picada, assim como o valor de seu investimento inicial.

#### 3.3.2.1 CÁLCULO DA REPOSIÇÃO DE ÁGUA DE LAVAGEM

Para o cálculo da vazão de água horária repostada no processo para os anexos 1 a 3(100%) e 4(50%), foi utilizada a premissa do trabalho do CTC (Elia Neto, A. 2009) em que a aplicação de água na lavagem de cana é:

$$\text{Aplicação} = 2,2 \text{ m}^3 / \text{t cana}$$

E a reposição se dá, através do seguinte percentual (Lopes e Borges – 2009):

$$\text{Reposição} = (0,1 \times \text{Aplicação}) / \text{dia}$$

#### 3.3.3 PERCENTUAL DE VINHAÇA PARA CONCENTRAÇÃO

O terceiro parâmetro estudado nesse trabalho refere-se ao impacto na redução do consumo de água com o aumento do percentual da vinhaça gerada utilizada no sistema de concentração (evaporação de parte de sua água). Utilizou-se um sistema com a capacidade de concentrar a vinhaça de 1,8 (valor médio obtido em uma unidade em operação no Brasil na safra 2010/2011) até 25 Brix, valor que apresenta duas explicações importantes, além de gerar um volume bastante

significativo de água para usos em outros pontos do processo:

- É um valor maior do que 10 vezes a concentração inicial o que reduz significativamente o custo de transporte dessa vinhaça na aplicação em áreas mais distantes da unidade.

- É um valor considerado próximo ao aceitável para aplicação direta no canal sem necessidade de diluições (saturação do solo com os sais, principalmente potássio).

A partir do anexo 5 (toda a cana processada picada e sem lavagem, sistema de resfriamento trabalhando no seu ciclo de concentração considerado ótimo), avaliou-se mais 3 situações, utilizando percentuais de 33%, 66% e 100 % (anexos 6, 7 e 8, respectivamente) do valor da vinhaça que passa pelo processo e concentração.

É importante ressaltar o fato de que é necessário investimento inicial elevado e progressivo cada vez maior à medida que se vai aumentando esse percentual (em evaporadores, torres de resfriamento, tubulações, bombas etc.). Porém esse aspecto não foi avaliado nesse trabalho, onde se buscou apenas o seu benefício na redução do volume de água captada da unidade. Nesse caso específico se procurou avaliar o impacto no balanço energético da unidade, já que o sistema consome vapor. Os diversos pontos de consumo de vapores (escape, vegetal 1 e vegetal 2) foram avaliados, assim como a demanda nas turbinas e nas caldeiras, verificando as suas capacidades.

Os principais pontos de utilização da água gerada foram os de lavagem da corrente de CO<sub>2</sub> em série com as diluições de fermento (passando antes desses pontos por resfriamento em torres). Havendo sobra, buscou-se o uso nas embebições nas moendas e nos filtros de lodo, além da aplicação também na lavagem das telas desses filtros.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No anexo I os diagramas hídricos dos oito anexos estudados.

### 4.1 CICLO DE CONCENTRAÇÃO - TORRES DE RESFRIAMENTO

TABELA 7: ÁGUA CAPTADA E CONSUMO ESPECÍFICO – ANEXOS 1, 2 E 3

<b>CC com Lavagem 100% e Concentração Vinhaça = 0%</b>				
<b>Consumo</b>	<b>CC=2 Anexo 1 (base)</b>	<b>CC=4 Anexo 2</b>	<b>CC=6 Anexo 3</b>	<b>CC=8 Anexo 3.1</b>
<b>Água Captada (m<sup>3</sup>)</b>	<b>972,4</b>	<b>865,6</b>	<b>838,6</b>	<b>824,9</b>
<b>Consumo (m<sup>3</sup>/t cana)</b>	<b>1,130</b>	<b>1,007</b>	<b>0,975</b>	<b>0,959</b>
<b>Delta (m<sup>3</sup>/t cana)</b>	<b>-</b>	<b>0,123</b>	<b>0,032</b>	<b>0,016</b>

A tabela 7 acima mostra uma queda significativa da água captada e do consumo específico com o aumento do ciclo de concentração, até o ciclo de 6. Como se pode perceber, a partir desse ciclo de concentração 6 a queda do consumo torna-se muito pequena, o que significa que a água de reposição a partir do ciclo 6 não é substancialmente reduzida com a diminuição da vazão de purga. Este fato sugere não valer a pena concentrar ainda mais em contaminantes a água circulante, com custos de tratamento para essa água ainda mais rigoroso. A variação de ciclo, de 4 para 6 não foi também tão significativa, mas ainda foi o dobro da variação de 6 para 8 e, por isso, estabeleceu-se, para os demais anexos, o ciclo ótimo de 6.

É importante ressaltar, porém, que nem sempre é possível atingir o ciclo de concentração 6,0 em uma unidade, em função da qualidade da água de reposição da unidade e do seu elevado custo de tratamento necessário, em função dos prejuízos que os elementos contaminantes (sais dissolvidos) podem causar (item 2.2.3).

## 4.2 LAVAGEM DE CANA

TABELA 8: ÁGUA CAPTADA E CONSUMO ESPECÍFICO – ANEXOS 3, 4 E 5

<b>Lavagem com CC=6 e Concentração Vinhaça = 0%</b>			
<b>Consumo</b>	<b>100% Anexo 3</b>	<b>50% Anexo 4</b>	<b>0% Anexo 5</b>
<b>Água Captada (m<sup>3</sup>)</b>	<b>838,3</b>	<b>834,7</b>	<b>830,7</b>
<b>Consumo (m<sup>3</sup>/t cana)</b>	<b>0,975</b>	<b>0,971</b>	<b>0,966</b>
<b>Delta (m<sup>3</sup>/t cana)</b>	<b>-</b>	<b>0,004</b>	<b>0,005</b>

Os resultados da tabela 8 demonstram a insignificância da lavagem ou não de cana no consumo de água para a unidade. Isso porque o sistema de lavagem de cana possui uso elevado, mas através de sistema do tipo “fechado” em que a água é circulante e a sua reposição estabelecido de 10% ao dia (percentual utilizado nesse trabalho, conforme descrito no item 3.3.2). O volume inicial de água para lavar cana é elevado (uso elevado), mas na condição estacionária do processo, o consumo se dá pela reposição.

Considerando que existem outros motivos mais significativos para a eliminação da lavagem, principalmente as perdas significativas de açúcares na lavagem, foram admitidas, nos anexos seguintes, as condições de separação de impurezas a seco, considerando a hipótese da possibilidade de se poder processar 100% da cana do tipo picada oriunda de colheita mecanizada.

### 4.3 CONCENTRAÇÃO DE VINHAÇA

TABELA 9: ÁGUA CAPTADA E CONSUMO ESPECÍFICO – ANEXOS 6, 7 E 8

<b>Concentração de Vinhaça com CC=6 e Lavagem = 0%</b>			
<b>Consumo</b>	<b>33% Anexo 6</b>	<b>66 % Anexo 7</b>	<b>100 % Anexo 8</b>
<b>Água Captada (m<sup>3</sup>)</b>	<b>652,4</b>	<b>471,3</b>	<b>293,1</b>
<b>Consumo (m<sup>3</sup>/ t cana)</b>	<b>0,759</b>	<b>0,548</b>	<b>0,341</b>
<b>Delta (m<sup>3</sup>/t cana)</b>	<b>0,207</b>	<b>0,211</b>	<b>0,207</b>

A tabela 9 comprova a enorme relevância do processo de concentração de vinhaça na questão hídrica, pois mostra reduções bem significativas no consumo obtidas com o aumento da quantidade de água da vinhaça gerada e reaproveitada no processo, em substituição às águas bruta e tratada. No caso específico do anexo 8, buscaram-se outros pontos para total aproveitamento dessa água gerada (embebições e lavagem dos filtros). O ganho de redução nesse caso foi bastante significativo e resultou em consumo específico menor do que 0,4 m<sup>3</sup>/t cana, considerado, pelo menos nesse quesito, o anexo ótimo nesse trabalho.

#### 4.4 ANÁLISE GLOBAL DOS RESULTADOS

FIGURA 12: ÁGUA CAPTADA (M<sup>3</sup>/H)

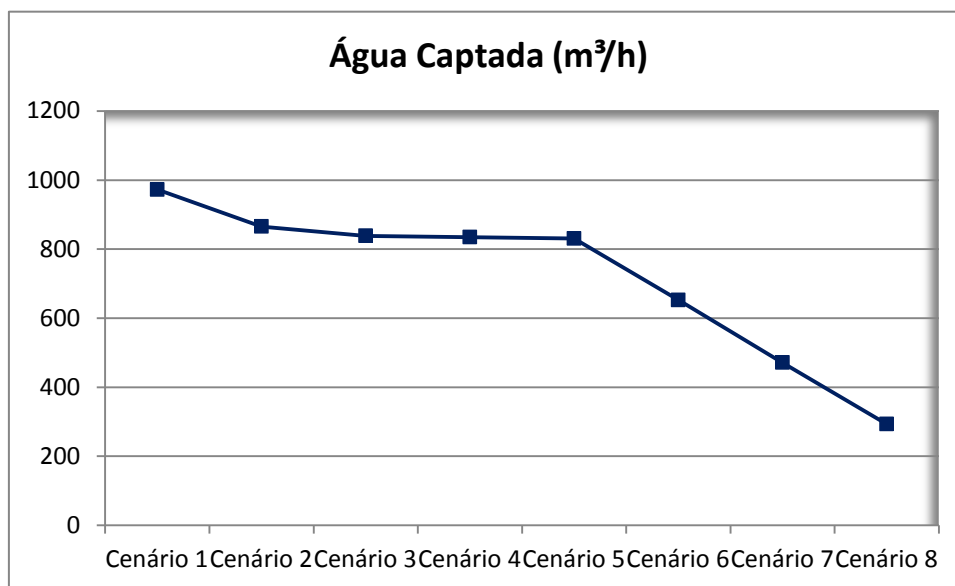
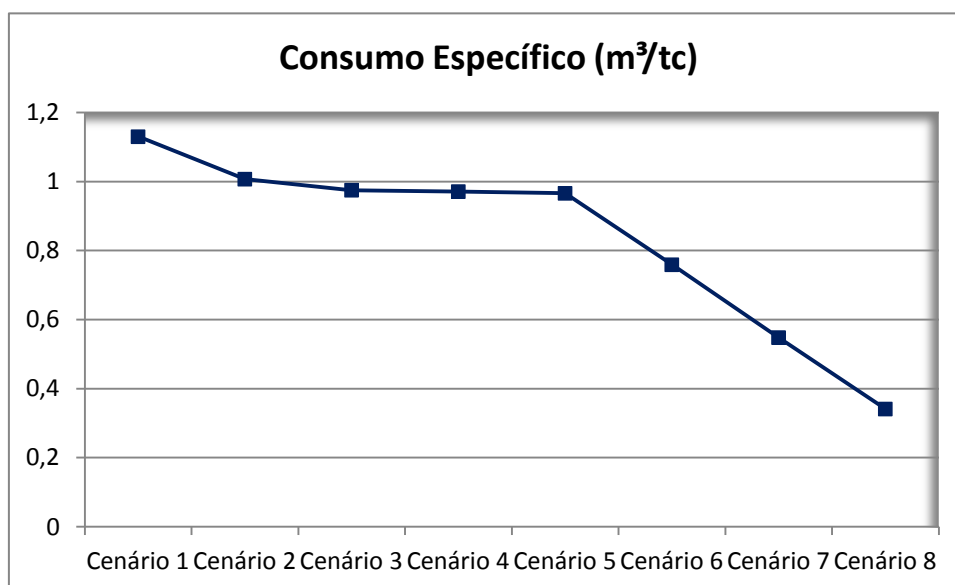


FIGURA 13: CONSUMO ESPECÍFICO (M<sup>3</sup>/T CANA)



As figuras 12 e 13 mostram, de forma global, a queda de demanda de água captada e de consumo específico do anexo 1 (caso base) até o último anexo, com concentrador para 100% da vinhaça gerada e ciclo de concentração “ótimo”, além da não lavagem da cana para processamento.

Fica notório a maior queda nos anexos onde se variou o percentual de

vinhaça gerada para concentração (anexos 6,7 e 8), e praticamente nenhuma redução com a variação no percentual de cana lavada (anexos 4 e 5). A queda em função da variação no ciclo de concentração das torres de resfriamento é evidente, porém menos acentuada do que no caso da vinhaça (anexos 1,2 e 3).

Analisando o anexo 8, caso mais “ideal” dentre os anexos avaliados, o ganho de redução em relação ao caso base (anexo 1) foi de 70%, queda bem significativa. Essa redução demonstra a importância da aplicação da tecnologia de concentração de vinhaça e do monitoramento das impurezas nas torres com tratamento químico adequado e purga controlada na redução de captação de água bruta.

Vale a pena comentar que com o aumento da vazão de vinhaça a concentrar, a demanda de vapor para o processo também aumenta. Nos anexos 7 e 8 houve a necessidade de se aumentar a potência das turbinas de forma a gerar mais vapor de escape. Da mesma forma, aumentou-se um pouco a utilização de vapor vegetal do 2º feito para o aquecimento de caldo e utilizou-se vapor de escape na coluna B (anexos 7 e 8) e vapor vegetal para a coluna desidratadora (C / P) (anexo 7). Com isso, sobrou mais vegetal do 1º feito para atender a demanda de vapor no concentrador de vinhaça.

Observação: nesse caso é importante ressaltar que houve aumento significativo de consumo de vapor do processo nesses anexos devido a essa maior demanda de vapor de escape (474 kg vapor / t cana nos anexos 1 a 6, 507 kg vapor / t cana no anexo 7 e 545 kg vapor / t cana no anexo 8), mas tanto a caldeira quanto as 2 turbinas de contrapressão dessa unidade suportam essas mudanças. Como as turbinas da unidade estudada são de contrapressão, esse aumento de demanda significa também aumento da energia elétrica exportada. Da mesma forma, não houve falta de bagaço para a caldeira também.

Da mesma forma, o investimento em equipamentos para atendimento a essa maior vazão também tem de ser levado em conta (questão não avaliada nesse trabalho).

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho mostrou que há ainda muitas possibilidades de atuação dentro do processo de forma a se conseguir diminuir consumo de água captada, com reaproveitamento de correntes em pontos de usos significativos de água, diminuição de consumos através de controles em águas circulantes (purgas e tratamento químico), seja através da aplicação de tecnologias inovadoras com benefícios diretos e indiretos na questão hídrica (concentração de vinhaça), seja na otimização de processos com reduções significativas da demanda de águas (aumento do ciclo de concentração das torres de resfriamento).

O trabalho mostrou também a pouca influência da lavagem de cana na questão de captação de água em uma unidade em operação contínua, já que normalmente a reposição dessa água é baixa (o uso de água de lavagem é elevado, mas o volume é circulante, com tratamento físico-químico). O motivo fundamental para se eliminar a lavagem de cana é a perda de açúcar que ela ocasiona, sendo ainda muito maior no caso de cana picada, colhida mecanicamente.

A água evaporada da vinhaça pode ser reaproveitada em diversos pontos do processo, havendo necessidade ou não de resfriamento, dependendo do seu uso. Nesse trabalho, consideramos na maioria dos anexos, reaproveitamento após resfriamento, na lavagem do CO<sub>2</sub>, na diluição do fermento e na reposição das torres de resfriamento. Apenas no anexo 8, em que a quantidade de água de vinhaça evaporada ultrapassou essas demandas, buscaram-se alternativas de reaproveitamento nas embebições e lavagem das telas dos filtros. O cuidado com essa água deve existir em relação ao pH, diretamente relacionado à eficiência do equipamento de evaporação. Na impossibilidade de se reaproveitar essa água nesses pontos adicionais do anexo 8, o anexo 9 mostra o máximo de vinhaça que deve ser concentrada para atender a demanda dos consumidores identificados nos anexos anteriores.

Algumas tecnologias citadas, mas não utilizadas nesse trabalho podem contribuir bastante para a redução ainda maior do consumo de água no processo. Como exemplo, podemos citar a concentração de vinhaça integrada à destilação, o condensador evaporativo em turbinas de condensação, por exemplo, como substituição às torres de resfriamento e precipitador eletrostático como substituto da

estação de lavagem de gases da caldeira.

Apenas a avaliação hídrica não é suficiente na hora da escolha da tecnologia ou redução ou reaproveitamento de correntes hídricas. Em todos os anexos estudados avaliou-se o impacto nos balanços mássicos e energéticos, de forma a identificar algum possível gargalo. Foram obtidos os diagramas hídricos obtidos através dos balanços (mássico, energético e hídrico) para cada anexo estudado.

## **6 SUGESTÕES**

Avaliar a influência de outras tecnologias inovadoras que direta ou indiretamente influenciam na redução do uso ou consumo de água na indústria sucroenergética, assim como metodologias outras de otimização do uso de água nos diversos processos existentes.

No caso do concentrador de vinhaça, realizar estudo de forma a identificar a vazão ótima de vinhaça que uma unidade deve utilizar para concentração. Nesse caso, devem-se considerar aspectos como o custo de transporte, o reaproveitamento da água evaporada, o consumo de vapor, a possibilidade de se fazer uma integração com a destilação, entre outros aspectos relevantes, além do investimento inicial necessário.

Realizar estudos técnico-econômicos e comparações do investimento inicial e do tratamento químico mais rigoroso (caso das torres de resfriamento) com o ganho na redução do consumo de água na unidade a partir dos resultados obtidos nesse trabalho.

Realizar novos balanços para outras unidades, como aquelas produtoras também de açúcares, assim como outros parâmetros de qualidade de matéria-prima e de processos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Manual de Conservação e Reúso de Água na Indústria Sucroenergética**: ano base2009 – Brasília: ANA, 2009.

ALBERS, M., **Tratamento da Vinhaça: Concentração e Outros**. In: Workshop Tecnológico sobre vinhaça. FCAV/UNESP – Campus de Jaboticabal, 2007, Jaboticabal. Disponível em:

<[http://www.apta.sp.gov.br/cana/anexos/Workshop\\_vinhaca\\_sessao4\\_monica\\_VS.pdf](http://www.apta.sp.gov.br/cana/anexos/Workshop_vinhaca_sessao4_monica_VS.pdf)>. Acesso em 16/10/2012.

**ALBUQUERQUE**, Fernando Medeiros. **Processo de Fabricação de Açúcar**. Editora Universitária UFPE, Universidade Federal de Pernambuco. 2009.

ALMEIDA, R. A. de e SANTOS A. H. M. - **O Uso Industrial da Água e a Gestão de Recursos Hídricos**. - XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, 2003.

BRANCO, Jorge de Moraes.; **Apostila do Curso de Clarificação**. ER-AE/UNREDUC/Petrobras, Duque de Caxias - RJ - 2004.

CASTRO, Sebastião Beltrão; ANDRADE, Samara Alvachian C. **Apostila Engenharia e Tecnologia Açucareira** - Departamento Engenharia Química - CTG – UFPE – 2006.

CTC - Centro de Tecnologia Açucareira, **Apostila “O Estado da Arte na Produção de Etanol”** – Relatório reservado, 2006.

DANTAS, E. **Geração de Vapor e Água de Refrigeração - Falhas - Tratamento – Limpeza Química**, 1989.

ELIA NETO, A. & SHINTAKU, A. – **Manual de Conservação e Reúso de Água na Indústria Sucroenergética**, Brasília, 2009.



ELIA NETO,A. (CTC) - **Água na Indústria da Cana-de-açúcar**. In: Workshop Projeto PPP“Aspectos Ambientais da Cadeia do Etanol de Cana-de-Açúcar”, CTC – Centro de Tecnologia Canavieira, São Paulo, 2008. Disponível em [www.apta.sp.gov.br/cana/anexos/apresentacao\\_painel\\_1\\_andre.pdf](http://www.apta.sp.gov.br/cana/anexos/apresentacao_painel_1_andre.pdf). Acesso em [01/09/2012](#).

FARIA, A.; DUDA,R.; OLIVEIRA,R., **Concentração da Vinhaça e Reaproveitamento da Água**. FATEC-JB – Faculdade de Tecnologia de Jaboticabal, Jaboticabal – SP; Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias /UNESP - SP. Disponível em:  
<<http://www.fatecjab.edu.br/Revista/2011>. Acesso em [16/10/2012](#).

FERREIRA. G. M. (Dedini S/A Indústria de Base) – Palestra **Concentração de Vinhaça: Consumo de Vapor "ZERO"** - 12<sup>o</sup> SBA – Seminário Brasileiro Agroindustrial – STAB, outubro/2011.

IEA (International Energy Agency), World Energy Outlook – 2006, OECD/IEA, Paris, 2006. Disponível em [www.iea.org](http://www.iea.org)

LOPES, C.H.; BORGES, M.T.M.R. **Introdução à tecnologia agroindustrial**. São Carlos: EdUFSCar, 2009.

MANSUR, W. - **Curso Básico sobre Torres de Resfriamento de Água** - PETROBRAS – ABAST, 2004.

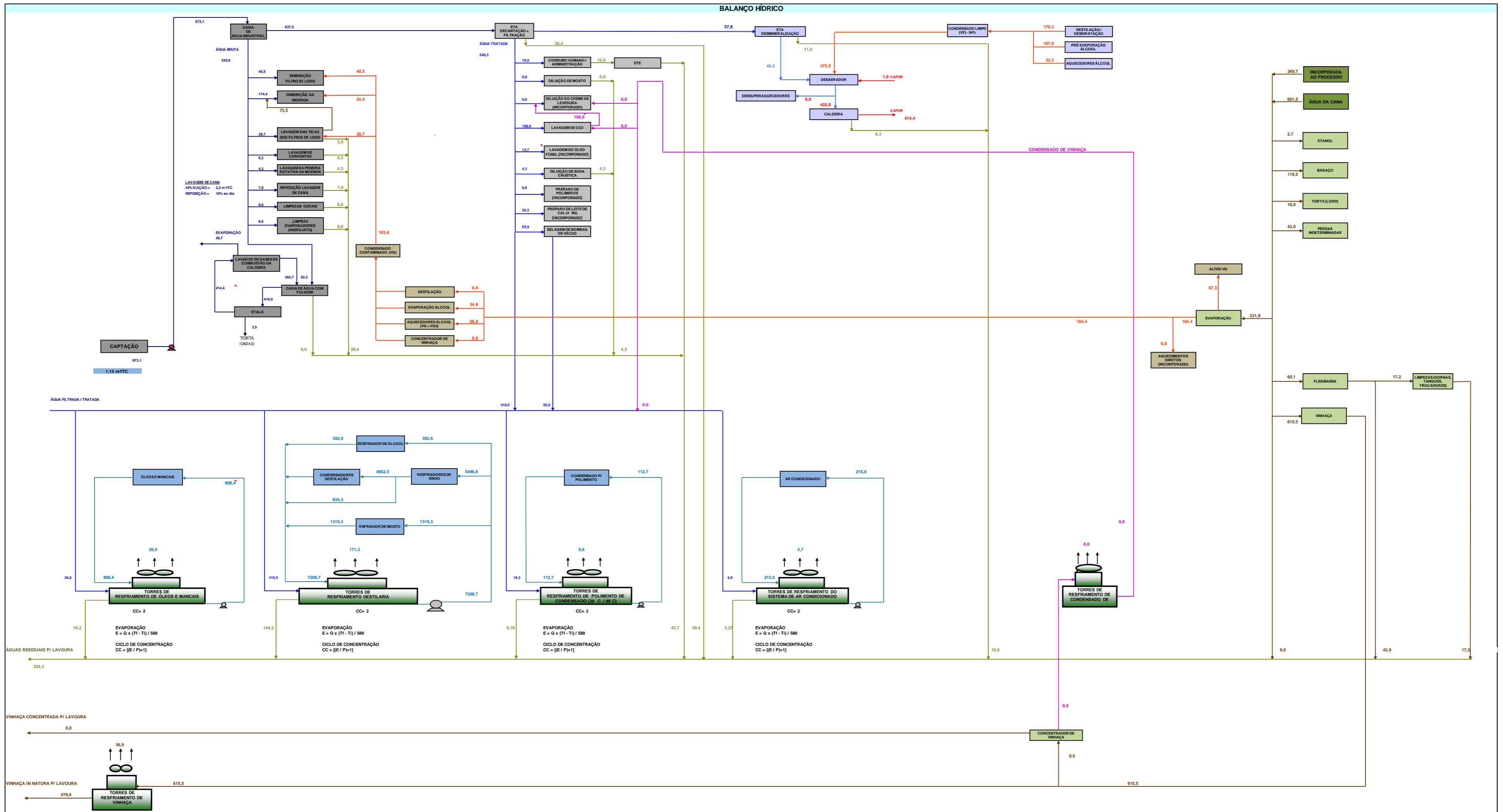
MELLO, Alexandre Galvão Brasileiro. – **Influência da Deformação Plástica na Corrosão de Aço Carbono, Aço Inoxidável e Cobre em Sistemas de Resfriamento** – Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, 2008.

PINTO, C. P. **Tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça e desenvolvimento sustentável**. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas/SP, 1999.

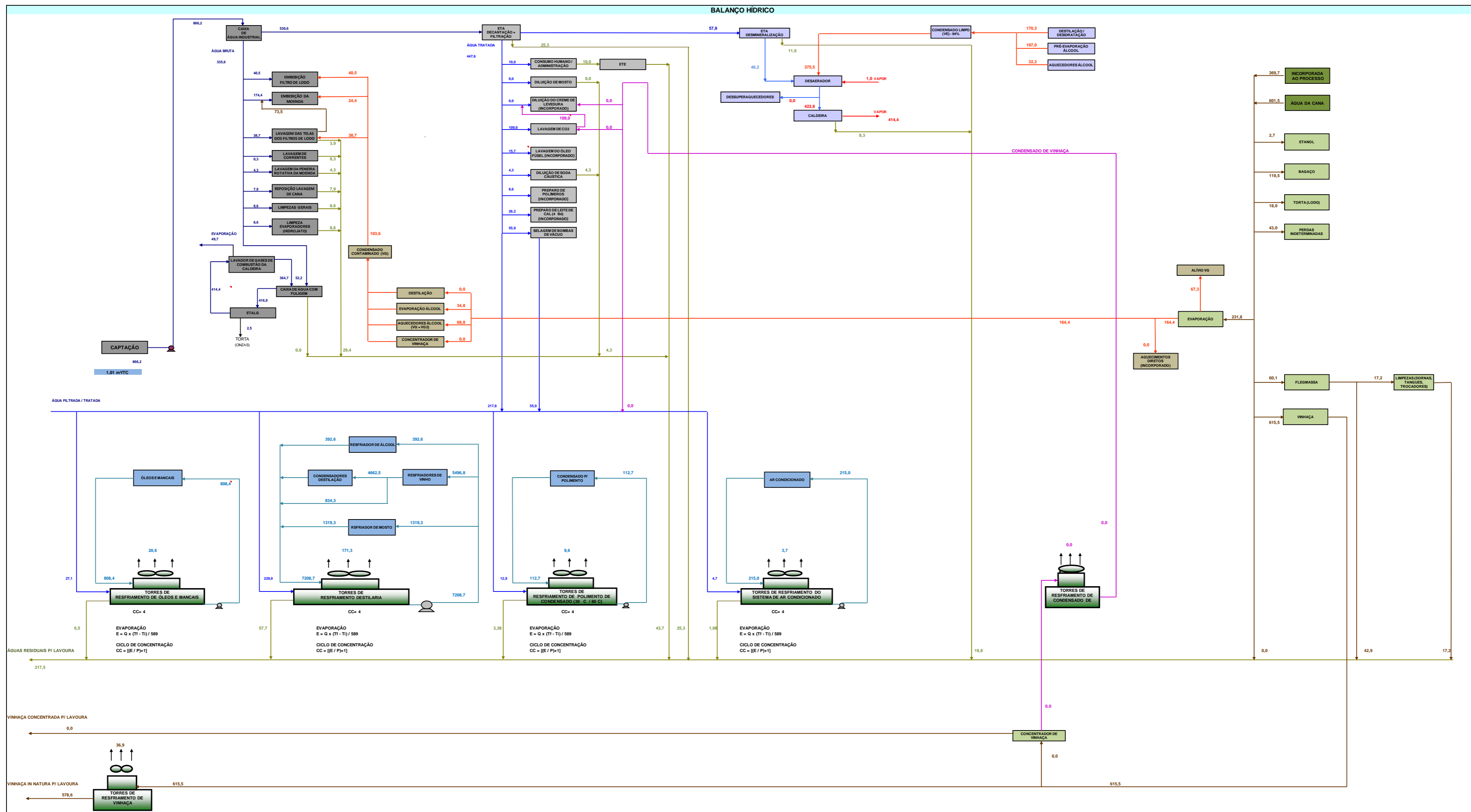
SUZUKI, T.; KURITA WATER INDUSTRIES LTDA. "**Handbook of Water Treatment**", 2ª English Edition, 1999.

TROVATI, J.; **Apostila de Tratamento de Águas Industriais - Resfriamento**, 2004.

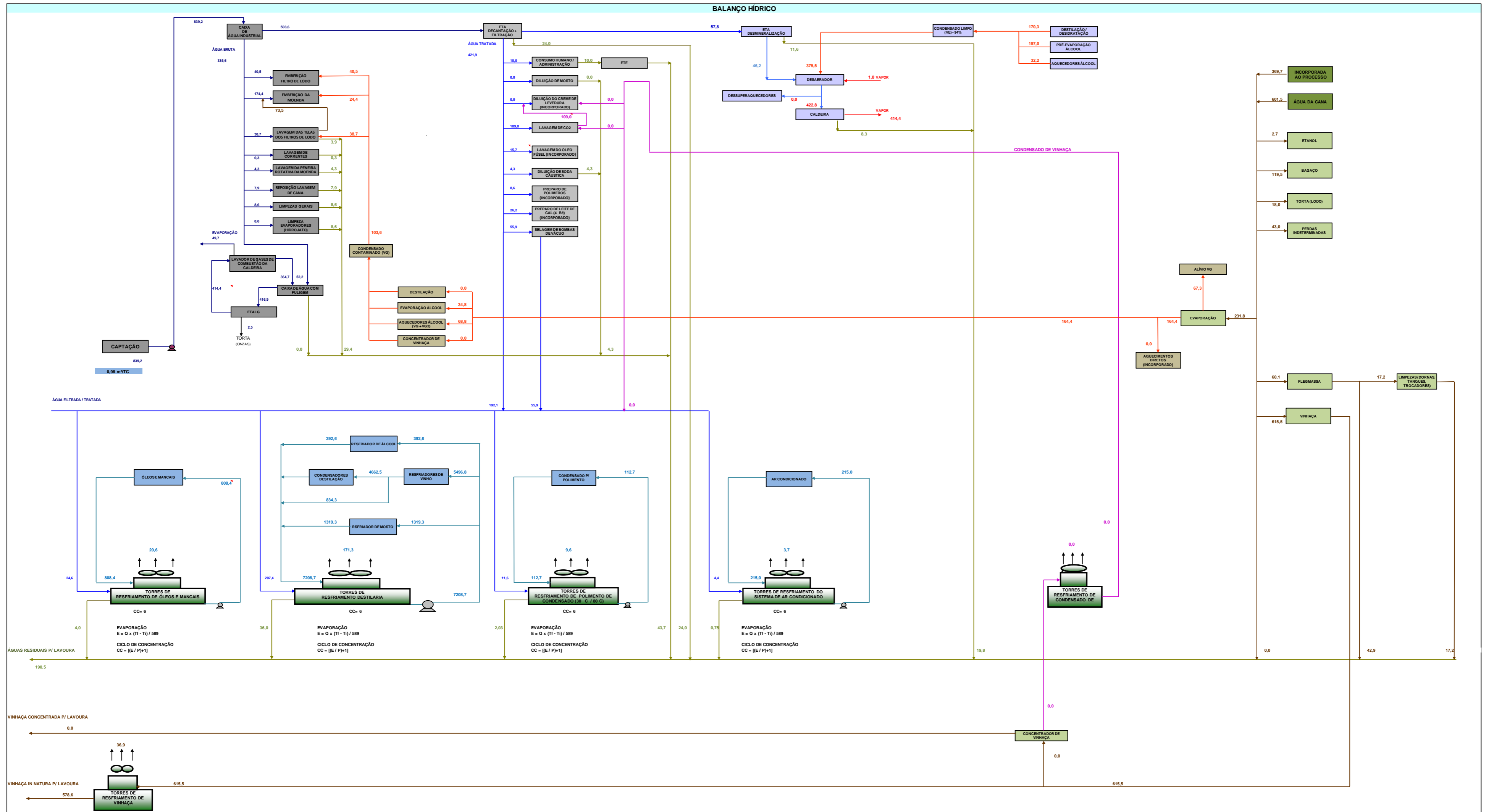
BALANÇO HÍDRICO - ANEXO 1



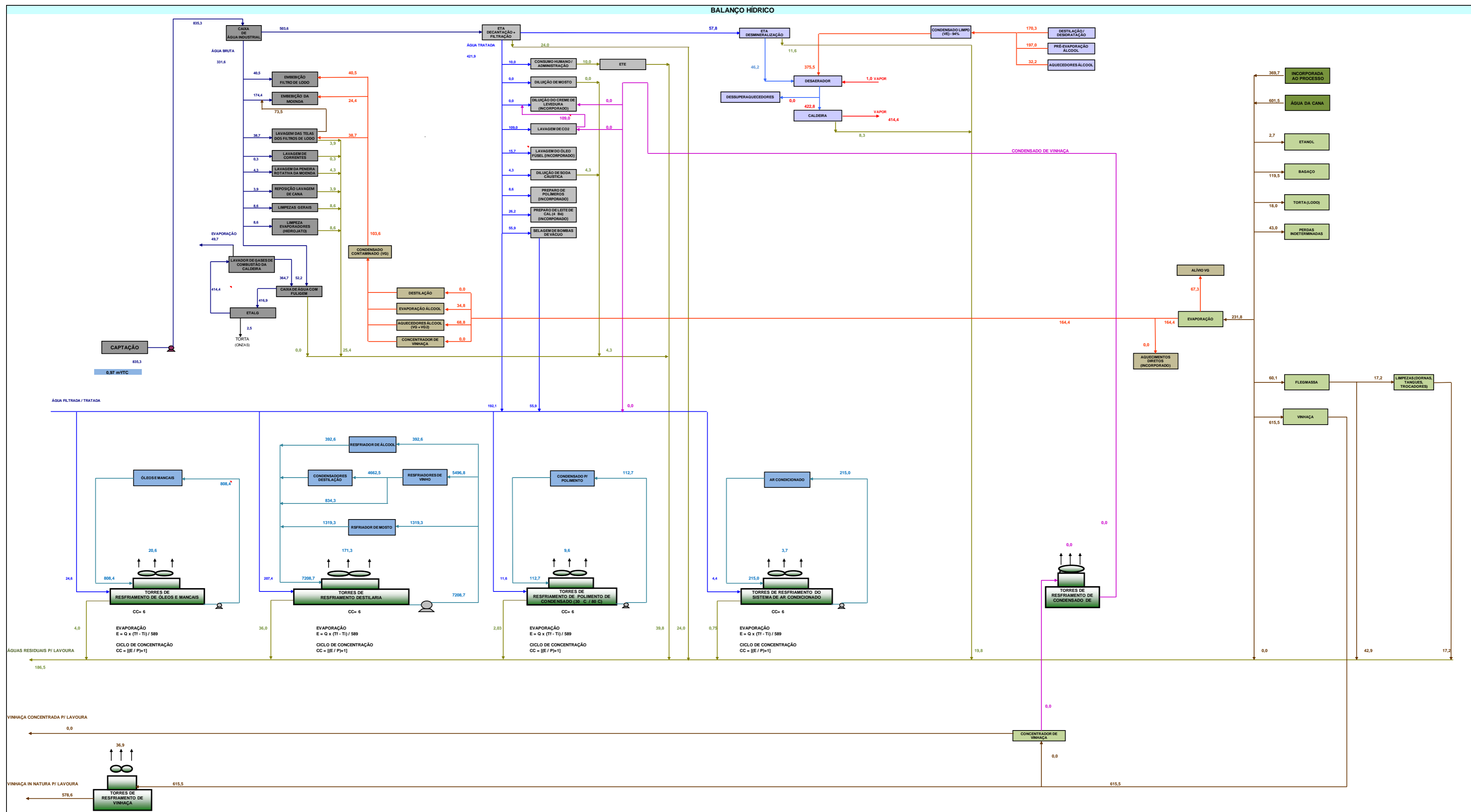
BALANÇO HÍDRICO - ANEXO 2



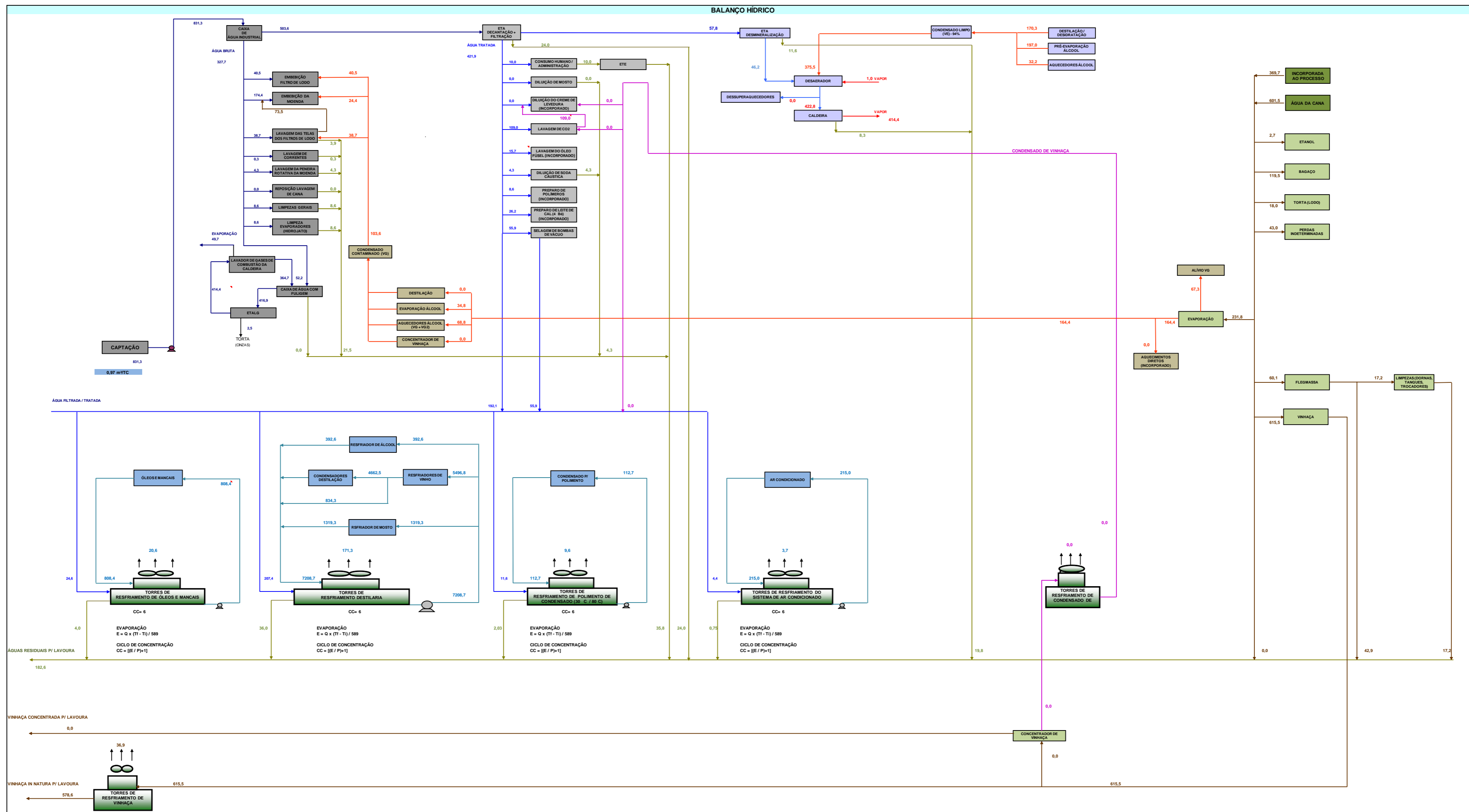
### BALANÇO HÍDRICO - ANEXO 3



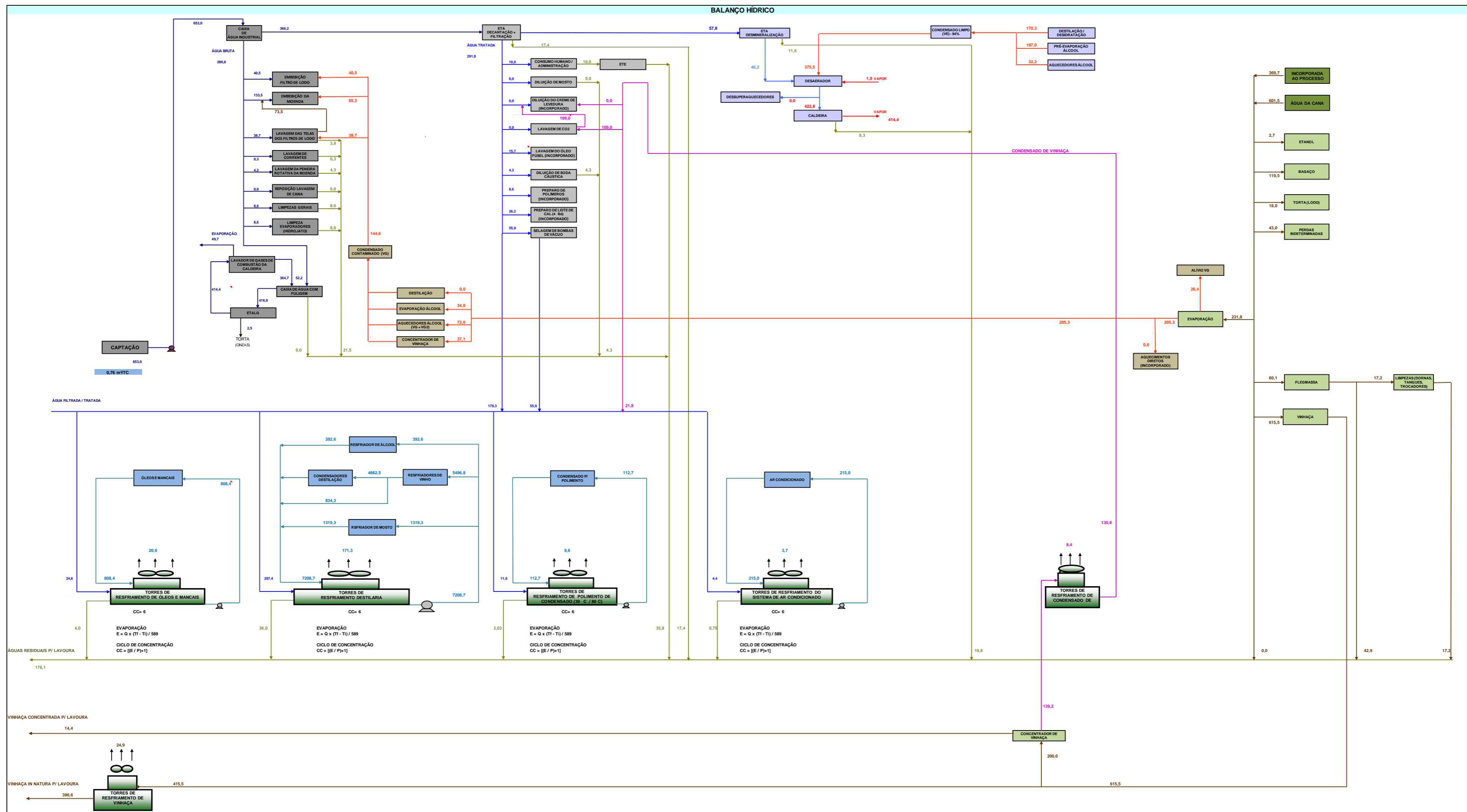
BALANÇO HÍDRICO – ANEXO 4



### BALANÇO HÍDRICO - ANEXO 5

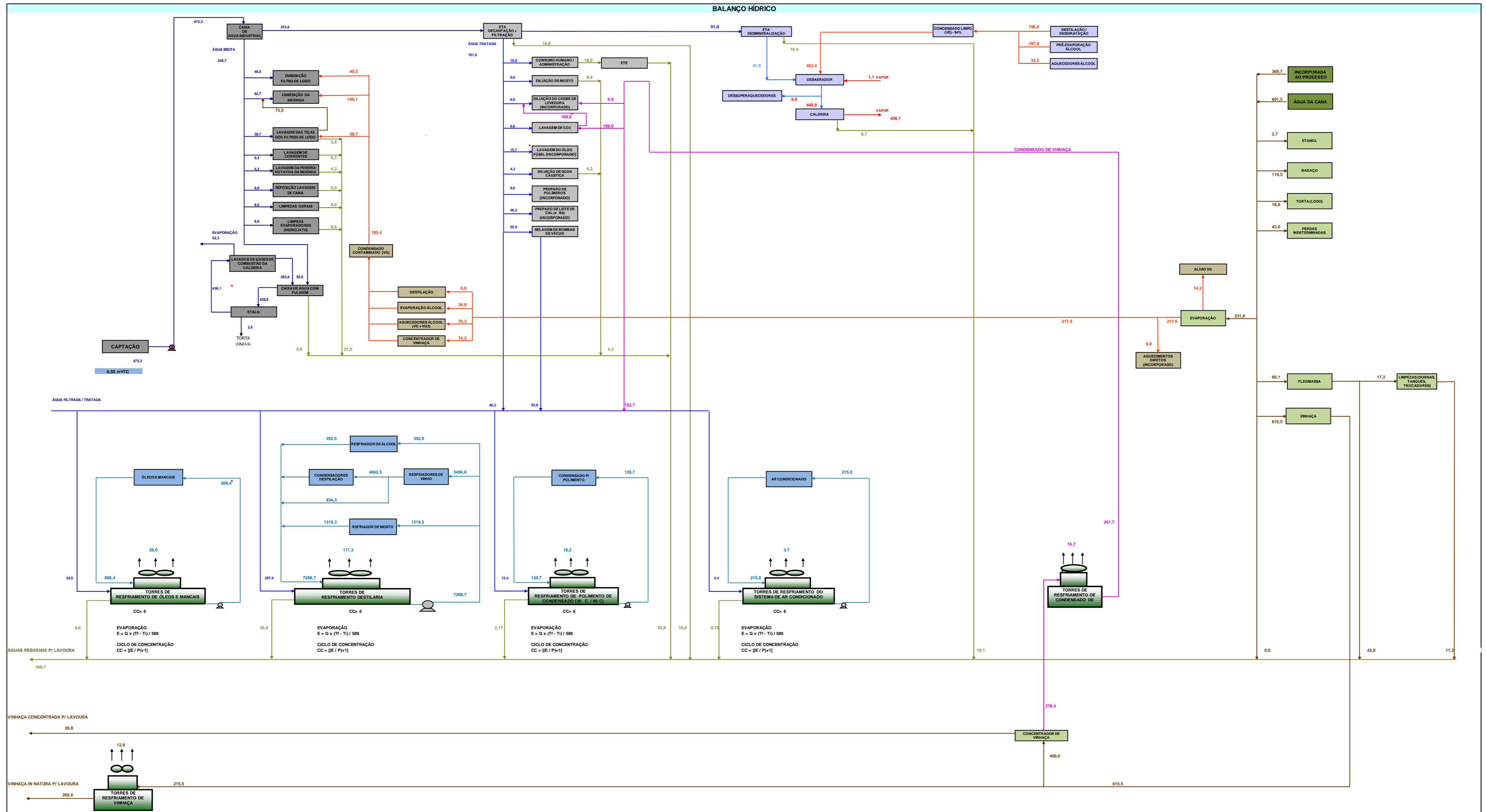


BALANÇO HÍDRICO - ANEXO 6





BALANÇO HÍDRICO - ANEXO 7



BALANÇO HÍDRICO - ANEXO 8

