

BRUNO MORATO MARQUES
GUILHERME BALSEIRO ZIN

DESEMPENHO AMBIENTAL DE UNIDADE INDUSTRIAL DO SETOR
SUCROALCOOLEIRO: PROPOSTA DE TRATAMENTO ANAERÓBIO
DE DIGESTÃO DA VINHAÇA

Projeto de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo, no
âmbito do Curso de Engenharia Ambiental

São Paulo
2016

BRUNO MORATO MARQUES

GUILHERME BALSEIRO ZIN

DESEMPENHO AMBIENTAL DE UNIDADE INDUSTRIAL DO SETOR
SUCROALCOOLEIRO: PROPOSTA DE TRATAMENTO ANAERÓBIO
DE DIGESTÃO DA VINHAÇA

Projeto de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo, no
âmbito do Curso de Engenharia Ambiental

Orientador: Prof. Dr. José Carlos Mierzwa

São Paulo

2016

Catálogo-na-publicação

Marques, Bruno Morato

DESEMPENHO AMBIENTAL DE UNIDADE INDUSTRIAL DO SETOR
SUCROALCOOLEIRO: PROPOSTA DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE
DIGESTÃO DA VINHAÇA / B. M. Marques, G. B. Zin -- São Paulo, 2016.
153 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental.

1.Desempenho Ambiental 2.Sustentabilidade 3.Vinhaça 4.Tratamento
Anaerobio I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia de Hidráulica e Ambiental II.t. III.Zin, Guilherme Balseiro

AGRADECIMENTOS

Este trabalho só foi possível graças aos Professores que ao longo do curso de graduação se empenharam em contribuir com o desenvolvimento acadêmico e ampliação do nível de conhecimento dos alunos, nas disciplinas ministradas no curso de Engenharia Ambiental.

Um agradecimento em especial ao Professor José Carlos Mierzwa, que aceitou prontamente o papel fundamental de orientar nosso trabalho, pela atenção dada em nos esclarecer dúvidas e em nos orientar, sempre com paciência, respeito e compreensão.

Gostaríamos também de agradecer ao Professor Renato Zambon, pelas conversas iniciais, esclarecendo dúvidas e reforçando o papel deste trabalho em nossa graduação, e também em fazer compreender o que era esperado de nós.

Agradecemos também ao Diretor Industrial, Engenheiro Fernando Vicente, pela cessão de dados do objeto de estudo, o que conferiu a este trabalho uma relação com as aplicações dos conhecimentos em atividades práticas do setor sucroalcooleiro.

Por fim, gostaríamos de agradecer ao Professor Theo Syrto Octavio de Souza, e à Luana Di Beo Rodrigues, que aceitaram de imediato o convite para participar da banca examinadora, e que contribuíram para aperfeiçoamento do conteúdo deste trabalho.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO	14
1.1. Introdução.....	14
1.2. Objetivo.....	16
2. LEVANTAMENTO DOS DADOS.....	17
2.1. Definição de Conceitos.....	17
2.2. Perfil do Setor Sucroenergético.....	18
2.2.1. Histórico das Atividades ligadas à Cana-de-Açúcar no Brasil.....	18
2.2.2. Cenário Presente e Perspectivas.....	19
2.3. Descrição do Objeto de Estudo	26
2.4. O Processo Produtivo.....	27
2.4.1. Processo de Industrialização da Cana-de-Açúcar	28
2.4.2. Esquema dos Principais Aspectos Ambientais da Indústria	40
2.5. Dados de Referência e Conformidades Legais: Aspectos e Impactos Ambientais.....	40
2.5.1. Uso da Água e Recursos Hídricos	41
2.5.2. Uso de Energia e Cogeração	45
2.5.3. Emissões Atmosféricas e Qualidade do Ar	47
2.5.4. Resíduos Sólidos	50
2.5.5. Efluentes Líquidos.....	51
3. ANÁLISE DOS DADOS.....	58
3.1. Análise dos Dados do Objeto de Estudo	58
3.1.1. Uso da Água e Recursos Hídricos	58
3.1.2. Uso de Energia e Cogeração	61
3.1.3. Emissões Atmosféricas e Qualidade do Ar	62
3.1.4. Resíduos Sólidos	62
3.1.5. Águas Residuárias	64
3.1.6. Vinhaça	66
3.2. Matriz de decisão	69
3.2.1. Metodologia.....	69
3.2.2. Descrição dos Critérios e Parâmetros de Análise	69
3.3. Resultados.....	70
4. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	72
4.1. Introdução.....	72
4.2. Caracterização da Vinhaça.....	72
4.3 Aspectos Ambientais da Vinhaça	76
4.3.1. Carga Orgânica.....	78

4.3.2. Água.....	78
4.3.3. Sais Inorgânicos.....	79
4.4. Considerações Finais	81
5. OPÇÕES PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA.....	83
5.1. Tratamento Físico-Químico e Concentração	83
5.1.1. Evaporadores de Múltiplo Efeito	84
5.1.2. Processos de Separação por Membranas	85
5.1.3. Tratamento Físico-Químico.....	88
5.2. Tratamento Biológico: Fermentação e Digestão	89
5.2.1. Biodigestão Anaeróbia: Produção de Biogás	90
5.2.2. Fermentação Aeróbia: Produção de Concentrado com Alto Teor Proteico	91
5.3. Aplicação da Vinhaça Bruta na Lavoura	92
5.4. Considerações Finais	92
6. DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO	95
6.1. Introdução.....	95
6.2. Critérios Econômicos	95
6.3. Critérios Técnicos	95
7. ESCOLHA DA SOLUÇÃO	96
8. EPECIFICAÇÃO DA SOLUCÃO.....	98
8.1. Descrição da Solução	99
8.1.1. Biodigestão Anaeróbia: Microbiologia e Bioquímica	99
8.1.2. Fatores que Influenciam o Processo.....	102
8.1.3. Características e Diferenciação de Técnicas	105
8.1.4. Tipos de Biodigestores.....	106
8.1.5. Biodigestão da Vinhaça	111
8.1.6. Tecnologias de Destinação e Aproveitamento do Biogás, Lodo e Efluente Gerados	113
8.1.7. Justificativa.....	117
8.2. Dimensionamento e Avaliação Técnica	118
8.2.1. Dados Utilizados	118
8.2.2. Critérios Técnicos de Dimensionamento.....	121
8.2.3. Dimensionamento	121
8.2.4. Estimativas.....	125
8.3. Apresentação dos Resultados	135
9. CONCLUSÕES / RECOMENDAÇÕES	142
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144
ANEXO I	149

RESUMO EXECUTIVO

Através de uma análise envolvendo dados de referência e conformidades legais, em relação aos aspectos e impactos ambientais relacionados às atividades do setor sucroalcooleiro, a vinhaça foi destacada como o principal desafio da atividade atualmente, em termos de desempenho ambiental.

Uma vez definido o problema, fez-se uma revisão bibliográfica e pesquisa das diferentes técnicas com vistas a obter-se melhoras de desempenho associadas a esse resíduo, através da recuperação de recursos, como energia, água, nutrientes, combustível e recursos financeiros. Através de uma metodologia de critérios, pontuação e matriz de decisão, foi escolhido o sistema de tratamento anaeróbio de biodigestão com reatores do tipo UASB, a partir de diferentes critérios técnicos e econômicos.

Essa técnica permite redução, de cerca de 75%, da carga orgânica presente na vinhaça, produzindo biogás que pode ser utilizado para a geração de diferentes formas de energia, inclusive como combustível veicular. O processo gera lodo estável e efluente líquido que podem ainda ser tratados, ou serem queimados em caldeira e utilizados na fertirrigação, respectivamente.

Utilizando-se de dados obtidos junto ao objeto de estudo e com o complemento e respaldo de dados e critérios técnicos da bibliografia foi realizado o dimensionamento do sistema de reatores e número de distribuidores, bem como uma série de estimativas de caráter técnico e econômico acerca do sistema de tratamento anaeróbio, lavagem de gases, moto geradores de energia elétrica e utilização do biogás como combustível veicular.

Apesar de existirem, ainda, poucos estudos e casos reais semelhantes ao projeto proposto, este se mostrou eficaz naquilo que se propôs, viável economicamente e apresentando significativa melhora no desempenho ambiental da indústria.

Palavras-chaves: *cana de açúcar, etanol, vinhaça, biogás, biodigestão, biodigestores, reatores anaeróbios, geração de energia, fontes de energia alternativas, biocombustíveis.*

ABSTRACT

Through an analysis, involving reference data and legal compliance in relation to the environmental aspects and impacts related to the activities of the sugar and alcohol sector, this study concludes that the vinasse is, currently, the main challenge of this industrial activity, in terms of environmental performance.

Once the problem is defined, a bibliographical review and research of the different techniques are made in order to obtain performance improvements associated with this residue, through the recovery of resources such as energy, water, nutrients, fuel and financial resources. The anaerobic treatment system by biodigestion with UASB-type reactors is chosen, based on different technical and economic criteria.

This technique allows a reduction of about 75% of the organic load present in the vinasse, producing biogas that can be used for the generation of different forms of energy, such as vehicular fuel. The process generates stable sludge and liquid effluent that can be further treated, or burned in boiler and used in the fertigation, respectively.

Using data obtained from the object of study and with the complement and support of data and technical criteria of the bibliography, the design of the reactor system and the number of distributors is done. A number of technical and economic estimates are also made of anaerobic treatment systems, gas scrubbers, electric motor generators and the use of biogas as vehicle fuel.

Although there are still few studies and real cases similar to the proposed project, this proved to be quite effective in what was proposed, economically feasible and showing significant improvement in the environmental performance of the industry.

Keywords: *sugar cane, ethanol, vinasse, biogas, biodigestion, biodigestors, anaerobic reactors, power generation, alternative energy sources, biofuels.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolução do Processamento de Cana e da Produção de Açúcar e Etanol. Fonte:.....	20
Figura 2. Destinação da Cana-de-Açúcar	21
Figura 3. Produção, Área e Produtividade Brasileira de Cana-de-Açúcar.....	22
Figura 4. Produção Global de Etanol.	23
Figura 5. Consumo Doméstico de Etanol Anidro e Hidratado	24
Figura 6. Diagrama de Distribuição de Energia na Usina	24
Figura 7. Evolução da Quantidade de Energia Comprada pela CPFL das Usinas Paulistas.	26
Figura 8. Processo Produtivo Simplificado.....	28
Figura 9. Fluxograma dos Setores de Recepção, Preparo da Cana e Extração do Caldo.	29
Figura 10. Fluxograma do Tratamento do Caldo. Etapas: Pré-Aquecimento, Sulfitação e Caleação.	30
Figura 11. Fluxograma de Tratamento do Caldo. Etapas: Aquecimento e Decantação.	31
Figura 12. Fluxograma dos Setores de Tratamento do Caldo (Lavagem da Torta). .	31
Figura 13. Fluxograma do Setor de Evaporação do Caldo da Fábrica de Açúcar..	32
Figura 14. Fluxograma dos Setores de Cozimento, Cristalização e Centrifugação da Fábrica de Açúcar.	33
Figura 15. Fluxograma do Setor de Secagem e Ensaque do Açúcar	34
Figura 16. Fluxograma das Operações de Preparo e Tratamento do Mosto para Fermentação.	35
Figura 17. Fluxograma das Operações de Fermentação do Mosto.	36
Figura 18. Fluxograma das Operações de Destilação do Etanol.	37
Figura 19. Fluxograma das Operações do Setor de Produção de Energia.	38
Figura 20. Esquema de uma ETA Convencional.	39
Figura 21. Principais Aspectos Ambientais da Indústria Sucroenergética.....	40
Figura 22. Curva de tendência do decréscimo da captação de água na indústria canavieira.	42
Figura 23. Distribuição Média dos Usos Setoriais de Água nas Setoriais de Água na Indústria Sucroenergética	44
Figura 24. Distribuição Média dos Usos Pontuais de Água na Indústria Sucroenergética.	44
Figura 25. Balanço Médio Global de Água nas Indústrias Sucroenergéticas	45
Figura 26. Balanço Energético: Energia Contida no Etanol por Unidade de Energia Fóssil Usada para Produzi-lo.	46
Figura 27. Variação do custo da fertirrigação com vinhaça natural com a distância média de aplicação e distância econômica em relação à adubação mineral.	55
Figura 28. Foto de um dos Medidores de Vazão	59
Figura 29. Captação de Água/Cana Processada x Ano	59
Figura 30. Sistema de Carregamento de Caminhões com Resíduos destinados à Fertirrigação.	63
Figura 31. Sistema de Separação de Partículas da Água.....	64
Figura 32. Estação de Tratamento de Esgoto.....	65

Figura 33. Captação de Água e Águas Residuárias Destinadas para Uso Agrícola:	66
Figura 34. Tanques, Canais e Caminhões utilizados para o Transporte e Armazenamento da Vinhaça.	67
Figura 35 – Variações anuais das Taxas Máxima, Mínima e Média de geração de Vinhaça.	74
Figura 36. Tanque de vinhaça da Usina de Cerradinho de Potirendaba.	76
Figura 37. Evolução da produção anual de etanol e da geração da vinhaça pela indústria canavieira no Brasil de 1967 a 1997. Médias em milhares de litros para safras agrupadas em quinquênios.	77
Figura 38. Produção brasileira de etanol, vinhaça e potássio	80
Figura 39. Diagrama Evaporadores de Múltiplo Efeito.	85
Figura 40. Técnicas de Separação por Membranas	86
Figura 41. Esquema Básico do Processo de Separação por Membranas.	87
Figura 42. Comparação entre Processos Convencional e Modo Tangencial.	88
Figura 43. Etapas da Fermentação anaeróbia para produção de metano	100
Figura 44: Representação de Biorreator de Fluxo Ascendente de Manta de Lodo (UASB).	108
Figura 45. Corte Lateral de Reator Convencional de Mistura Completa.	109
Figura 46. Esquema de Biodigestor Modelo Indiano.	110
Figura 47. Esquema do corte lateral do biodigestor modelo Chinês.	111
Figura 48. Esquema Básico da Biodigestão Anaeróbica da Vinhaça	113
Figura 49. Etapas de Produção e Utilização do Biogás.	114
Figura 50 - Planta e Corte do Reator UASB Proposto	124
Figura 51. Caminhão Bicombustível Dual Fuel	135
Figura 52: Fluxograma dos Processos e Sistemas Propostos	137
Figura 53. Gráfico PLD de Agosto de 2009 a Setembro de 2014 divulgados pela CCEE.	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados Gerais de Produção	27
Tabela 2. Usos Médios da Água em Unidades Produtoras de Açúcar e Etanol.....	43
Tabela 3. Autoconsumo de Energia no Processamento Industrial da Cana.	47
Tabela 4. Estimativa da Quantidade de Vapor Necessário para o Processo (Mix de 50% de Produção Entre Etanol e Açúcar).....	47
Tabela 5. Padrões Legais de Emissão de Poluentes Atmosféricos para a Caldeira a Bagaço (existentes e novas) e Padrões de Qualidade do Ar das Legislações Federal e do Estado de São Paulo.....	48
Tabela 6. Características dos Retentores de Fuligem Via Úmida	49
Tabela 7. Carga Orgânica Potencial e Remanescente e o Equivalente Populacional dos Despejos da Indústria Sucroalcooleira (base 1997).	52
Tabela 8. Resumo das Características dos Despejos de Usinas e Destilarias em Geral.	52
Tabela 9. Evolução da Característica Físico-Química Média das Águas Residuárias Industriais Enviadas para a Lavoura de Cana.....	53
Tabela 10. Resultados Físico-Químicos da Flegmaça.....	53
Tabela 11. Resumo das Características da Vinhaça.	54
Tabela 12. Características Quali-Quantitativas de Vinhaça Procedentes de Mostos de Melaço, Caldo e Misto.....	57
Tabela 13. Balanço Hídrico do Objeto de Estudo no ano de 2014.....	60
Tabela 14. - Comparação entre Indicadores do Objeto de Estudo e Dados de Referência.....	60
Tabela 15. Quantidade de Energia Elétrica Consumida e Exportada	61
Tabela 16. Tipos de Uso de Energia	61
Tabela 17. Geração e Caracterização da Vinhaça Gerada no Objeto de Estudo	68
Tabela 18. Resultados da Análise da Vinhaça. Fonte: Objeto de Estudo.	68
Tabela 19. Notas e Critérios Utilizados na Matriz de Decisão do Problema a ser Tratado.....	70
Tabela 20. Resultados da Matriz de Decisão do Problema a ser Tratado.	71
Tabela 21. Caracterização físico-química da vinhaça nos levantamentos realizados pelo CTC. Fonte: ANA, 2009.....	75
Tabela 22. Características Quali Quantitativas da Produção de Vinhaça do Objeto de Estudo	82
Tabela 23. Classificação dos Biodigestores.....	90
Tabela 24. Vantagens e Desvantagens das Opções de Destinação da Vinhaça.....	93
Tabela 25. Pontuações Relativas aos Critérios de Avaliação Para Escolha da Solução.	96
Tabela 26. Pontuação das Opções de Solução do Problema. Fonte: Autores.....	97
Tabela 27. Classificação das técnicas conforme critérios	105
Tabela 28. Dados Utilizados Para Dimensionamento e Estimativas	119
Tabela 29. Apresentação dos Resultados.....	136
Tabela 30. Características Físico-Químicas da Vinhaça.....	139
Tabela 31. Comparação Entre os Custos de Produção.	140

LISTA DE SÍMBOLOS

PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

CNUMAD - Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento

P+L - Produção mais Limpa

IAA - Instituto do Açúcar e do Alcool

CTC - Centro de Tecnologia Canavieira

PROÁLCOOL - Programa Nacional do Alcool

PIB - Produto Interno Bruto

Ridesa - Rede Interuniversitária do Desenvolvimento Sucroenergético

IAC - Instituto Agrônomo de Campinas

CPFL - Companhia Paulista de Força e Luz

Brix - Porcentagem de Sólidos Solúveis no Caldo;

Pol - Porcentagem de Sacarose Aparente no Caldo

ETA - Estação de Tratamento de Água

ETE - Estação de Tratamento de Esgoto

SNGRH - Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

MP - Material Particulado

PCI - Poder Calorífico Inferior

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

PAV - Plano de Aplicação da Vinhaça

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO - Demanda Química de Oxigênio

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

T.A.S.T.E. - Thermally Accelerated Short Time Evaporator

RALF - Reator Anaeróbico de Manta de Lodo e Fluxo Ascendente

UASB - Upflow Anaerobic Sludge Blanket

COV - Carga Orgânica Volumétrica

CHV - Carga Orgânica Volumétrica

Q - Vazão

V - Volume

Θ_h - Tempo de Retenção Hidráulico

S - Concentração de Substrato

H - Altura do Reator

v - Velocidade de Escoamento

D - Diâmetro do Reator

N_d - Número de Distribuidores

A_i - Área de Influência de cada Tubo Distribuidor

E_{DQO} - Eficiência de redução de DQO

TDH - Tempo de Detenção Hidráulico

PLD - Preço de Liquidação das Diferenças

PL: Produção de lodo

Y: Coeficiente de Produção de Sólidos

TS: Teor de Sólidos Secos

ρ : Densidade

PB: Produção de Biogás

CO: Carga Orgânica

F: Fator de conversão de biogás por kg DQO removida

FVM: Fração Volumétrica de Metano (CH₄) no Biogás

α : Grau de Pureza do Biogás

GEB: Quantidade de energia contida no biogás

PCIB: Poder calorífico Inferior do Biogás

R: Receita anual da venda de Energia Elétrica Gerada pelo Biogás

DO: Dias por ano de operação da usina

E: Energia Elétrica Gerada por Dia

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO

1.1. Introdução

A humanidade satisfaz suas necessidades, em constante evolução, através da extração de bens materiais da natureza, e sua utilização como recursos, conforme o conhecimento tecnológico e do engenho humano adquiridos para realizá-lo. A Primeira Revolução Industrial adveio da descoberta da máquina a vapor, associada ao carvão como fonte principal de energia. A partir da Segunda Revolução Industrial o petróleo e seus derivados impulsionaram o desenvolvimento da humanidade, ocasionando um crescimento exponencial da população, aliado à crescente demanda por recursos energéticos.

À medida que estes recursos tornaram-se mais escassos e caros, aumentou a procura por meios de se obter energias alternativas e renováveis, que não se esgotassem. São consideradas energias renováveis aquelas formas de energia em que a taxa de utilização é menor que sua taxa de reposição. As mais conhecidas são a energia eólica, a energia solar, hidroenergia e energia de biomassa. Energia de biomassa se define como a energia química armazenada pelas plantas na forma de carboidratos através da fotossíntese. Esta energia pode ser aproveitada através da combustão de biomassa em suas formas primárias, ou de seus derivados. Pode-se produzir biogás pela fermentação metanogênica de biomassa em biodigestores; carvão vegetal pela pirólise em câmaras de carbonização; e biocombustíveis por diversos processos químicos.

A partir da segunda metade do século XX, intensificou-se a percepção acerca dos impactos ambientais relacionados à exploração de recursos naturais. Em virtude dessa preocupação, o meio ambiente passou a ser tema de conferências e reuniões de líderes. Considerando as relações entre o ser humano e a natureza começaram a ser definidos novos rumos que contemplassem as questões ambientais nas atividades humanas (RIBEIRO, 2011).

O conceito de “Desenvolvimento Sustentável” foi formulado e explicitado somente em 1987, no relatório “Nosso Futuro Comum”, resultado de uma série de seminários realizados para a discussão da relação do homem com o meio ambiente, propostos pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - PNUMA. Introduzido na década de 80 e amplamente difundido e divulgado, o termo “Desenvolvimento Sustentável” se consolidou em 1992 na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento - CNUMAD, realizada em 1992 no Rio de Janeiro (CMMAD, 1991).

A partir da CNUMAD, o desenvolvimento sustentável passou a ser um consenso entre os líderes políticos mundiais e, portanto, a relação indissolúvel entre meio ambiente e crescimento econômico estava estabelecida. A partir desse momento, estava lançado o desafio aos países industrializados, principais responsáveis pela alteração da qualidade do Meio Ambiente, em reduzir o consumo de recursos, aumentar a eficiência de seus processos e reduzir a emissão de poluentes e geração de resíduos, aliando o desenvolvimento econômico à sustentabilidade. A principal contribuição da conferência foi estabelecer as bases para o alcance do desenvolvimento sustentável (CAMARGO, 2002), fixando direitos e obrigações individuais e coletivas. O resultado foi documentado na Agenda 21, tratando-se de um plano de ação para alcançar a sustentabilidade (AGENDA 21,1995).

A interação das atividades do setor sucroenergético com o meio ambiente, sociedade e economia, é bastante complexa. Os impactos relacionados se referem ao uso de recursos materiais (principalmente água e energia), impactos no meio ambiente (qualidade do ar, clima global, suprimento de água, ocupação do solo e biodiversidade, preservação de solos, uso de defensivos e fertilizantes), impactos nas ações comerciais (competitividade e subsídios), e impactos socioeconômicos (geração de emprego e renda) (UNICA, 2005).

A produção e o uso do etanol combustível no Brasil, desde 1975, constituem o mais importante programa de combustível comercial renovável implementado no mundo até hoje. Esse sucesso corrobora com o reconhecimento do país internacionalmente pela sua matriz energética renovável, aliado ao interesse crescente na substituição de derivados de petróleo, na redução da emissão de gases poluentes e na mitigação do efeito estufa (UNICA 2007).

No entanto, a indústria da cana de açúcar foi, por muito tempo, marcada pelo retrocesso tecnológico e baixa eficiência produtiva. Desperdícios no manejo da cana de açúcar, na má gestão de recursos, na falta de investimentos de reaproveitamento energéticos e no mau controle de seus armazéns (GEHRING, 2014).

A evolução do setor nos últimos trinta anos, e as perspectivas para o seu crescimento nos próximos anos evidenciam seu papel estratégico na matriz energética brasileira, e exige a aplicação, dentro dos processos, dos conhecimentos acumulados nas últimas décadas sobre a relação das atividades deste setor com a natureza (UNICA, 2005), no sentido de tornar a produção mais limpa, usando recursos com eficiência, diminuindo a geração de resíduos e proporcionando os seus devidos tratamentos e destinações.

Atualmente há um conjunto de ações que já são tomadas em toda a cadeia produtiva do setor sucroenergético no Brasil visando a sustentabilidade, além de muitos potenciais a serem explorados neste sentido, que o tornam um exemplo no contexto internacional e uma promessa para um futuro sustentável. (UNICA, 2005).

Vale destacar que o aumento da eficiência da indústria sucroenergética aumenta a competitividade do álcool Brasileiro no mercado exterior, mercado este

que já sofre com a competição com os combustíveis derivados da gasolina (GEHRING, 2014).

Sabe-se que a indústria sucroalcooleira produz efluentes com altas cargas orgânicas e é caracterizada pelo grande consumo de água em sua cadeia produtiva. Sob essa perspectiva nota-se a possibilidade técnica e econômica de se implantar sistemas, visando um aumento de eficiência e desempenho ambiental. Dentre eles, destaca-se o tratamento anaeróbio de efluentes orgânicos, já utilizado em outros tipos de indústrias e como tratamento complementar para esgotos sanitários. Esse tratamento permite, além de uma preparação para outros tratamentos, a produção de biogás, importante fonte energética renovável e uma significativa redução de indicadores de carga orgânica (GEHRING, 2014).

Tendo em vista as considerações feitas acima, foi escolhida para o estudo de caso uma unidade produtiva de açúcar cristal, etanol anidro e hidratado de primeira geração, e eletricidade por cogeração a partir da queima de biomassa. A unidade está localizada no interior do estado de São Paulo, na região de Ribeirão Preto.

1.2. Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho ambiental de uma unidade industrial do setor sucroalcooleiro e energético e propor um sistema, ou técnica, que implique em ganhos relevantes em termos de eficiência, reuso ou recuperação de recursos e sustentabilidade, considerando a viabilidade técnico econômica e à luz dos conhecimentos de base da Engenharia Ambiental. Para tanto, pretende-se avaliar os principais processos industriais, aspectos e impactos ambientais associados à atividade em questão e compreender a relevância dos mesmos.

2. LEVANTAMENTO DOS DADOS

Faz-se, nesse capítulo, uma revisão bibliográfica de termos relacionados aos conceitos de sistema de gestão ambiental e desempenho ambiental, seguido de uma caracterização geral do setor estudado. Posteriormente, descreve-se o objeto de estudo, os processos produtivos e problemas ambientais relacionados. Por fim, apresentam-se indicadores e padrões, com valores de referência, relacionados aos principais aspectos e impactos ambientais.

2.1. Definição de Conceitos

As análises e considerações serão feitas à luz dos conceitos descritos a seguir.

Desenvolvimento Sustentável - O desenvolvimento que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades. (CMMAD, 1991)

Sistema de Gestão Ambiental - Aquela parte do sistema de gestão global que inclui a estrutura organizacional, o planejamento de atividades, as responsabilidades, as práticas, os procedimentos, os processos e os recursos para desenvolver, conseguir implementar, analisar criticamente e manter a política ambiental. (ISO14001)

Desempenho Ambiental - Resultados mensuráveis do sistema de gestão ambiental, relacionados com o controle da organização sobre os aspectos ambientais, baseados na sua política, seus objetivos e metas. (ISO14001)

Produção mais Limpa (P+L) - Parte integrante da gestão ambiental, na qual as empresas podem reduzir seu consumo de matérias-primas, água e energia, minimizar a geração de resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões atmosféricas e até aumentar sua produtividade, obtendo não apenas a adequação ambiental mas também a redução de custos de produção, entre outros possíveis benefícios.

Prevenção à Poluição - Uso de processos, práticas, materiais ou produtos que evitam, reduzem ou controlam a poluição, os quais podem incluir reciclagem, tratamento, modificações de processo, mecanismos de controle, uso eficiente de recursos e substituição de materiais. (ISO14001)

O trecho abaixo, extraído da dissertação intitulada “O processo de certificação ISO 14001 nas práticas de gestão ambiental em uma indústria sucroalcooleira do Estado de Minas Gerais” (Melo, Silvia Barbosa - FECAP, 2009), ilustra as perspectivas deste trabalho:

“Os sistemas de gestão integrada dos aspectos ambientais proporcionam eficácia às práticas e influenciam, positivamente, não somente os aspectos de ordem ambiental, mas social e econômico, pois a gestão integrada visa corrigir problemas relacionados ao meio ambiente, decorrentes da produção e consumo de bens que geram contaminações físicas e/ou externalidades negativas e, conseqüentemente, beneficia a sociedade, gera vantagens econômicas com o aumento da lucratividade, redução de custos e maior competitividade.”

2.2. Perfil do Setor Sucroenergético

2.2.1. Histórico das Atividades ligadas à Cana-de-Açúcar no Brasil

A cana-de-açúcar é originária da região das Índias. A fabricação de açúcar data de 6 mil anos a.C, mas se manteve razoavelmente pouco importante até que os indianos descobriram métodos de transformar caldo de cana em cristais de açúcar, mais fáceis de armazenar e transportar. Em 700 d.C., o açúcar já era comercializado com a China. No século XII, foi trazido para a Europa pelos Cruzados, e ao final do século XV, já era produzido neste continente. Com as grandes navegações, o cultivo da cana foi inserido na América Central, tornando o açúcar um produto muito importante para as metrópoles europeias (ANA, 2009).

No Brasil, as primeiras mudas da planta foram introduzidas em 1532, no início da colonização portuguesa. O cultivo da cana se espalhou principalmente pelo nordeste brasileiro, devido às condições climáticas favoráveis e proximidade com o continente europeu, utilizando-se de mão de obra escrava africana. Inicialmente o açúcar era processado em engenhos tradicionais bastante rudimentares, com moendas de madeira, movidas por animais ou rodas d'água, e assim permaneceu durante o período colonial. O ciclo do açúcar no Brasil entrou em declínio entre o final do século XVIII até o final do século XIX, após crescimento do mercado do açúcar de beterraba na Europa, principal consumidor mundial na época (ANA, 2009).

Após a Revolução Industrial o processamento da cana teve um grande salto tecnológico, com a modernização de equipamentos que substituíram a força motriz, animal ou gravitacional, por energia a vapor. Apesar de uma certa resistência dos produtores brasileiros em aderir às novas tecnologias, no início do século XX, os principais engenhos brasileiros transformaram-se em “Usinas de Açúcar”, caracterizadas pela utilização de equipamentos modernos, e produção em larga escala (ANA, 2009).

A reestruturação do setor agroindustrial canavieiro brasileiro se deu através de forte intervenção do Estado, a partir de 1933, no governo de Getúlio Vargas, com a criação do Instituto do Açúcar e do Alcool - IAA, que assumiu a produção, comercialização, fixação de preços e cotas de importação e exportação do produto.

A justificativa para a criação do IAA estava na necessidade de equilibrar o mercado de açúcar, devido a sua importância econômica. A produção nacional excedia a necessidade de consumo, e o mercado internacional não estava em bom momento, devido à recessão econômica após a crise de 1929. A solução foi favorecer a produção de etanol a partir da cana, determinando a mistura de 5% do biocombustível na gasolina (UNICA, 2007).

O etanol foi ganhando cada vez mais espaço, em virtude da dificuldade da exportação de derivados do petróleo no período da segunda guerra mundial. Então, em 1959 é fundada a COPERSUCAR, cooperativa de usineiros que teve papel fundamental na busca de inovação tecnológica para o setor sucroalcooleiro, principalmente no processo agrícola. Em 1970 é criado o Centro de Tecnologia Canavieira - CTC (antigo Centro de Tecnologia Coopersucar), responsável por incentivar a pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias para o setor, muitas das quais utilizadas até hoje no país, incluindo o desenvolvimento de novas variedades de cana (ANA, 2009).

A alta nos preços do petróleo, conhecida como “choques do petróleo”, em 1973 e 1978, incentivou a criação em 1975 do Programa Nacional do Alcool - PROÁLCOOL, *“visando ao atendimento das necessidades do mercado interno e externo e da política de combustíveis automotivos”*. A base do programa era estimular a produção de etanol e, para tanto, expandir a oferta de matéria-prima (aumento da produção agrícola da cana), além de incentivos à modernização e ampliação de destilarias existentes e instalação de novas unidades produtivas (UNICA, 2007). No começo dos anos 1990 um novo modelo entrava em vigor: com a extinção do IAA, o Estado deixava de ser o regulador, passando o mercado a ser o autorregulador da produção de açúcar e etanol.

2.2.2. Cenário Presente e Perspectivas

Atualmente, o setor sucroenergético no Brasil conta com 379 unidades produtoras no país (SAPCANA, 2016) gerando mais de 900 mil empregos formais, além de aproximadamente 70 mil produtores independentes de cana-de-açúcar (MTE, 2014). O valor bruto, movimentado pela cadeia produtiva do setor, supera US\$ 100 bilhões, e um PIB de aproximadamente US\$ 43 bilhões (montante equivalente a cerca de 2% do PIB brasileiro) (NEVES, 2014).

Há dois principais pólos produtores no país, a região Centro-Sul e a região Norte-Nordeste, sendo esta última muito menos relevante (ANA, FIESP, UNICA e CTC, 2009). A região Centro-Sul (composta pelos Estados das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste) responde por 90% do volume de produção, enquanto que os 10% restantes cabem aos Estados da região Norte-Nordeste (UNICA, 2007).

Evolução do Processamento de Cana e da Produção de Açúcar e Etanol

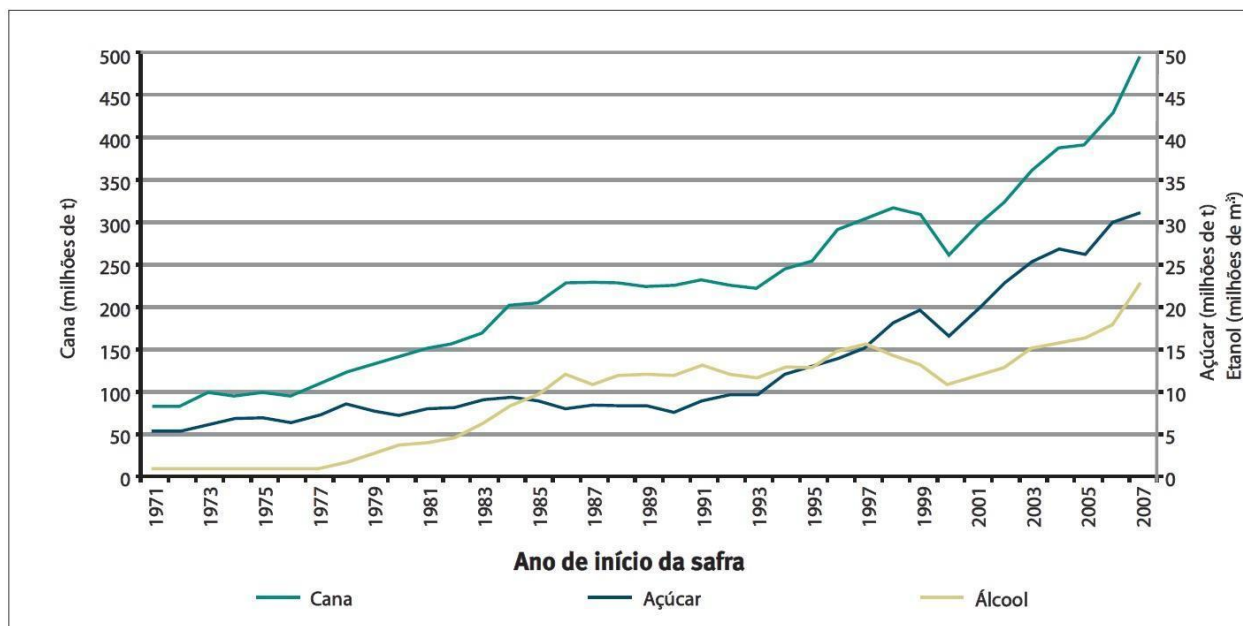


Figura 1. Evolução do Processamento de Cana e da Produção de Açúcar e Etanol. Fonte: ANA, 2009.

A Figura 1 mostra a evolução do novo ciclo de crescimento, iniciado por volta de 1995, principalmente devido ao aumento da exportação de açúcar e do grande aumento do consumo de etanol no mercado interno, com os novos motores bicomcombustíveis.

Uma característica inerente ao setor é a sua variabilidade em termos da proporção entre seus produtos, uma vez que a partir da cana podem-se obter diferentes produtos a partir de processos produtivos em comum ou complementares. Essa variação sofre influência direta de fatores macroeconômicos e financeiros, como o preço mundial do açúcar, que é uma *commodity*, e o preço do barril de petróleo. Na Figura 2, apresentam-se projeções para o destino percentual da cana-de-açúcar para a produção de açúcar ou etanol, no Brasil (FIESP, 2013).



Figura 2. Destinação da Cana-de-Açúcar Fonte: FIESP, 2013.

2.2.2.1. Cana, Açúcar e Etanol

A cana-de-açúcar é uma cultura semiperene, pois após o plantio, ela é cortada várias vezes antes de ser replantada. Seu ciclo produtivo é, em média, de seis anos com cinco cortes. De maneira geral, a produtividade agrícola da cana-de-açúcar apresenta uma acentuada variabilidade que ocorre em função de diversos fatores, como é o caso das características da variedade plantada, da composição e quantidade do adubo aplicado, das propriedades físico-químicas do solo, do manejo das pragas e plantas invasoras, da disponibilidade hídrica e das técnicas de plantio, tratos culturais e colheita adotada. Devido ao *know-how* adquirido ao longo de anos de observação e análise, a produtividade da cultura tem atingido excelentes resultados, como mostrado na Figura 3:

Produção, Área e Produtividade Brasileira de Cana de Açúcar



Figura 3. Produção, Área e Produtividade Brasileira de Cana-de-Açúcar. Fonte: FIESP, 2013.

O país conta hoje com três principais programas de melhoramento genético de cana-de-açúcar: o programa da Rede Interuniversitária do Desenvolvimento Sucroenergético (Ridesa), o do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) e o do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). As principais tecnologias com potencial de contribuição para a produtividade e sustentabilidade da cana-de-açúcar estão associadas com o melhoramento genético, o gerenciamento agrícola, as técnicas de plantio, os tratos culturais e a colheita (ANA, FIESP, UNICA e CTC, 2009).

O açúcar é um importante complemento energético alimentar e é amplamente utilizado para consumo doméstico e pela indústria alimentícia. O Brasil é o maior produtor e exportador de açúcar do mundo. Na safra 2014/2015, o país atingiu a marca de cerca de 630 milhões de toneladas processadas e de produção de cerca de 36 milhões de toneladas de açúcar. Exportou-se quase $\frac{2}{3}$ dessa quantidade, quantias essas equivalentes a 20% e 40% da produção e exportação global, respectivamente (SAPCANA, 2015).

O etanol, ou álcool etílico, é um tipo de álcool e se caracteriza por ser uma substância pura, composta por um único tipo molecular (diferentemente da gasolina, por exemplo), o qual contém dois átomos de carbono, cinco átomos de hidrogênio e um grupo hidroxila: C_2H_5OH (UNICA, 2007). É importante lembrar da diferenciação entre o etanol anidro (ou álcool etílico anidro) e o etanol hidratado (ou álcool etílico hidratado). Essa diferença se dá principalmente pela diferença no teor de água das duas modalidades: enquanto o etanol anidro, que pode ser misturado à gasolina, tem em torno de 0,5%, em volume, o etanol hidratado, vendido nos postos de combustíveis, apresenta cerca de 5% de água, em volume (UNICA, 2007). Além

disso, esses tipos diferem no processo de produção industrial: o etanol hidratado sai diretamente das colunas de destilação, enquanto o etanol anidro passa por um processo adicional que retira a maior parte da água presente (UNICA, 2007).

O etanol brasileiro é destinado, em parte, para a exportação e em parte para suprir o mercado interno, sendo nesse último destinado principalmente para uso como combustível, além de outros setores, de menor relevância, como indústria de bebidas, farmacêutica e química.

Na Figura 4 (EIA, 2016), apresenta-se a produção global de etanol (em galões), mostrando que o Brasil é o segundo maior produtor mundial, com um volume de 28 bilhões de litros produzidos na safra 2014/2015 (SAPCANA, 2015).

De acordo com as projeções apresentadas na Figura 5 (FIESP, 2013), o consumo doméstico de etanol deverá aumentar significativamente nos próximos anos e conjunturas indicam que, a médio e longo prazo, o consumo mundial de etanol aumentará substancialmente e o Brasil é apontado como protagonista nesse cenário (ANA, FIESP, UNICA e CTC, 2009).

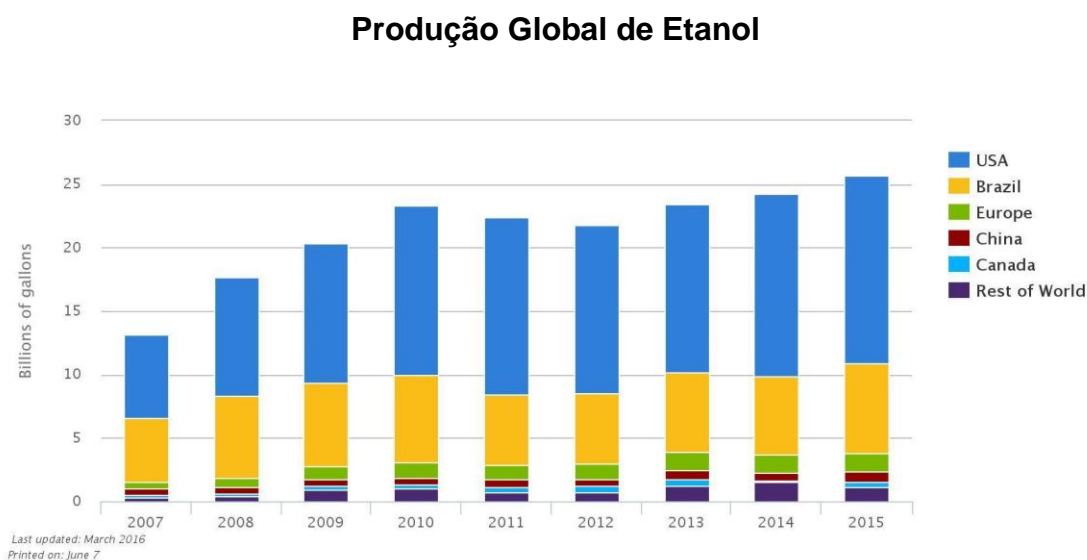


Figura 4. Produção Global de Etanol.

Fonte: EIA, 2016.

Consumo Doméstico de Etanol Anidro e Hidratado



Fonte: Outlook Fiesp Elaboração: FIESP/DEAGRO e MBAGRO

Figura 5. Consumo Doméstico de Etanol Anidro e Hidratado

2.2.2.2. A Energia da Cana-de-Açúcar e Cogeração

A cana-de-açúcar possui em sua biomassa uma quantidade de energia que pode ser aproveitada quase na sua totalidade através de processos industriais estabelecidos e bem estudados, com alta taxa de eficiência deste potencial energético.

A Figura 6 mostra o diagrama de distribuição de energia total em uma usina.

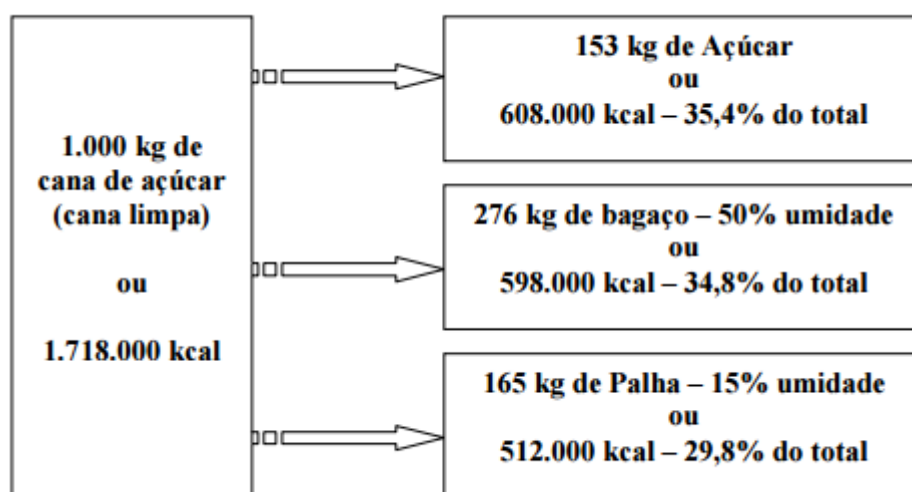


Figura 6. Diagrama de Distribuição de Energia na Usina Fonte: DEDINI, 2016.

Notas: a) 1 kcal = 4,1868 kJ;

b) Considerada a totalidade da palha, incluindo pontas e folhas;

c) A umidade de 50% do bagaço é o valor médio obtido na saída do 6 terno de moendas.

d) A umidade de 15% da palha é o valor obtido para a palha seca no campo ao sol.

e) Fonte: International Sugar Journal / DEDINI

Os valores equivalentes de energia indicam que ela se encontra dividida igualmente entre o caldo, o bagaço, e a palha. Podemos fazer uma comparação do conteúdo energético de uma tonelada de cana-de-açúcar, 1.718.000 kcal, com o potencial energético de um barril de petróleo que é de 1.386.000 kcal, ou seja, uma tonelada de cana equivale energeticamente a 1,24 barris de petróleo bruto (ANP, 2016).

Considerando que a produção da safra de 2014/15 foi de 630 milhões de toneladas, temos que, em equivalentes energéticos, esta safra correspondeu a 781,2 milhões de barris de Petróleo ou 2,14 milhões de barris / dia, valor considerável, próximo ao consumo nacional de petróleo, que foi de 2,93 milhões de barris /dia (ANP, 2016).

A geração de energia elétrica se dá a partir da combustão da biomassa, principalmente o bagaço, em caldeiras, que utilizam o desprendimento de calor para evaporar água, em seguida utilizando o vapor para movimentar máquinas, fornecer energia térmica para processos, e gerar energia em turbogeradores. Esta é suficiente não só para consumo próprio, como gera um excedente, que é vendido à concessionária de energia. Esse produto, principal fonte de energia renovável do país, representa 15,7% da matriz energética nacional (SAPCANA, 2015).

A partir de 1999, com a privatização do setor de energia elétrica, criou-se a figura do Produtor Independente de Energia, abrindo um novo mercado para as usinas. Esta nova condição foi o incentivo para que as usinas modificassem o seu sistema de geração de vapor e energia, passando de uma configuração de baixa eficiência, que tinha por finalidade consumir o bagaço gerado, para uma nova concepção onde se procura utilizar o bagaço excedente para a geração de energia elétrica.

Aproximadamente, 60% das usinas brasileiras estão instaladas no Estado de São Paulo, na área de atuação da CPFL Energia S/A (Companhia Paulista de Força e Luz), sendo esta companhia a maior compradora da energia gerada nas usinas. A Figura 7 abaixo indica a evolução do total de energia comprado pela CPFL das usinas instaladas nesta área, o qual mostra o grande salto ocorrido a partir do ano 2000.

Evolução da Quantidade de Energia Comprada pela CPFL das Usinas Paulistas

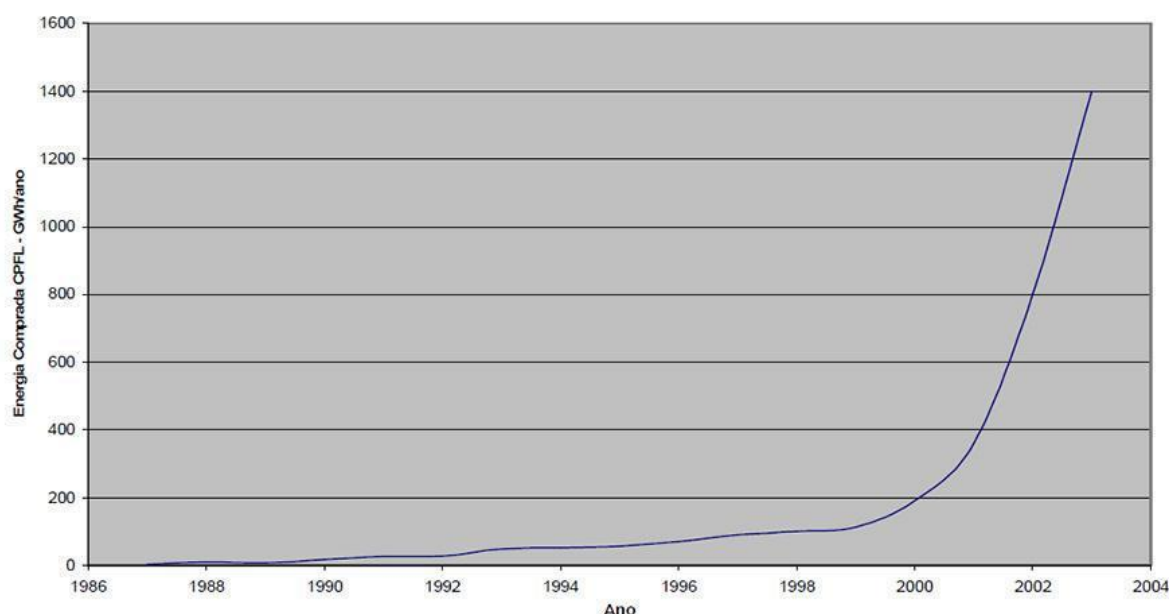


Figura 7. Evolução da Quantidade de Energia Comprada pela CPFL das Usinas Paulistas.

Fonte: SOARES e

ROSSEL, 2004

2.3. Descrição do Objeto de Estudo

O objeto de estudo é uma usina que fabrica açúcar cristal, como principal produto, etanol hidratado, utilizado como combustível nos veículos automotores, etanol anidro, utilizado como aditivo à gasolina, e energia elétrica, gerada a partir da queima do bagaço da cana em caldeiras de alta pressão. Fundada em meados da década de 1980, a usina possui capacidade instalada, produção de açúcar, produção de etanol e energia cogerada dispostos na Tabela 1, com dados obtidos com representante da empresa. Por possuir capacidade de moagem superior a 4.000.000 toneladas de cana por safra, a indústria se enquadra como de grande porte (CONAB, 2010). De fato, atualmente ocupa a posição de quarta maior do Brasil em capacidade instalada de moagem, posição conquistada devido à busca constante por melhorias em sua performance produtiva.

Tabela 1. Dados Gerais de Produção

Dados Gerais de Produção (Objeto de Estudo)		
Total de cana processada	6 000 000	ton/ano
Produção de etanol	180 000	m³/ano
Produção de açúcar	10 500 000	sacas/ano
Geração de energia elétrica	144 200	MWh/ano

A usina iniciou a safra de 2016 em 11 de abril. Foi projetado um aumento de 7% na matéria-prima processada e também aumento produtivo em relação à safra anterior. A previsão é processar 5.700.000 toneladas de cana e produzir aproximadamente 9.250.000 sacas de açúcar, 160.000.000 de litros de etanol, e obter uma cogeração de energia elétrica de 174.700 MWh. Na indústria, o desafio é aumentar a eficiência global de produção, e reduzir o tempo de parada (atualmente, cerca de 3,6 h por dia). No campo, procura-se consolidar o recolhimento de palha, para aumentar o volume de biomassa destinada à produção e cogeração de energia elétrica.

De acordo com o objetivo do presente trabalho, que é analisar a sustentabilidade da operação agroindustrial da usina, descreve-se na próxima etapa em mais detalhes a localização do empreendimento, a fim de determinar quais os principais aspectos e impactos ambientais da atividade na região imediatamente circundante à empresa.

2.4. O Processo Produtivo

Neste capítulo se abordará de forma sucinta as etapas do processo agroindustrial desde a produção da cana até a fabricação dos produtos principais, açúcar e etanol, e do subproduto que é energia elétrica por cogeração a partir da combustão de biomassa. A figura 8 apresenta, de forma geral, os processos envolvidos na indústria, a partir do recebimento da matéria-prima

Processo Produtivo Simplificado



Figura 8. Processo Produtivo Simplificado. Fonte: RIBEIRO, 2008.

2.4.1. Processo de Industrialização da Cana-de-Açúcar

Nos subitens a seguir são detalhadas as etapas do processamento da cana, desde a recepção das mesmas até a formação dos produtos e resíduos.

2.4.1.1. Recepção, Alimentação e Preparo da Cana

A etapa de recepção da cana envolve a pesagem, amostragem e análise laboratorial da matéria prima, atividades que fornecem informações para a caracterização daquele insumo, importantes no controle operacional da usina.

Os principais parâmetros determinados são (ALBUQUERQUE, 2005, apud RIBEIRO, 2011):

- Brix – percentagem de sólidos solúveis no caldo;
- Pol – percentagem de sacarose aparente no caldo;
- Pureza;
- Fibra residual.

Com base em tais parâmetros, se determina o pagamento ao fornecedor da cana pelo teor de sacarose, e ainda se obtêm dados para o controle agrícola, o controle de moagem e para o rendimento industrial. Após essa etapa, o material segue para o descarregamento, feito em mesa alimentadora com peneira e fundo falso para retirada de impurezas minerais. A cana picada é limpa de impurezas vegetais por sopragem de ar, e em seguida passa por um picador que a parte em pedaços menores e pelo desfibrador que torna o material mais homogêneo e com fibras longas, facilitando a etapa posterior de extração do caldo.

2.4.1.2. Extração do Caldo

Após preparada, a cana é encaminhada para a extração do caldo em moendas. A cana passa por um conjunto de três rolos de esmagamento, que constituem um terno. Normalmente nas usinas há de 4 a 6 ternos em sequência. Após passar pelo primeiro terno, de onde se extrai o caldo primário, a cana segue para os ternos seguintes, sendo lavada em contracorrente para favorecer a extração da sacarose, o que se chama de embebição, obtendo-se o caldo misto. O resíduo que sobra deste processo é o bagaço da cana, como mostra a Figura 9.

Fluxograma dos Setores de Recepção, Preparo da Cana e Extração do Caldo

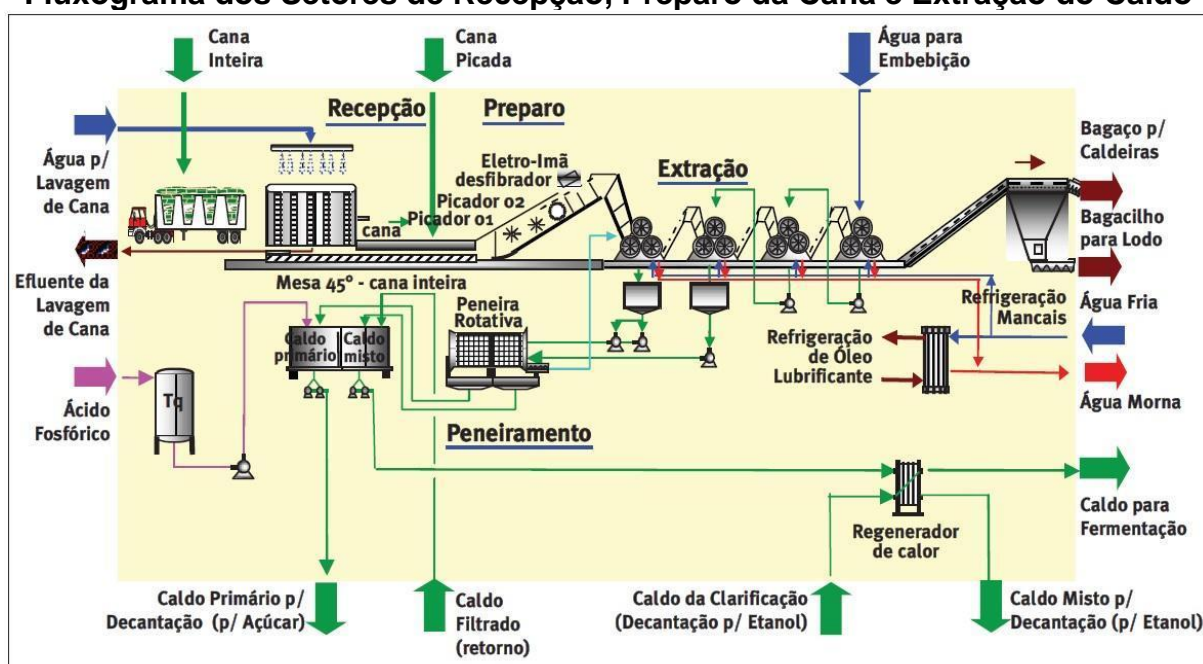


Figura 9. Fluxograma dos Setores de Recepção, Preparo da Cana e Extração do Caldo. Fonte: CTC,2009.

2.4.1.3. Tratamento e Concentração do Caldo

O caldo extraído da cana contém impurezas solúveis ou insolúveis, que são retiradas através de processos de tratamento físico-químicos, que consistem na coagulação, floculação e precipitação destas impurezas. Primeiramente, ocorre a

sulfitação, na qual adiciona-se SO_2 (anidrido sulfuroso), caso seja o intuito produzir açúcar branco, como é o caso da unidade produtiva estudada. Em seguida, ocorre o processo de caleação, com adição de Ca(OH)_2 proveniente da queima de CaO em tanques apropriados chamados hidratadores. Este processo visa o aumento do pH do caldo, para a ordem de 6,8 a 7,2, eliminando-se, desse modo, ácidos orgânicos, mas principalmente, formando sulfito e fosfato de cálcio, agentes precipitadores das impurezas que se deseja retirar do caldo, como pode-se observar na Figura 10.

Fluxograma do Tratamento do Caldo. Etapas: Pré-Aquecimento, Sulfitação e Caleação

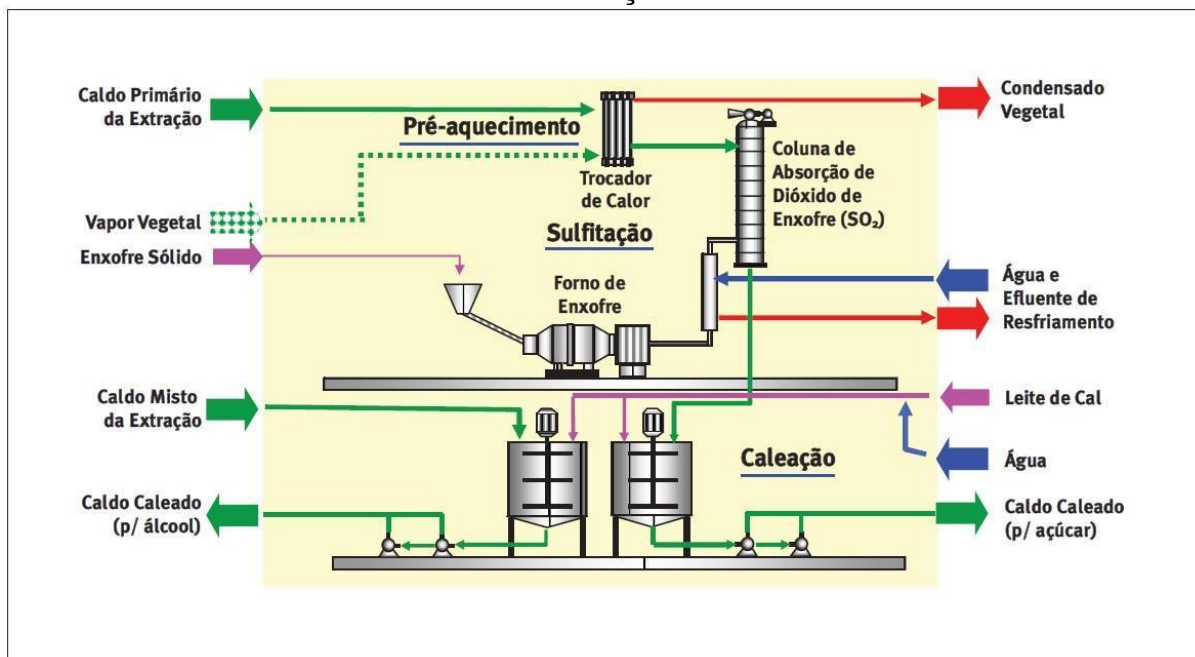
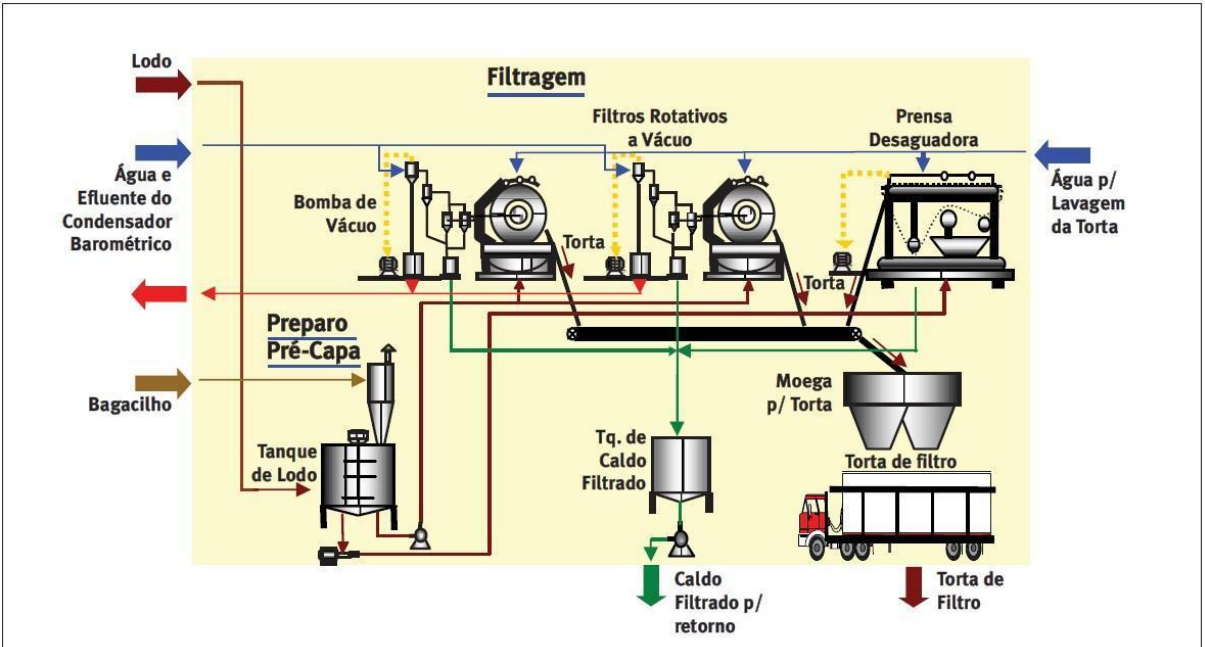


Figura 10. Fluxograma do Tratamento do Caldo. Etapas: Pré-Aquecimento, Sulfitação e Caleação.
Fonte: CTC, 2009.

A mistura segue para etapa de aquecimento com vapor de escape ou vegetal, que favorece a decantação dos sedimentos. Em seguida, ocorre a etapa de clarificação, que consiste na separação da mistura em um decantador, na qual as impurezas se sedimentam no fundo deste equipamento sendo o açúcar remanescente do lodo do decantador extraído na etapa de filtragem, em filtros rotativos a vácuo, como mostram a Figura 11, e a Figura 12.

Fluxograma dos Setores de Tratamento do Caldo (Lavagem da Torta)



31

O lodo proveniente dessa decantação e filtragem (chamado de torta do filtro) é encaminhado para as lavouras para fertilizar o solo. O caldo clarificado segue para a etapa de concentração, realizada em evaporadores em série (múltiplo efeito). No primeiro evaporador, o caldo clarificado é aquecido pelo vapor de escape das turbinas de geração de energia elétrica. Desta maneira, o caldo evapora, o que causa sua concentração e gera o chamado vapor vegetal. Este vapor é então injetado em cada evaporador na sequência, procedendo assim à concentração do caldo à medida que perde água, aumentando seu teor Brix de 15 graus até a faixa de 60 a 65 graus Brix. O vapor remanescente é condensado em um condensador barométrico sob vácuo. O caldo concentrado por este processo denomina-se xarope e segue para as etapas seguintes da produção de açúcar e etanol. A figura 13 mostra o fluxograma do setor de evaporação do caldo.

Fluxograma do Setor de Evaporação do Caldo da Fábrica de Açúcar

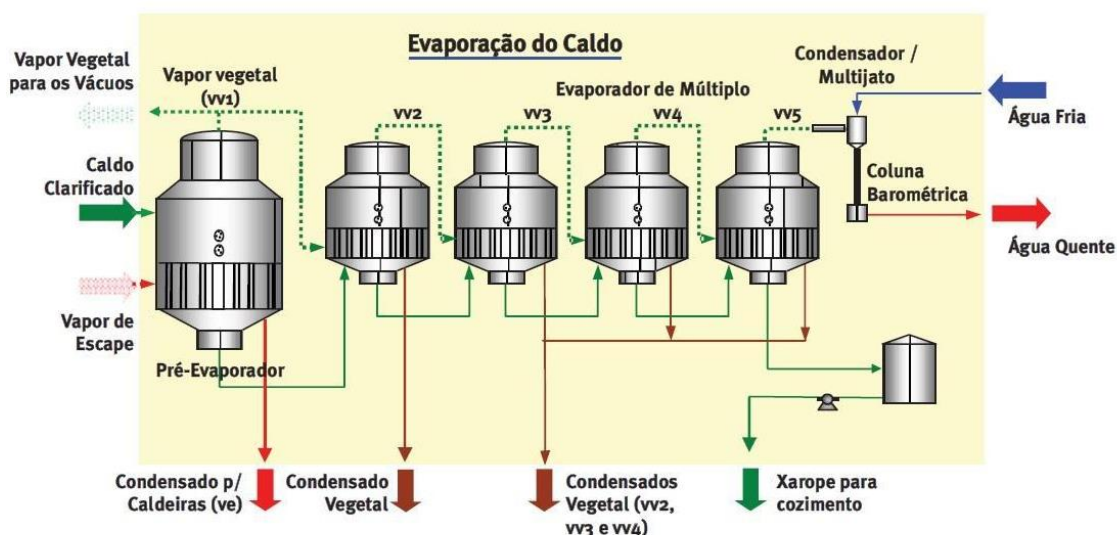


Figura 13. Fluxograma do Setor de Evaporação do Caldo da Fábrica de Açúcar. Fonte: CTC, 2009.

2.4.1.4. Fabricação do Açúcar

A seguir serão descritas brevemente as etapas da fabricação do açúcar.

2.4.1.4.1. Cozimento e Cristalização

A etapa de cozimento é semelhante à etapa de concentração: sua finalidade é evaporar água presente na mistura, até se atingir aproximadamente 90° Brix. A massa obtida é denominada "massa A" e consiste em 45% de cristais de açúcar envoltos em mel. Esta massa segue para tanques horizontais com mexedores, nos quais ocorre o resfriamento e é favorecida a formação dos cristais de açúcar, fase chamada de cristalização. A Figura 14 mostra o fluxograma dos setores de cozimento, cristalização e centrifugação, na fabricação do açúcar.

Fluxograma dos Setores de Cozimento, Cristalização e Centrifugação da Fábrica de Açúcar

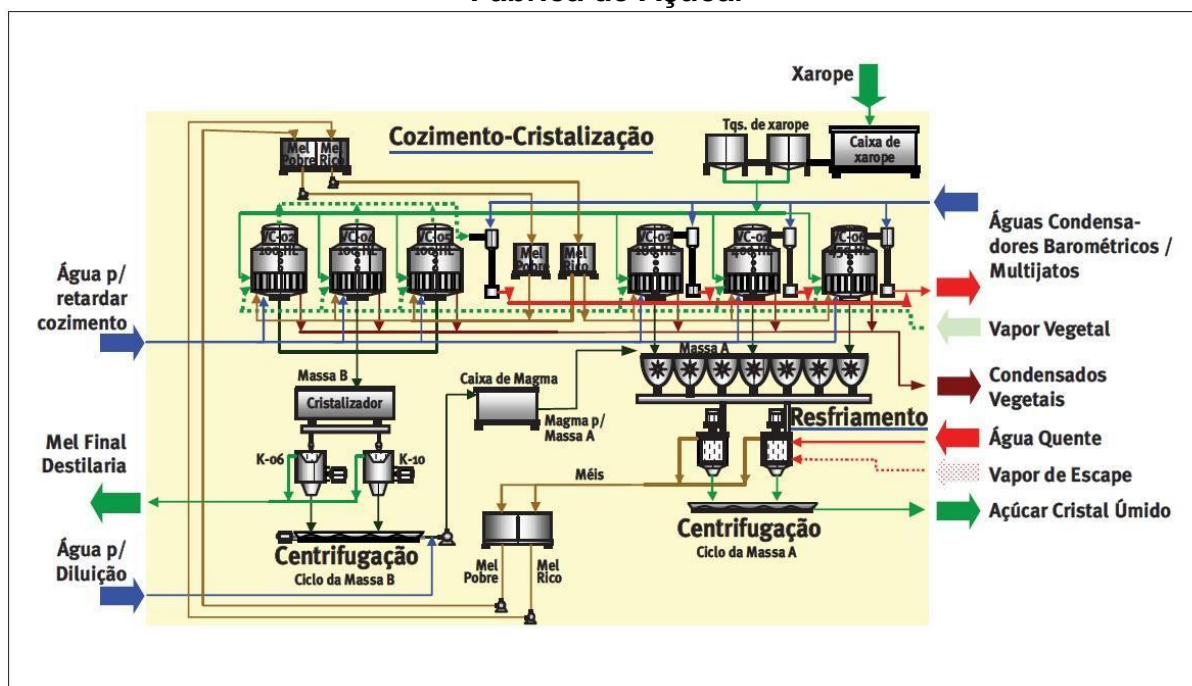


Figura 14. Fluxograma dos Setores de Cozimento, Cristalização e Centrifugação da Fábrica de Açúcar. Fonte: CTC, 2009.

2.4.1.4.2. Centrifugação, Secagem e Acondicionamento do Açúcar

A mistura é conduzida então às peneiras cilíndricas verticais que giram em alta velocidade, causando a separação dos cristais de sacarose dessa maneira em suas paredes. É adicionado vapor em altas temperaturas para diminuir a viscosidade do mel, que é coletado e reencaminhado de volta para a etapa de cozimento, para recuperar a sacarose ainda contida nele. A essa mistura se denomina "massa B", e pode se repetir este processo ainda outras vezes, até que os cristais de açúcar tenham sido retidos todos nas paredes da peneira centrifugadora. Após esse processo, o açúcar é encaminhado para um secador rotativo, para diminuir seu alto teor de umidade e sua alta temperatura, decorrentes da lavagem com vapor na centrifuga. Finalmente, o açúcar é destinado a equipamentos que realizam sua ensacagem. O mel que sobra é chamado de melaço e é enviado para a produção de etanol. A Figura 15 mostra o fluxograma do setor de secagem e ensaque do açúcar.

Fluxograma do Setor de Secagem e Ensaque do Açúcar

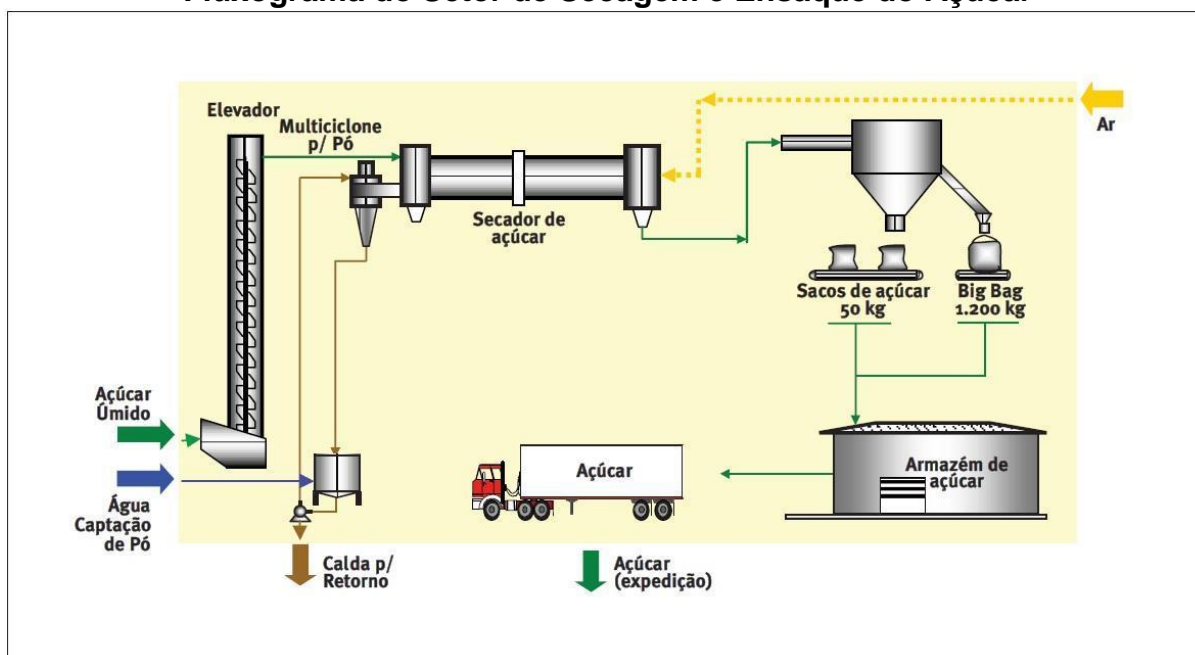


Figura 15. Fluxograma do Setor de Secagem e Ensaque do Açúcar. Fonte: CTC,2009

2.4.1.5. Fabricação do Etanol

Apresenta-se a seguir uma breve descrição dos processos envolvidos na produção do etanol.

2.4.1.5.1. Preparo do Mosto

O mosto é uma solução açucarada utilizada no processo de fermentação para produção do etanol. Consiste em uma mistura do melaço, água, caldo primário e misto, e a etapa de preparação do mosto tem como finalidade ajustar o Brix a um ponto que favoreça o teor alcoólico desejado, a ser atingido pela fermentação desta mistura. A Figura 16 mostra o fluxograma das operações de preparo e tratamento do mosto para fermentação.

Fluxograma das Operações de Preparo e Tratamento do Mosto para Fermentação

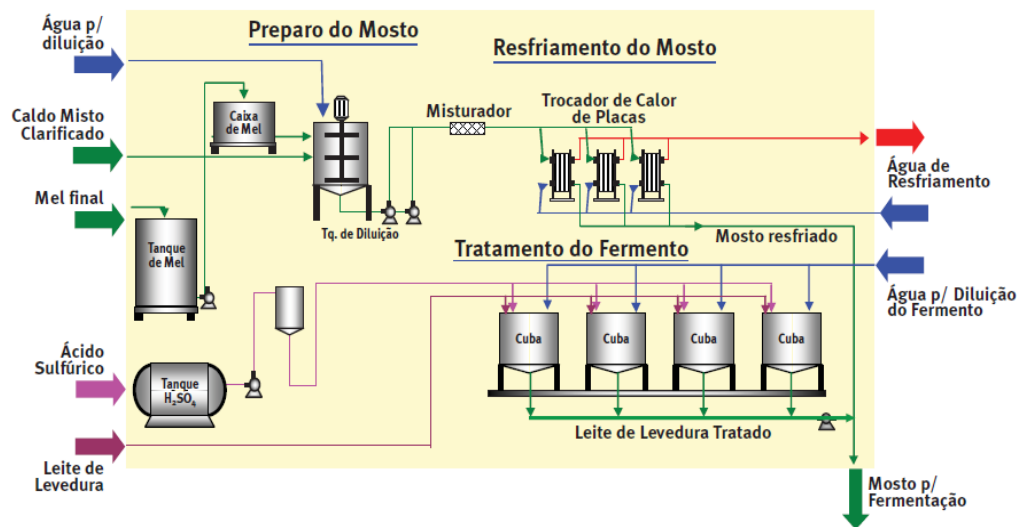


Figura 16. Fluxograma das Operações de Preparo e Tratamento do Mosto para Fermentação. Fonte: CTC, 2009.

2.4.1.5.2. Fermentação

O processo de fermentação transforma os açúcares do mosto em etanol e CO_2 , através da ação das leveduras, e seu processo industrial ocorre em tanques chamados de dornas de fermentação. Por tratar-se de reações exotérmicas, ocorre grande liberação de energia na forma de calor, o que torna necessário o resfriamento das dornas para que se mantenha a temperatura adequada para a ação microbiológica (por volta de $34^\circ C$). No Brasil, o principal método utilizado é o Melle-Boinot, cuja característica principal é a recuperação das leveduras através da aplicação de ácidos fortes para eliminação de bactérias indesejadas, feito separadamente às dornas de fermentação. A mistura fermentada tem o nome de vinho fermentado, e seu teor de etanol gira em torno de 7° a $11^\circ GL$. O CO_2 produzido no processo arrasta consigo vapores de etanol, que são recuperados após a mistura gasosa ser encaminhada a torres de absorção. A Figura 17 mostra o fluxograma das operações de fermentação do mosto.

Fluxograma das Operações de Fermentação do Mosto

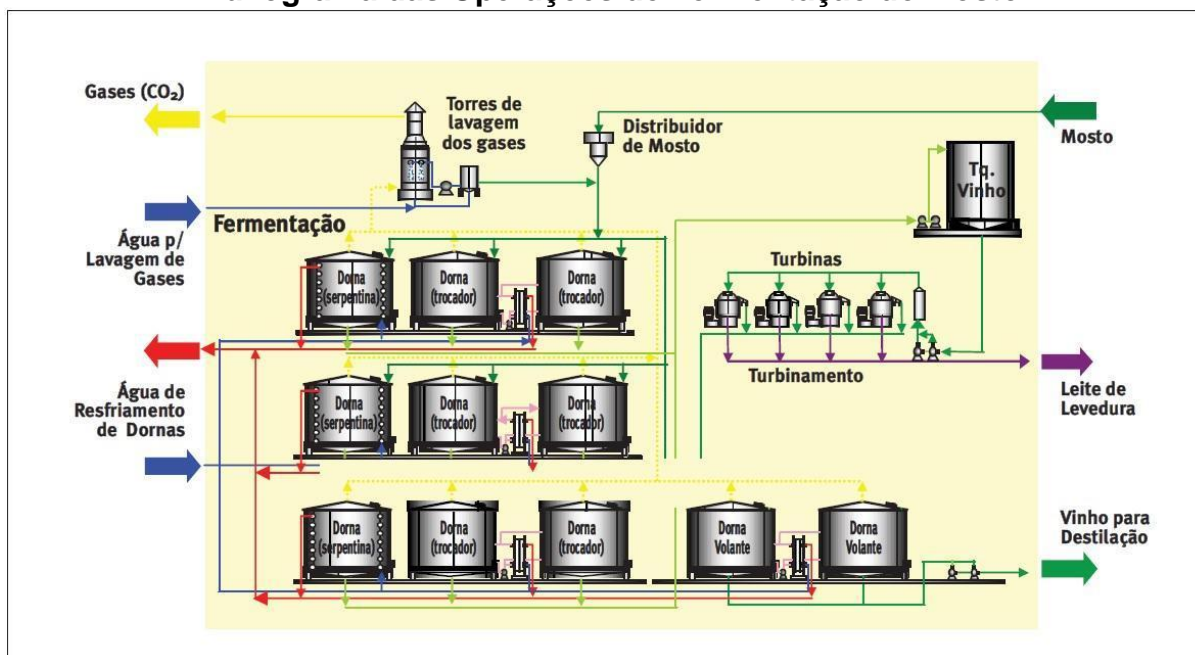


Figura 17. Fluxograma das Operações de Fermentação do Mosto. Fonte: CTC, 2009.

2.4.1.5.3. Destilação

A destilação consiste na separação dos elementos que compõem o vinho (água, etanol, aldeídos e ácido acético, basicamente), através dos diferentes pontos de ebulição destes elementos. O vinho é encaminhado para a torre “A”, onde se adiciona vapor, gerando três produtos: a vinhaça, que é o principal resíduo da destilação; o etanol de cabeça, que apresenta 92° a 94°GL; e o flegma, que é uma mistura de vapores que contém resquícios de etanol de 45 a 50°GL.

Em seguida, o flegma é encaminhado para a retificação, que consiste na separação das impurezas e elevação do grau alcoólico, feito na torre “B”. Esse procedimento resulta na produção do etanol hidratado (92,3°INPM), flegmaça (resíduo), óleo fúsel e óleo alto. Os dois últimos são produtos comercializáveis. A flegmaça é um efluente líquido incorporado à vinhaça ou às águas residuárias da indústria. Pode-se proceder ainda à fabricação do etanol anidro (99,3°INPM) através de posterior desidratação. A Figura 18 mostra o fluxograma das operações de destilação do Etanol.

Fluxograma das Operações de Destilação do Etanol

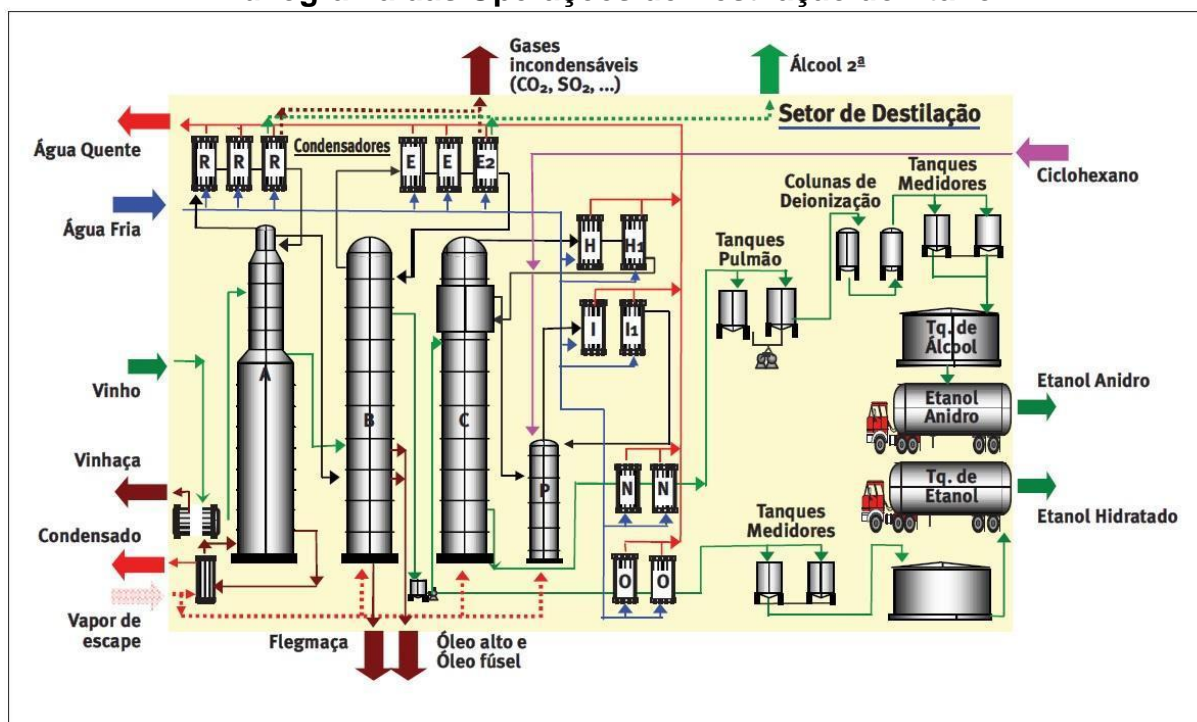


Figura 18. Fluxograma das Operações de Destilação do Etanol. Fonte: CTC, 2009.

2.4.1.6. Geração de Energia

A cogeração de energia é feita pela queima do bagaço da cana (biomassa), que produz vapor em caldeiras. Este vapor é então expandido em turbinas, onde parte da sua energia é convertida em energia mecânica para movimentar equipamentos, e outra parte é convertida em energia elétrica por geradores acoplados à turbina. No caso de haver interesse em utilizar a energia térmica dos vapores de escape das turbinas, utilizam-se geradores de contrapressão, que expõem os vapores a uma pressão maior que a atmosférica, posteriormente sendo condensados e retornados à caldeira após sua utilização em processos térmicos. Em certos casos, utiliza-se turbogeradores de extração, também chamados de geradores de condensação (que trabalham com pressão negativa), nos quais não se utiliza o vapor de escape para processos térmicos sendo esta parcela aproveitada também para geração de energia elétrica. Nestes casos, as torres de resfriamento para condensar os gases de escape necessitam de volume de água ainda maior para seu resfriamento. A figura 19 mostra o fluxograma das operações do setor de produção de energia.

Fluxograma das Operações do Setor de Produção de Energia

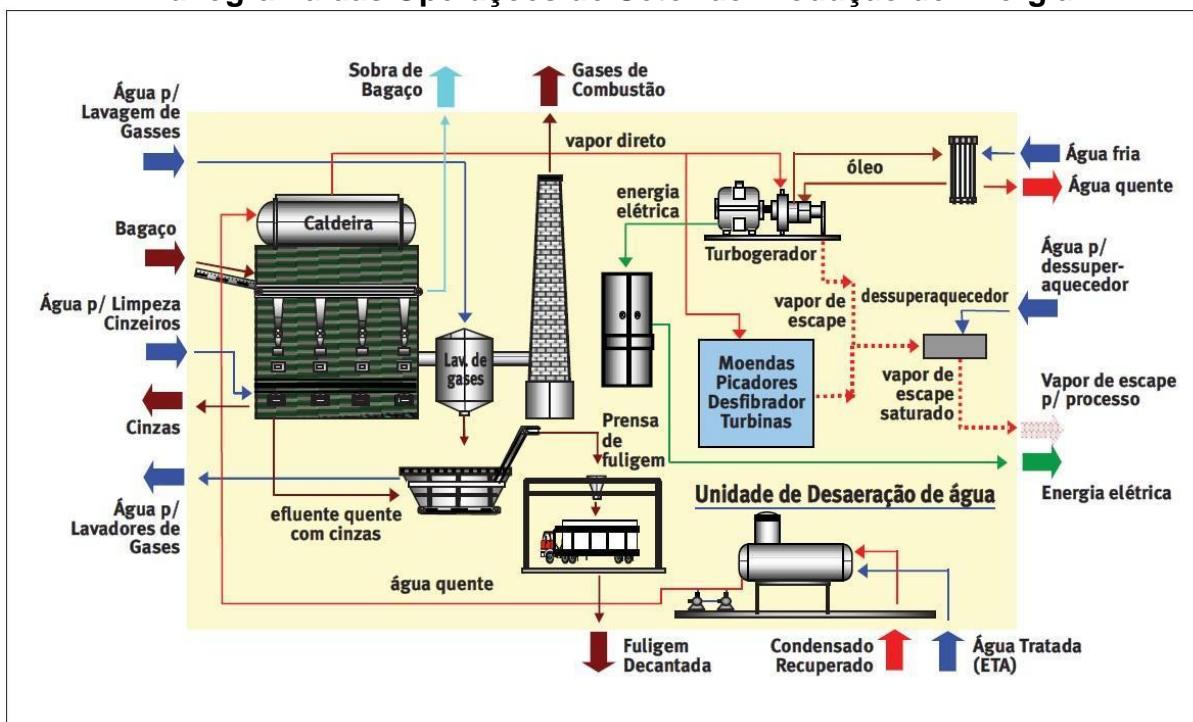


Figura 19. Fluxograma das Operações do Setor de Produção de Energia. Fonte: CTC, 2009.

2.4.1.7. Atividades Auxiliares

Apresenta-se a seguir as descrições de etapas auxiliares do processo, como o tratamento de água, efluentes, e lavagem de gases e fuligem.

2.4.1.7.1. ETA

A água que se utiliza no processo industrial de fabricação de açúcar e etanol tem que seguir padrões de qualidade muito altos, por se tratar da produção de alimentos e pela característica de certos processos físicos, como o aquecimento a altíssimas pressões e temperaturas na caldeira, e químicos na destilaria e tratamento do caldo, por exemplo. Portanto, é prática comum no setor haver uma Estação de Tratamento de Água para a água captada para o processo. A figura 20 ilustra uma ETA típica do setor:

Esquema de uma ETA Convencional

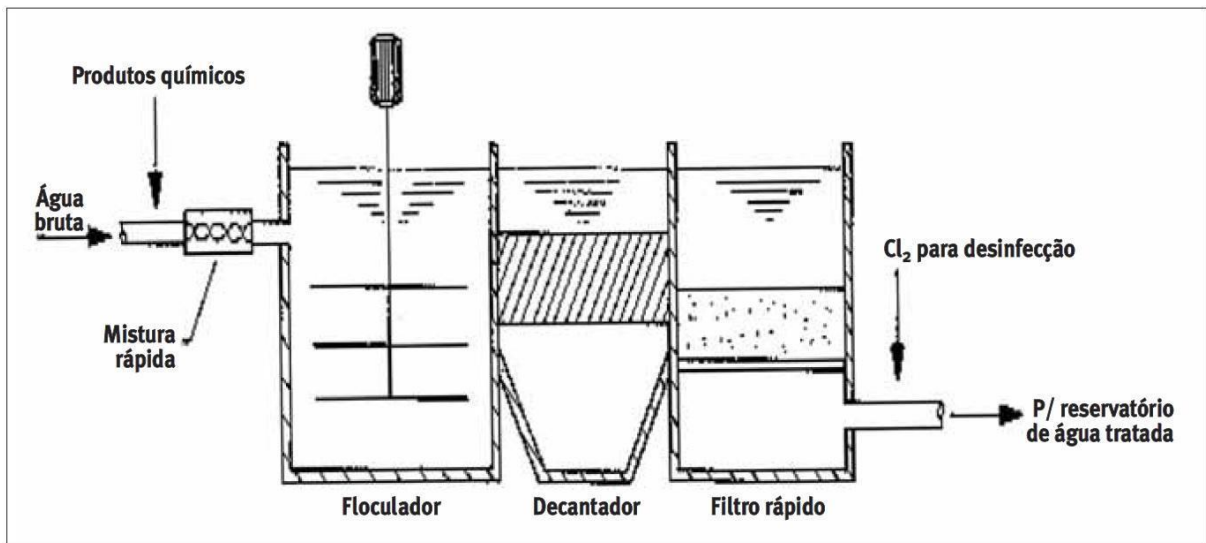


Figura 20. Esquema de uma ETA Convencional. Fonte: Copersucar (1985)

2.4.1.7.2. ETE

Por se tratar de um ramo agroindustrial, normalmente as indústrias não são atendidas por sistema de coleta de esgoto. Portanto, costuma-se destinar os efluentes sanitários a fossas sépticas ou, dependendo do porte da usina, a ETE própria. Além disso, alguns outros efluentes, se tratados corretamente, podem ser reintroduzidos nos processos, gerando grande economia de água na indústria. Para isso, entretanto, deve haver uma ETE específica para tratar estes efluentes, pelas suas características físico-químicas distintas do esgoto sanitário gerado.

2.4.1.7.3. Sistema de Lavagem de Gases e Fuligem da Caldeira

Os gases expelidos pela caldeira contêm poluentes atmosféricos, e o melhor tratamento para tais poluentes é o retentor de via úmida, que faz a “lavagem” dos gases, promovendo o arraste dos poluentes pela água. Costuma-se direcionar esta água a um equipamento separador de partículas, que remove através da decantação os materiais particulados que a água retirou dos gases de exaustão. A água, então, pode ser recirculada para o sistema, e o lodo deste separador é chamado de torta de fuligem.

Além disso, a combustão da biomassa nas caldeiras gera cinzas, que devem ser retiradas do equipamento para evitar perda de eficiência na combustão. Esta limpeza do cinzeiro dos queimadores costuma ser feita por lavagem com água.

2.4.2. Esquema dos Principais Aspectos Ambientais da Indústria

Descritos os processos, ao leitor permite-se a compreensão geral dos principais aspectos relacionados à produção de açúcar e etanol em unidade industrial deste setor, como demonstra a figura 21:

Aspectos Ambientais da Indústria Sucroenergética

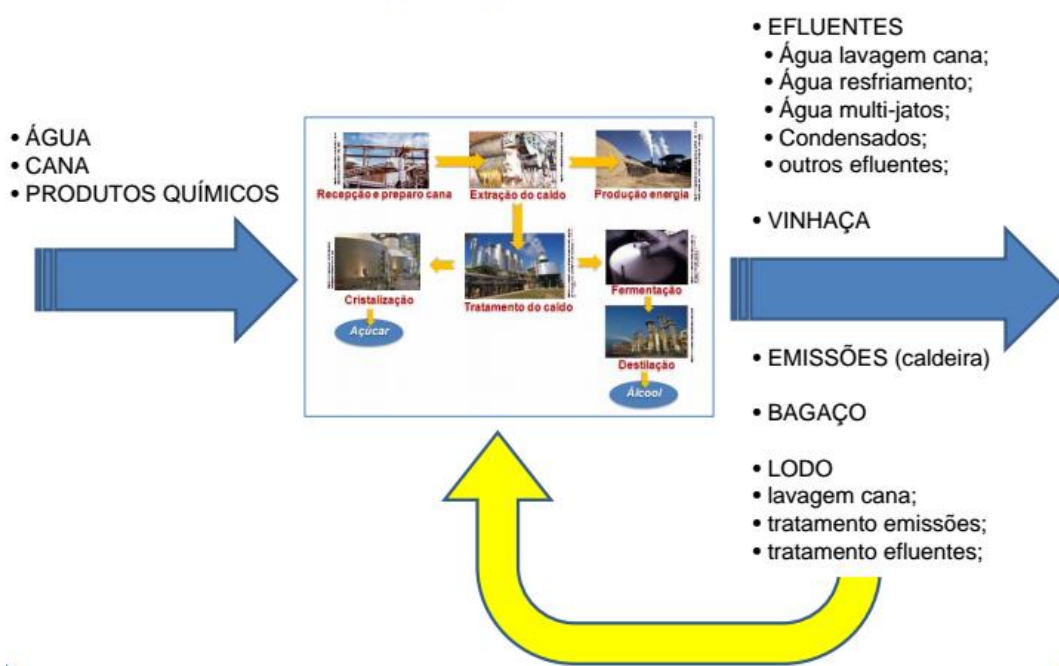


Figura 21. Principais Aspectos Ambientais da Indústria Sucroenergética. Fonte: RIBEIRO, 2008

2.5. Dados de Referência e Conformidades Legais: Aspectos e Impactos Ambientais

A partir do conhecimento dos processos, faz-se a etapa de identificação dos aspectos e impactos ambientais, na qual descreve-se quantitativa e qualitativamente os principais problemas ambientais associados às respectivas atividades. Determinam-se também padrões e indicadores de referência (ANA, 2009), dispositivos legais (Anexo I) e temas associados.

2.5.1. Uso da Água e Recursos Hídricos

O setor sucroalcooleiro é historicamente conhecido como hidroatensivo. No Estado de São Paulo, o setor é responsável por 12% da demanda de água total (ANA, 2009). A água é um fator estratégico para o planejamento e atuação de uma unidade industrial, dado que a escassez desse recurso pode ocasionar perda de lucratividade, dificuldade operacional, e até levar à interrupção total da atividade produtiva. Recentemente o setor vem adotando uma postura mais moderna, aumentando consideravelmente sua preocupação quanto a conservação e uso racional da água (ANA, 2009). O uso da água possui ampla quantidade de aparatos legais relacionados: leis federais e estaduais, decretos, resoluções, agências reguladoras e associações específicas. Destaca-se a Lei nº 9.433/97, conhecida como Lei das Águas, que cria a Política e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SNGRH).

O SNGRH é composto pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), a Agência Nacional de Águas (ANA, 2009), Agências de Água, Comitês de Bacias Hidrográficas e outros órgãos competentes. Aparatos e dispositivos, como a outorga e cobrança pelo uso da água e o plano de recursos hídricos da bacia, dentre outros, que revelam o grau de desenvolvimento de melhorias já realizadas e a importância deste recurso para a indústria.

A indústria da cana, do Centro-Sul do Brasil, apresenta um baixo consumo médio de água por tonelada de cana de açúcar produzida e processada (em comparação com outras regiões do mundo). Os sistemas industriais são praticamente todos fechados, com alto nível de recirculação. Além disso, a cana utilizada não necessita de irrigação na agricultura, uma vez que utiliza quase totalmente água de chuva (UNICA, 2007).

Os níveis de captação e lançamento tem sido reduzidos substancialmente nos últimos anos, passando de aproximadamente 5m³ por tonelada de cana em 1997, para 1,83 m³ por tonelada de cana em 2004 (como mostra a figura 22), com uma eficiência no tratamento para lançamento acima de 98% (UNICA, 2007).

Curva de Tendência do Decréscimo da Captação de Água na Indústria Canavieira

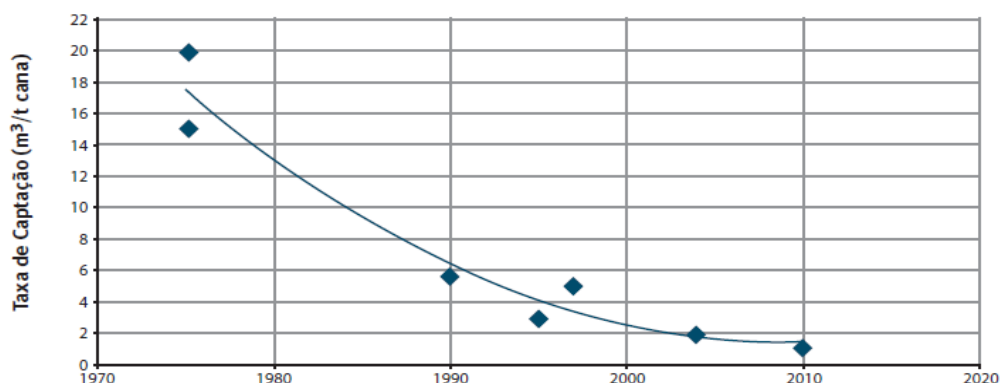


Figura 22. Curva de tendência do decréscimo da captação de água na indústria canavieira. Fonte: ANA, 2009.

A Tabela 2 apresenta uma síntese dos usos específicos médios de água e suas respectivas porcentagens em relação ao total, numa indústria sucroalcooleira. Os dados, porém, não refletem o consumo de água na indústria, por não levarem em conta o reuso e recirculação de água. É importante lembrar que os usos vão se modificando ao longo do tempo, frente à constante aplicação de inovação tecnológica e boas práticas industriais. O uso específico da etapa de lavagem de cana, por exemplo, não se aplica ao objeto de estudo.

Tabela 2. Usos Médios da Água em Unidades Produtoras de Açúcar e Etanol.

Setor	Finalidade	Uso Específico	Uso médio	
			[m³/t cana]	[%]
Alimentação, preparo e extração (moendas e difusores)	Lavagem de cana	2,200 m³/t cana total	2,200	9,9
	Embebição	0,250 m³/t cana total	0,250	1,1
	Resfriamento de mancais	0,035 m³/t cana total	0,035	0,2
	Resfriamento óleo	0,130 m³/t cana total	0,130	0,6
Subtotal			2,615	11,8
Tratamento de caldo	Resfriamento coluna sulfitação ^(*)	0,100 m³/t cana açúcar	0,050	0,2
	Preparo de leite de cal	0,030 m³/t cana total	0,030	0,1
	Preparo de polímero ^(*)	0,015 m³/t cana açúcar	0,008	0,0
	Aquecimento do caldo	p/açúcar ^(*)	160 kg-vapor/t cana açúcar	0,080
		p/etanol ^(*) e ^(*)	50 kg-vapor/t cana etanol	0,025
	Lavagem da torta	0,030 m³/t cana total	0,030	0,1
	Condensadores dos filtros	0,300 a 0,350 m³/t cana total	0,350	1,6
Subtotal			0,573	2,6
Fábrica de açúcar ^(*)	Vapor para evaporação	0,414 t/t cana açúcar	0,207	0,9
	Condensadores/multijatos evaporação	4 a 5 m³/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 m³/t cana açúcar	5,750	26,0
	Diluição de méis e magas	0,050 m³/t cana açúcar	0,030	0,1
	Retardamento do cozimento	0,020 m³/t cana açúcar	0,010	0,0
	Lavagem de açúcar (1/3 água e 2/3 vapor)	0,030 m³/t cana açúcar	0,015	0,1
	Retentor de pó de açúcar	0,040 m³/t cana açúcar	0,020	0,1
Subtotal			8,367	37,8
Fermentação ^(*)	Preparo do mosto	0 a 10 m³/m³ etanol residual	0,100	0,5
	Resfriamento do Caldo	30 m³/m³ etanol	1,250	5,6
	Preparo do pé-de-cuba	0,010 m³/m³ etanol	0,001	0,0
	Lavagem gases CO2 fermentação	1,5 a 3,6 m³/m³ etanol	0,015	0,1
	Resfriamento de dornas	60 a 80 m³/m³ etanol	3,000	13,6
Subtotal			4,366	19,7
Destilaria ^(*)	Aquecimento (vapor)	3,5 a 5 kg/m³ etanol	0,360	1,6
	Resfriamento dos condensadores	80 a 120 m³/m³ etanol	3,500	15,8
Subtotal			3,860	17,4
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 m³/t vapor	1,000	4,5
	Limpeza dos cinzeiros	0,500 m³/t vapor	0,250	1,1
	Resfriamento óleo e ar dos turbogeradores	15 L/kW	0,500	2,3
	Água torres de condensação ^(*)	38 m³/t vapor	6,0 ^(*)	27,1
Subtotal			2,265	10,2
Outros	Limpeza pisos e equipamentos	0,050 m³/t cana total	0,050	0,2
	Uso potável	70 L/funcionário.dia	0,030	0,1
Subtotal			0,080	0,4
Total			22,126	100

Obs. ^(*) itens que não participam do processo do etanol;^(*) os que não participam do processo de açúcar;^(*) os que participam apenas no caso de produção de energia excedente não sendo computado nas somas;^(*) recuperando-se o calor do caldo para mosto.

Fonte: ANA, 2009.

Para um melhor entendimento da relevância quantitativa dos usos setoriais e pontuais de água na indústria sucroenergética, apresenta-se as Figuras 23 e 24, respectivamente.

Distribuição Média dos Usos Setoriais de Água nas Setoriais de Água na Indústria Sucroenergética

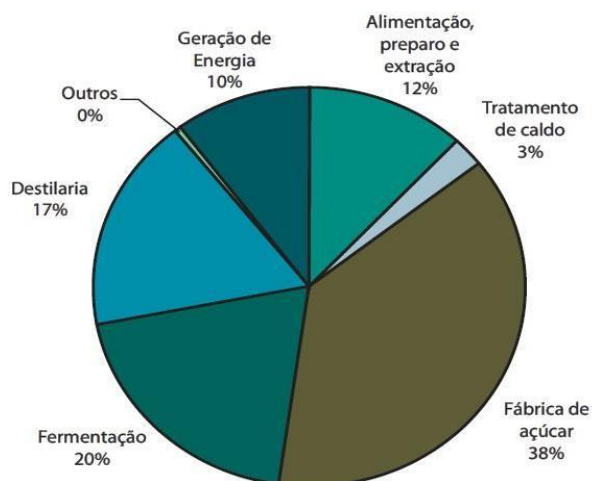


Figura 23. Distribuição Média dos Usos Setoriais de Água nas Setoriais de Água na Indústria Sucroenergética: Fonte: ANA, 2009

Distribuição Média dos Usos Pontuais de Água na Indústria Sucroenergética

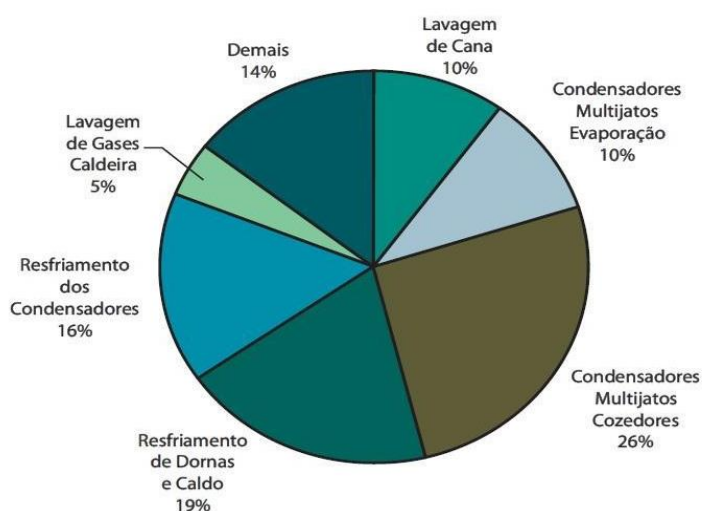


Figura 24. Distribuição Média dos Usos Pontuais de Água na Indústria Sucroenergética. Fonte: ANA, 2009

A Figura 25 mostra o balanço hídrico médio para usinas sucroenergéticas, revelando importantes indicadores, médios e metas, como perdas, captação, índice de reúso, reúso agrônômico e lançamento.



Figura 25. Balanço Médio Global de Água nas Indústrias Sucroenergéticas (ANA, 2009)

Portanto, o uso industrial de água já apresentado é de $22 \text{ m}^3/\text{ton cana}$, e a captação média de água é próxima de $2 \text{ m}^3/\text{ton cana}$. Nota-se que a meta é reduzir este valor para $1,0 \text{ m}^3/\text{ton cana}$ no máximo. Nesse balanço, pode-se notar que o setor já pratica um índice de reúso de água, em seus processos industriais, de 91%. A meta, no entanto, é atingir 95%, o que pode ser feito através de troca de equipamentos por outros mais eficientes em termos de consumo de água, e também no fechamento de circuitos para recirculação. O lançamento deve ser reduzido a zero, ou seja, idealmente as águas residuárias que não puderem ser reutilizadas devem ser aplicadas em reúso agrônômico ou outros usos. Isso demonstra o grau elevado de reaproveitamento de água do setor e a redução da necessidade de busca de novas fontes de abastecimento hídrico (ANA, 2009).

2.5.2. Uso de Energia e Cogeração

Toda energia necessária no processo de fabricação de açúcar e etanol é fornecida pela queima do bagaço de cana em fornalhas, aquecendo caldeiras e

gerando vapor, como descrito anteriormente. A utilização do bagaço é considerada um aproveitamento de resíduo e traz um importante diferencial na produção de etanol de cana-de-açúcar, devido ao fato de a dependência de energia fóssil ser mínima, mais ligada ao diesel nas operações agrícolas, e à participação do petróleo na cadeia produtiva de insumos materiais e equipamentos (ANA, 2009).

A produção de etanol gera até 9,3 vezes mais energia do que a energia de fontes fósseis consumida (UNICA, 2007). A Figura 26 compara os balanços energéticos do etanol segundo a matéria prima, onde fica clara a vantagem do etanol de cana-de-açúcar em relação ao de trigo, beterraba e milho, que tem relação de 2, 2 e 1,4, respectivamente.

Balanco Energético: Energia Contida no Etanol por Unidade de Energia Fóssil Usada para Produzi-lo

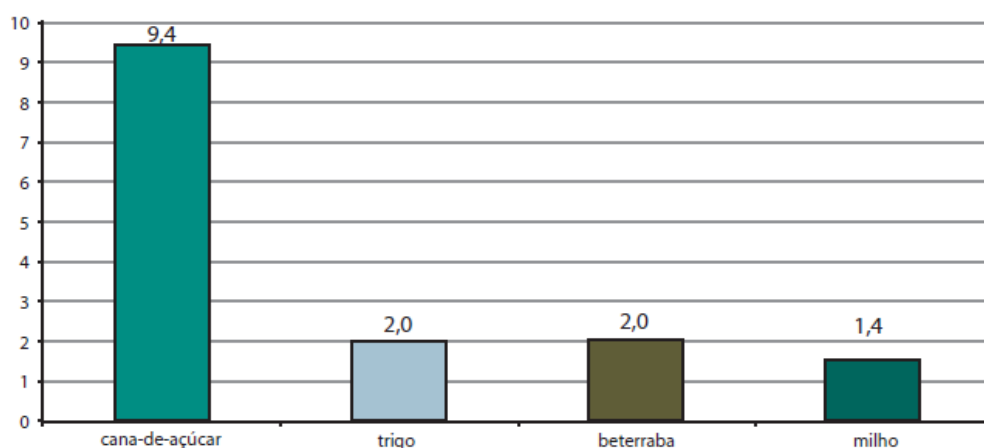


Figura 26. Balanço Energético: Energia Contida no Etanol por Unidade de Energia Fóssil Usada para Produzi-lo. Fonte: ANA 2009

A cogeração de energia elétrica é considerada como o terceiro produto do setor canavieiro, e contribui para o aumento da produtividade do setor, e aumento do aproveitamento da cana de açúcar. Em 2008 o potencial médio de geração excedente das usinas brasileiras era de 1800 MWm (Mega Watts médios), correspondentes a 3% da demanda nacional. Estimativas apontavam para um aumento de até 11.500 MWm em 2015, passando a 15% da demanda, influenciado pelo aumento da eficiência das caldeiras, e pelo maior aproveitamento da biomassa disponível (ANA, 2009).

A energia presente no vapor é utilizada em diversos processos nas formas de energia térmica, mecânica e elétrica. A Tabela 3 (ANA, 2009) apresenta a taxa de utilização por tonelada de cana para cada tipo de utilização dessa energia, e revela que o maior uso é da energia térmica. Indicadores mais específicos relacionados à energia térmica constam na Tabela 4 (ANA, 2009).

Tabela 3. Autoconsumo de Energia no Processamento Industrial da Cana.

Uso da Energia	Taxa de Utilização por Tonelada de Cana
Energia elétrica	12 kWh/t cana
Energia mecânica para acionamentos	16 kWh/t cana
Energia térmica	330 kWh/t cana

Fonte: ANA, 2009.

Tabela 4. Estimativa da Quantidade de Vapor Necessário para o Processo (Mix de 50% de Produção Entre Etanol e Açúcar).

Vapor de Escape (ve)	Quantidade de Vapor	
	por produto	t/t cana total
Taxa de vapor de escape para a evaporação e sangrias	41,4 kg/kg açúcar	0,207
Taxa de vapor de escape utilizada na lavagem do açúcar	0,1 kg/kg açúcar	0,005
Taxa de vapor de escape utilizado na coluna "A"	2,5 kg/L etanol	0,100
Taxa de vapor de escape utilizado na coluna "B"	1,0 kg/L etanol	0,040
Taxa de vapor de escape utilizado na coluna "C" e "P"	1,5 kg/L etanol	0,060
Perdas térmicas	~10%	0,041
Total		0,453

Fonte: ANA, 2009

2.5.3. Emissões Atmosféricas e Qualidade do Ar

2.5.3.1. Queimada da Cana para Colheita e Uso de Combustíveis Fósseis

A prática da queimada da cana-de-açúcar para despalhamento tem sido combatida no estado de São Paulo com muita efetividade. Graças à Lei Estadual 11.241 de 2002, e pelo Protocolo Agroambiental atendendo a essa lei, toda a área mecanizável (aquela com declividade inferior a 12%) será colhida crua, sem queima. Da área total, de 7 milhões de hectares, haverá queima em aproximadamente 440 mil apenas, principalmente em pequenas propriedades em que não foi viável mecanizar a colheita. No caso do objeto de estudo, a queima foi erradicada em 2012.

2.5.3.2. Combustão nas Caldeiras

O processo de queima do bagaço de cana nas caldeiras, para aquecimento da água e geração de vapor, gera emissões atmosféricas, principalmente óxidos de nitrogênio - NOx e material particulado. Assim como outros aspectos ambientais que podem acarretar em alteração da qualidade do meio ambiente, essas emissões devem ser observadas, sendo seus indicadores regulamentados por legislação específica.

A Resolução CONAMA 382, de 2006, estabelece os limites mínimos e máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Para as caldeiras preexistentes à Resolução 382, devem ser respeitados os padrões previstos na Resolução CONAMA nº 3, de 1990 na esfera federal, e no Estado de São Paulo, no Decreto Estadual nº 8.468, de 1976, ambos referentes aos padrões de qualidade do ar, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5. Padrões Legais de Emissão de Poluentes Atmosféricos para a Caldeira a Bagaço (existentes e novas) e Padrões de Qualidade do Ar das Legislações Federal e do Estado de São Paulo.

Parâmetros		Legislação		
		Federal (CONAMA)		SP
Padrão legal de emissão		nº 8/1990 Existentes	nº 382/2006 Novas	8468/1976 Ambas
Escala de Ringelmann		1	-	1
MP ^(a)	Menor que 10 MW ^(a)	-	280	-
	Entre 10 e 75 MW ^(a)	-	230	-
	Maior que 75 MW ^(a)	-	200	-
NOx ^(a) (como NO ₂)	Menor que 10 MW ^(a)	-	N.A.	-
	Entre 10 e 75 MW ^(a)	-	350	-
	Maior que 75 MW ^(a)	-	350	-
CO ^(a)	Até 0,05 MW ^(a)	-	6.500	-
	Entre > 0,05 e ≤ 0,15 MW ^(a)	-	3.250	-
	Entre > 0,15 e ≤ 1,0 MW ^(a)	-	1.700	-
	Entre > 1,0 e ≤ 10 MW ^(a)	-	1.300	-
	Maior que 10 MW ^(a)	-	N.A.	-
Padrão legal de qualidade (µg/m ³):		CONAMA nº 3/1990		8468/1976
		Primário ^(a)	Secundário ^(a)	
Dióxido de enxofre (SO ₂)	24 h	365*	100*	365*
	MAA	80	40	80
Monóxido de Carbono (CO)	1 h	40.000* (35 ppm)	40.000* (35 ppm)	40.000*
	8 h	10.000* (9 ppm)	10.000* (9 ppm)	10.000*
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	1h	320*	190*	-
	MAA	100	100	-
Dióxido de Nitrogênio (NO _x)	1h	320*	190*	-
	MAA	100	100	-
Ozônio (O ₃)	1h	160*	160*	160*
Partículas Totais em Suspensão	24h	240*	150*	240*
	MGA	80	60	80*
Partículas Inaláveis	24h	150*	150*	-
	MAA	50	50	-
Fumaça	24h	150*	100*	-
	MAA	60	40	-

Abreviações: MAA, Média Aritmética Anual; MGA, Média Geométrica Anual; N.A., Não Aplicável; MP, Material Particulado

* Não deve ser excedido mais de uma vez ao ano.

(1) Padrão Primário, se ultrapassado afeta a saúde pública;

(2) Padrão Secundário, mínimo efeito adverso no ambiente;

(3) os resultados devem ser expressos na unidade de concentração mg/Nm³, em base seca e 8% de excesso de oxigênio;

(4) Potência térmica nomina (MW).

Fonte: ANA, 2009.

A exaustão dos gases, antigamente feita em chaminés de tijolo tradicionais, é feita atualmente de maneira forçada, com o uso de ventiladores. Nela são arrastados a fumaça e partículas grosseiras (fuligem). A maior parte das partículas grosseiras se depositam nas proximidades da indústria, causando transtornos como sujeira, e afetando a saúde pública. Já as partículas mais leves são dispersas na atmosfera. A emissão de MP estimada na combustão de bagaço é de 2,2-3,6 kg/t cana, sendo 80% lançados na atmosfera e os outros 20% acabam depositados nas fornalhas, cinzeiros e salões das caldeiras (COPERSUCAR, 1983).

O controle desta poluição visa principalmente reter a fuligem e o MP mais fino. Nas caldeiras de bagaço do setor sucroenergético, existem dois tratamentos tradicionais: os lavadores de gases (retenção via úmida) e os multiciclones (retenção via seca). Segundo recomenda a Resolução Conama 382/06, deve-se restringir o controle de emissão atmosférica aos equipamentos via úmida, preterindo os equipamentos via seca, por estes não terem eficiência requerida para atendimento dos padrões estabelecidos (ANA, 2009).

Alguns fabricantes dos equipamentos de controle de via úmida falam em uma redução na emissão de sólidos para até 100 mg/Nm³. Porém, em estudos realizados pelo CTC, constatou-se que estes equipamentos permitem atender padrões em torno de 250 mg/Nm³. Três modelos de retentores via úmida foram desenvolvidos, e suas características e resultados são apresentados na tabela 6, a seguir:

Tabela 6. Características dos Retentores de Fuligem Via Úmida

Modelos		CTC 4SR-00-30	CTC 4SR-30-45	CTC 4SR-45-60
Capacidade das caldeiras (t.vapor/h)		até 30	30 - 45	45 - 60
Dimensões do equipamento	Diâmetro (m)	4,0	5,0	6,0
	Altura (m)	5,42	7,00	8,076
	Volume (m ³)	68	137	228
Vazão de água (m ³ /t vapor)		2		
Temperatura água saída (°C)		65		
Pressão da água (kg/cm ²)		1,0		
Perda de pressão gás (mmca)		35	45	50
Queda de temperatura dos gases (°C)		140	150	160
Temperatura saída dos gases * (°C)		120	147	153
Emissão sem tratamento (mg/Nm ³)		3500 a 7000		
Emissão com lavadores (mg/Nm ³)		~250		

* caldeira com pré-aquecedor de ar

Fonte: ANA, 2009.

2.5.4. Resíduos Sólidos

Neste item será discutida a geração de resíduos sólidos no processamento da cana na indústria.

2.5.4.1. Bagaço e Palha

O bagaço é um resíduo fibroso da extração do caldo pelas moendas. A quantidade produzida depende do teor de fibra da cana processada, apresentando, em média, 46% de fibra e 50% de umidade, resultando, aproximadamente, em 280 quilos de bagaço por tonelada de cana processada (DEDINI, 2016). Pela proporção em que é produzido e devido à sua composição, o bagaço constitui-se em um dos mais importantes subprodutos da indústria sucroalcooleira. Suas principais aplicações são: combustível para caldeira, produção de celulose e alimentação de gado confinado. Assim, a sobra de bagaço pode ser vendida para outras indústrias.

A palha (ou palhiço) é formada por palhas, folhas verdes, rebolos, raízes e ervas daninhas. Em cada hectare de canavial são gerados de dez a treze toneladas de palha. Desde a redução gradativa da queimada da palha, esta parte da cana crua tem representado uma parcela significativa da biomassa aproveitável da planta. A palha apresenta as mesmas características das fibras do colmo e do bagaço, e representa cerca de $\frac{1}{3}$ do conteúdo de energia do canavial. Corresponde a 14% em massa da cana processada, sendo o restante deixado no campo recobrimdo o solo. Estudos feitos a respeito da necessidade efetiva de recobrimento do solo com a palha apontam que seria possível recuperar até 60% da palha descartada sem prejuízos às funções de proteção do solo que ela desempenha.

O destino do palhiço pode ser variável. O mais comum é queimá-lo nas caldeiras para cogeração de energia elétrica, devido ao seu alto poder calorífico inferior (PCI), que é quase o dobro do PCI do bagaço. Mas há outras técnicas de utilização da energia contida no palhiço, em fase de estudo e testes, como sua biodigestão para a produção de biogás, e a extração de etanol celulósico, também chamado de etanol de segunda geração.

2.5.4.2. Torta de Filtro

As impurezas presentes no caldo da cana são retiradas na fase de tratamento do caldo, através da coagulação, floculação e sedimentação. O lodo proveniente do decantador contém açúcares recuperáveis, portanto realiza-se sua lavagem e filtração em filtro rotativo a vácuo para retirar o açúcar remanescente. O resíduo desta filtração denomina-se torta do filtro, produzido na proporção de 1% a 4% em peso da cana moída. Ou seja, cada tonelada de cana produz cerca de 40kg de torta. Tem em sua constituição de 1,2% a 1,8% de fósforo, alto teor de cálcio e consideráveis quantidades de outros micronutrientes. Sua umidade gira em torno de

70%. As opções de destinação final para a torta são a compostagem ou a sua aplicação como fertilizante na lavoura (ANA, 2009).

2.5.4.3. Cinzas/Fuligem

As cinzas geradas nas câmaras de combustão das caldeiras devem ser retiradas para evitar perda de eficiência destes equipamentos. Composta de cinzas, areia e outros restos minerais presentes no bagaço que é alimentado às caldeiras, são gerados, em média, 2,0kg de cinzas/ton de cana processada. A fuligem presente nos gases de combustão da caldeira deve ser retirada, de preferência por equipamentos de via úmida. Os efluentes desta limpeza de gases passam por sistema de tratamento de floculação/decantação, e o lodo deste tratamento se caracteriza como resíduo sólido final do processo.

2.5.4.4. Outros Resíduos

As atividades auxiliares em unidade agroindustrial sucroalcooleira geram resíduos de várias naturezas. Lixo comum é produzido nos escritórios, sanitários e varrição, constituído principalmente de papel, papelão, plásticos, estopa, etc, podendo ser coletado de forma a ser parcialmente destinado à reciclagem, enquanto o resto é encaminhado ao aterro de resíduos mais próximo. As oficinas mecânicas geram estopas sujas de óleos e graxas, além de resto de lubrificantes, considerados resíduos classe I (ABNT), sendo coletados em tambores de 200 litros. Parte pode ser reaproveitada em equipamentos, ou encaminhado para empresas que recuperam o óleo. No campo, os defensivos agrícolas utilizados devem ter suas embalagens coletadas, manuseadas e acondicionadas adequadamente, posteriormente promovendo sua logística reversa. Este gerenciamento é importante para evitar danos de contaminação ao meio ambiente, e riscos ocupacionais, principalmente.

2.5.5. Efluentes Líquidos

Os efluentes líquidos, provenientes das atividades do setor, são poluidores orgânicos e, de acordo com a Tabela 7, estima-se que uma usina de pequeno porte (1.000.000 toneladas de cana/ano) tem o mesmo potencial de carga orgânica de uma cidade de 1,5 milhão de habitantes. Seguindo a mesma abordagem do Manual do CTC, (ANA, 2009), vamos segmentar a descrição e análise de efluentes líquidos, em águas residuárias e vinhaça.

Tabela 7. Carga Orgânica Potencial e Remanescente e o Equivalente Populacional dos Despejos da Indústria Sucroalcooleira (base 1997).

Carga Orgânica	Carga Orgânica (kg DBO ₅ /t cana)	Equivalente Populacional ⁽¹⁾ (pessoa/t cana dia)
Carga potencial (incluso a vinhaça)	12,46	231
Carga lançada	0,199	3,7
Eficiência	98,40%	

Obs.: (1) 0,054kg DBO₅/pessoa.dia

Fonte: ANA, 2009.

2.5.5.1. Águas Residuárias

As águas residuárias são formadas pela soma dos efluentes decorrentes de diferentes processos, como o de lavagem de pisos e equipamentos, torres de resfriamento, sobra de águas condensadas e compostos de purgas. As principais características físico-químicas dos efluentes provenientes de cada processo, são apresentadas na Tabela 8. Já uma caracterização de águas residuárias enviadas para a lavoura de cana podem ser encontradas na Tabela 9, respectivamente (ANA, 2009).

Tabela 8. Resumo das Características dos Despejos de Usinas e Destilarias em Geral.

Despejos		Características Físico-químicas						
		Vazão	pH	T [°C]	RS [mg/L]	DQO [mg/L]	DBO ₅ [mg/L]	OG [mg/L]
Lavagem de cana		2 a 5 m³/t cana	5 - 6	amb.	5 - 10	280 - 700	180 - 500	0
Resfriamento de equipamentos (moendas, turbinas e turbogeradores)		0,715 m³/t cana	7	< 30	< 0,5	0	0	-
Colunas barométrica e multijatos da fábrica		70 a 100 L/kg açúcar	6 - 7	45	< 0,2	20 - 80	10 - 40	0
Resfriamento Destilaria	Caldo para mosto	30 L/L etanol	7	< 45	0	0	0	0
	Dornas	60 a 80 L/L etanol	7	<35	0	0	0	0
	Condensador	80 - 120 L/L etanol	7	50 - 60	0	0	0	0
	Total	200 L/L etanol	7	50	0	0	0	0
Lavagem de gases da caldeira		2 L/kg vapor	8	80	50 - 100	200 - 300	100 - 150	-
Condensados	Vapor escape	40 a 50 L/kg açúcar	7	80	0	0	0	0
	Vapor vegetal	50 a 60 L/kg açúcar	5 - 6	80 a 60	0	600 - 1.500	300 - 800	0
Limpeza de pisos e equipamentos.		50 L/t cana	5 - 6	Amb.	< 0,5	1.000 - 3.000	800 - 1.500	> 20
Esgoto doméstico		70 L/funcionário.dia	6 - 7	amb.	5 - 20	600	300	-

Fonte: ANA, 2009.

Tabela 9. Evolução da Característica Físico-Química Média das Águas Residuárias Industriais Enviadas para a Lavoura de Cana.

Parâmetros	Águas Residuárias	
	CTC, 1995	CTC, 2008
Temperatura (°C)	40	–
pH	4,0	5,8
DBO ₅ (mg/L)	1.000 – 1.500	5.050,5
DQO (mg/L)	2.000 – 3.000	10.575,8
Sólidos Totais (mg/L)	8.000	6.056,7
Fósforo Total (mg/L P)	8,0	12,1
Nitrogênio Total (mg/L N)	20 – 40	70,1
Óleos e Graxas (mg/L)	9 – 10	não determinado
Potássio (mg/L K)	7 – 42	136,2

Fonte: ANA, 2009.

A flegmaça é originada na Coluna “B” de retificação do etanol e possui baixo potencial poluidor em termos de carga orgânica. Sua caracterização físico-química é apresentada na Tabela 10 (ANA, 2009)

Tabela 10. Resultados Físico-Químicos da Flegmaça..

Parâmetros	Unidade	Variação dos Parâmetros		
		Média	Mínimo	Máximo
Alumínio	mg/L	< 0,25	< 0,2	< 0,5
Cálcio	mg/L	3,10	0,5	6,4
Cloreto (HPIC)	mg/L	2,68	< 0,1	6
Cobre	mg/L	0,58	< 0,05	1,5
DBO	mg/L	1.173,33	150	5.700
DQO	mg/L	1.563,50	270	7.400
Ferro	mg/L	0,25	< 0,05	0,5
Fósforo total	mg/L	1,50	< 1	3
Magnésio	mg/L	1,22	0,2	2,6
Manganês	mg/L	0,08	< 0,05	0,1
N total	mg/L	22,33	4	100
N amoniacal	mg/L	3,33	2	5
pH	-	3,80	3,4	4,3
Potássio total (K ₂ O)	mg/L	8,85	1,4	20
RAS ^(*)	-	0,9	0,2	2,4
Sódio	mg/L	1,68	0,4	6
Sulfato (HPIC)	mg/L	15,63	< 0,2	32,4
Zinco	mg/L	0,16	< 0,05	0,3

Obs.:

- Mínimas, máximas e médias de 6 amostras de flegmaça coletas em 1997 em associadas ao CTC.

- (*) RAS, Razão de Adsorção Sódio = $[Na^+ / RaizQuad(Ca^{++} + Mg^{++} / 2)]$, obtidos com os dados.

- HPIC - High Performance Ion Chromatography

Fonte: ANA, 2009

2.5.5.2. Vinhaça

A vinhaça, como visto anteriormente, é originada na Coluna “A” de destilação do etanol, e é o despejo com maior potencial poluidor de toda a indústria. A Tabela 11 apresenta um resumo da caracterização físico-química da mesma (ANA, 2009).

Tabela 11. Resumo das Características da Vinhaça.

	Vazão	pH	T [°C]	RS [mg/L]	DQO [mg/L]	DBO ₅ [mg/L]	OG [mg/L]
Vinhaça e flegmaça	12-18 L/L etanol	4 - 4,5	80	3 - 5	25.000 - 40.000	15.000 - 20.000	8

Fonte: ANA, 2009

O lançamento de vinhaça nos corpos hídricos é proibido pela Portaria nº 323, de 1978, devido ao seu alto potencial poluidor, principalmente relacionado à carga orgânica (ANA, 2009).

A aplicação da vinhaça em solo agrícola é uma prática adotada na maioria das usinas e pode-se dizer que é uma tecnologia conhecida. Esse procedimento traz efeitos benéficos principalmente relacionados à redução da necessidade de utilização de adubação mineral nas lavouras (MARTINS, 2011). No entanto, quando aplicada em doses inadequadas pode trazer efeitos negativos, como o comprometimento da cana para produção em termos de qualidade, contaminação do lençol freático e a salinização do solo (MARTINS, 2011).

Para que possa ser utilizada na lavoura, a vinhaça passa por um tratamento prévio que visa, principalmente, diminuir a sua temperatura. Os principais sistemas de transporte, da vinhaça para o campo, são o dutoviário e o rodoviário. Sendo que este último possui custo bastante superior devido principalmente ao consumo de combustível. Essa limitação implica na necessidade em atender uma distância economicamente viável, de forma que os custos sejam menores do que os da adubação mineral convencional. A Figura 27 mostra essa relação. Vale destacar a influência da alta dos preços do adubo mineral na época. (ANA, 2009).

Ademais, o transporte dutoviário exige um alto investimento inicial, na implementação de adutoras de racalque ou de gravidade, canais, sifões invertidos, tanques de armazenamento, entre outras ações. Os projetos hidráulicos desses sistemas permitem que a vinhaça atinja distâncias de 20 km ou mais, terminando em tanques pulmões para posterior distribuição por canais ou carregamento de caminhões (ANA, 2009).

Distância Econômica de Aplicação de Vinhaça (CTC, 2009)

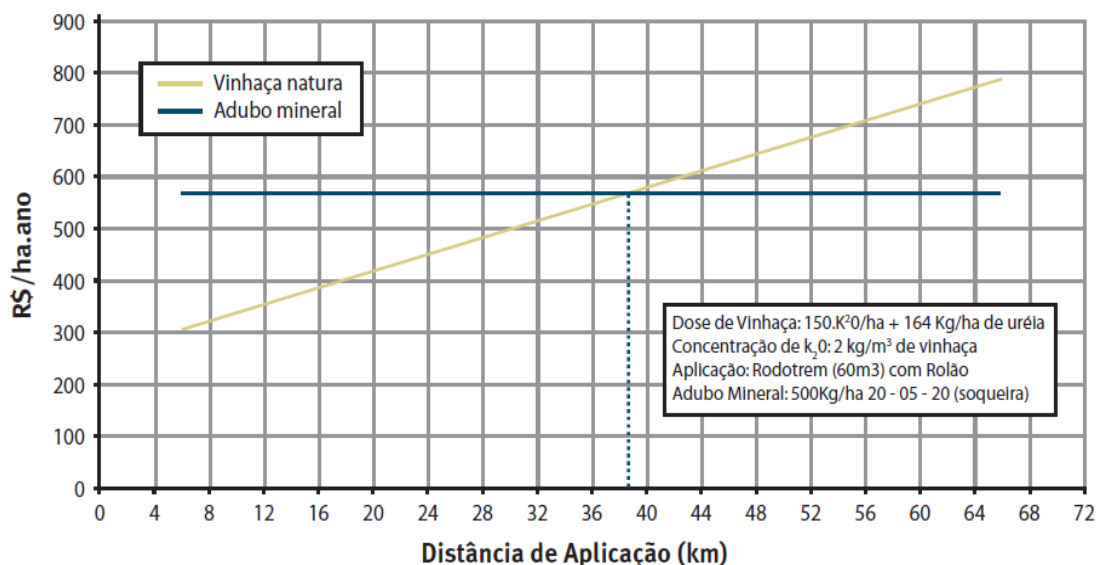


Figura 27. Variação do custo da fertirrigação com vinhaça natural com a distância média de aplicação e distância econômica em relação à adubação mineral. Fonte: ANA, 2009.

Visando, principalmente, a prevenção da poluição de lençóis freáticos, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) criou a Norma Técnica P4.231, que regulamenta a dosagem de aplicação, a impermeabilização de tanques de armazenamento e canais primários, além de prever a apresentação anual do Plano de Aplicação da Vinhaça (PAV), por parte das indústrias.

As características físico-químicas mais relevantes da vinhaça em termos de potencial poluidor são a carga orgânica (DBO5 e DQO) e o potássio (mg/L K₂O). Também são encontrados sódio, enxofre (sulfeto), cálcio, ferro e outros (MARTINS, 2011). O cálculo da dosagem de vinhaça a ser aplicada no solo é função do K₂O, parâmetro que deverá ser determinado, conforme consta na citação a seguir:

“A dosagem máxima de vinhaça a ser aplicada no tratamento de solos agrícolas em cultura de cana-de açúcar será determinada pela equação:

$$m^3 \text{ de vinhaça} / ha = \frac{[(0,05 \times CTC - ks) \times 3744 + 185]}{kvi}$$

Onde:

0,05 = 5% da CTC

CTC: Capacidade de Troca Catiônica, expressa em cmolc/dm³, dada pela análise de fertilidade do solo realizada por laboratório de análise de solo e utilizando metodologia de análise do solo do Instituto Agronômico - IAC, devidamente assinado por responsável técnico.

ks: concentração de potássio no solo, expresso em cmolc/dm³, à profundidade de 0 a 0,80 metros, dada pela análise de fertilidade do solo realizada por laboratório de análise de solo utilizando metodologia de análise de solo do Instituto Agronômico – IAC, devidamente assinado por responsável técnico.

3744: constante para transformar os resultados da análise de fertilidade, expressos em cmolc/dm³ ou meq/100cm³, para kg de potássio em um volume de 01 (um) hectare por 0,80 metros de profundidade.

185 = massa, em kg, de K₂O extraído pela cultura por hectare, por corte.

kvi: concentração de potássio na vinhaça, expressa em kg de K₂O/m³, apresentada em boletim de resultado analítico, assinado por responsável técnico, resultante da média anual obtida nas análises semanais ou da média obtida nas análises semestrais.” (CETESB, 2005)

Para a determinação dos aspectos e parâmetros da vinhaça, a Norma descrita determina a coleta na fonte de acordo com a metodologia da CETESB, 2011. Já para a determinação da Capacidade de Troca Catiônica, destaca-se a importância do uso do Sensoriamento Remoto (MARTINS, 2011).

É importante lembrar que a composição da vinhaça é relativamente variável por conta, principalmente, de fatores como a composição das matérias primas, do sistema usado no preparo do mosto, do método de fermentação, da raça de levedura utilizada e do processo de destilação (MARTINS, 2011).

Esse importante resíduo da indústria sucroenergética pode ser procedente de mostos de melaço, do próprio caldo ou de um composto misto entre os mesmos, dependendo do tipo de processo adotado na indústria. Na Tabela 12 apresentam-se as características quali-quantitativas de vinhaça proveniente desses diferentes compostos. (ANA, 2009). Como se pode observar, a vinhaça proveniente do mosto

de melaço contém maior quantidade de nutrientes e carga orgânica do que a vinhaça proveniente do mosto de caldo.

Tabela 12. Características Quali-Quantitativas de Vinhaça Procedentes de Mostos de Melaço, Caldo e Misto.

Parâmetro	Melaço	Caldo	Misto
pH	4,2 - 5,0	3,7 - 4,6	4,4 - 4,6
Temperatura (°C)	80 - 100	80 - 100	80 - 100
DBO ₅ (mg/L O ₂)	25.000	6.000 - 16.500	19.800
DQO (mg/L O ₂)	65.000	15.000 - 33.000	45.000
Sólidos totais (mg/L)	81.500	23.700	52.700
Sólidos voláteis (mg/L)	60.000	20.000	40.000
Sólidos fixos (mg/L)	21.500	3.700	12.700
Nitrogênio (mg/L N)	450 - 1.610	150 - 700	480 - 710
Fósforo (mg/L P ₂ O ₅)	100 - 290	10 - 210	9 - 200
Potássio (mg/L K ₂ O)	3.740 - 7.830	1.200 - 2.100	3.340
Cálcio (mg/L CaO)	450 - 5.180	130 - 1.540	1.330 - 4.570
Magnésio (mg/L MgO)	420 - 1.520	200 - 490	580 - 700
Sulfato (mg/L SO ₄)	6.400	600 - 760	3.700 - 3.730
Carbono (mg/L C)	11.200 - 22.900	5.700 - 13.400	8.700 - 12.100
Relação C/N	16 - 16,27	19,7 - 21,07	16,4 - 16,43
Matéria orgânica (mg/L)	63.400	19.500	3.800
Substâncias redutoras (mg/L)	9.500	7.90	8.300

Fonte: ANA, 2009

A legislação específica relacionada à recuperação e ao reaproveitamento adequado da vinhaça é insuficiente, contando apenas com a norma técnica citada.

3. ANÁLISE DOS DADOS

A análise, sob as perspectivas e objetivos deste estudo, se dará com a utilização de uma metodologia que compreende, primeiramente, a apresentação dos resultados da análise aspecto/impacto associados aos processos industriais correspondentes. Em seguida, faz-se uma análise crítica e comparativa entre os dados do objeto de estudo em específico, com os dados de referência apresentados no capítulo anterior.

Posteriormente utiliza-se, como ferramenta, uma matriz de decisão, que considera, essencialmente, as análises e considerações deste capítulo, para chegar, finalmente, nos resultados pretendidos.

3.1. Análise dos Dados do Objeto de Estudo

3.1.1. Uso da Água e Recursos Hídricos

O uso da água e recursos hídricos na unidade industrial escolhida como objeto de estudo pôde ser descrito por meio da obtenção de dados de captação, produção e balanço hídrico junto à empresa.

A empresa possui ETA para tratar a água que capta do Rio Sapucaí, atualmente em torno de 0,698 m³/ton de cana processada. A captação de água para o refeitório e atividades “domésticas” vêm de poço de águas profundas. Vale ressaltar que pelo fato da colheita ser mecanizada, a lavagem de cana pode ser feita a seco, o que ocorre na indústria estudada e por si só, já reduz significativamente o consumo de água.

O uso da água nessa indústria é bastante controlado. Foram instalados 21 medidores de vazão em diversas partes da indústria, como na captação, torres de resfriamento, tratamento do caldo, caldeira, moenda entre outros. A foto da Figura 28 mostra um dos medidores de vazão da indústria.



Figura 28. Foto de um dos Medidores de Vazão. Fonte: Objeto de Estudo

A Figura 29 mostra a evolução do indicador de captação de água do objeto de estudo nos últimos seis anos, revelando que tal indicador não ultrapassou 0.7 m³/ton cana nesse período.

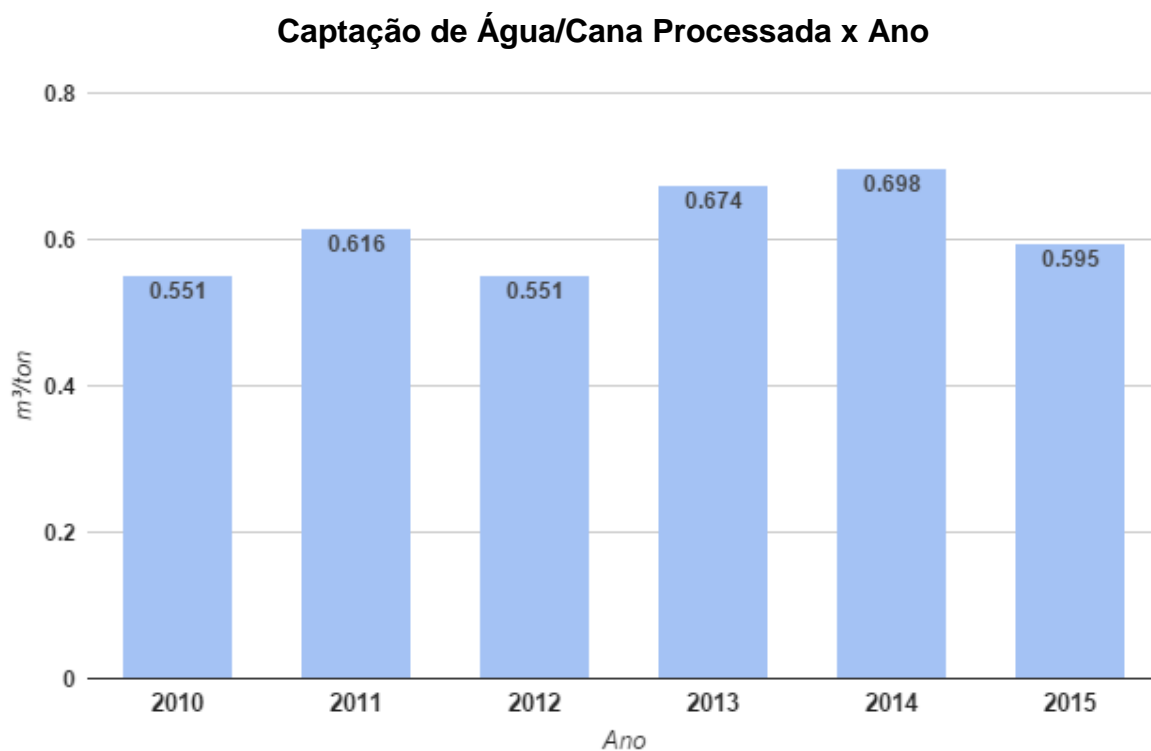


Figura 29. Captação de Água/Cana Processada x Ano

A Tabela 13 exibe os dados referentes ao balanço hídrico do objeto de estudo no ano de 2014. A partir dela e dos dados de referência descritos no capítulo anterior, produziu-se a Tabela 14, onde faz-se uma comparação entre os respectivos indicadores.

Tabela 13. Balanço Hídrico do Objeto de Estudo no ano de 2014.

Balanço Hídrico (2014)			
		m³/ton	m³/h
Entrada	Captação	0.698	615
	Condensado	0.811	715
Subtotal		1.509	1330
Consumo (Perdas)	Torres de Resfriamento	0.187	165
	Spray	0.176	155
	Caldeira (Alimentação)	0.091	80
	VLC	0.028	25
	Outros	0.020	18
Subtotal		0.503	443
Saída	Águas Residuárias	0.471	415
	Vinhaça	0.293	258
	Água no Bagaço	0.155	137
	Água na Torta dos Filtros de Lodo	0.034	30
	Água no Etanol	0.030	26
	Água na Torta dos Filtros VLC	0.024	21
Subtotal		1.007	887
Balanço		0.000	0

Fonte: Objeto de Estudo

Tabela 14. - Comparação entre Indicadores do Objeto de Estudo e Dados de Referência.

Indicadores	Objeto de Estudo (m³/ton)	Dados de referência (m³/ton) (ANA, 2009)	
		Média	Meta
Captação	0,698	2	1
Perdas	0,503	0,9	0,9
Reuso Agronômico	0,764	0 a 1,1	1,1
Lançamento	0,000	0 a 1,1	0
Uso e reúso	22*		
Índice de Reúso	97%	91%	95%

Fonte: Objeto de Estudo.

* Adotou-se o mesmo indicador de referência para o objeto de estudo

Portanto, nota-se que os indicadores de captação, perdas, e índice de reúso encontram-se melhores do que as metas propostas pelos dados de referência. Já os de reúso agrônômico e lançamento apresentam valores bastante adequados e bastante próximos aos valores das metas propostas pelos dados de referência. Trata-se de um aspecto ambiental já bastante regulamentado e com alto grau de controle por parte do objeto de estudo e que apresenta, portanto, pequeno potencial de melhoria ambiental e pouca capacidade de atuação em termos de custos.

3.1.2. Uso de Energia e Cogeração

A usina conta com uma capacidade instalada de cogeração de energia elétrica da ordem de 144.200 MWh por ano, sendo parte utilizada no processo, e parte exportada para o sistema elétrico nacional, conforme Tabela 15:

Tabela 15. Quantidade de Energia Elétrica Consumida e Exportada

Energia Elétrica Consumida (MWh/ano)	64790
Elétrica Elétrica Exportada (MWh/ano)	79410
Capacidade Instalada de Cogeração (MWh/ano)	144200

A partir dos dados obtidos na Tabela 15, e da capacidade de cana processada da indústria, obteve-se a taxa de utilização de energia elétrica. Para as parcelas relativas às energias mecânica e térmica, foi estimado o consumo de energia combinando-se as taxas de utilização disponibilizadas na Tabela 15 com a capacidade de processamento da usina, conforme tabela a seguir:

Tabela 16. Tipos de Uso de Energia

Tipo de Uso	Taxa de utilização (kWh/ton)	Consumo de Energia (MWh/ano)
Energia Elétrica	10.8	64800
Energia Mecânica	16	96000
Energia Térmica	330	1980000

Portanto, pelos dados e análises já apresentados, considerando que trata-se de uma atividade superavitária em energia elétrica, e que utiliza amplamente as energias térmica e mecânica, cogeradas em seus processos, pode-se afirmar que esse aspecto apresenta grau de controle adequado, baixo potencial de recuperação de recursos e baixo efeito na competitividade econômica.

3.1.3. Emissões Atmosféricas e Qualidade do Ar

Segundo dados levantados com representantes da empresa, constatou-se que a mesma tem suas emissões de acordo com os padrões de emissão estabelecidos pela CETESB. Após auditoria interna realizada na unidade, não se verificou concentrações acima do permitido para os poluentes, em especial NOx e material particulado. A unidade conta com sistema de tratamento via úmida, com equipamento de lavagem de gases. Além disso, a colheita de cana é feita de forma mecanizada, o que já implica na não emissão de gases pela prática de queimada de cana.

Em relação a esse aspecto, pode-se afirmar que as condições de controle são adequadas, com potencial de danos ambientais e de recuperação de recursos baixos, com legislação e fiscalização bem estabelecidas. Não apresenta potencial de recuperação de recursos nem de melhoria na competitividade da empresa.

3.1.4. Resíduos Sólidos

Apesar de haver tecnologias novas sendo estudadas a respeito de aproveitamentos energéticos da biomassa do palhiço e do bagaço como a extração de etanol celulósico (chamado de etanol de segunda geração), na unidade estudada a destinação deste é como combustível (queima) nas caldeiras, para a geração de energia. Esse fator contribui para o aumento da eficiência do processo, proporcionando uma destinação para os resíduos e gerando energia mecânica, térmica e elétrica, não apenas para suprimento das necessidades da indústria, como também para venda à companhia energética.



Figura 30. Sistema de Carregamento de Caminhões com Resíduos destinados à Fertirrigação. Fonte: Objeto de Estudo.

A torta de filtro do sistema de tratamento do caldo, por sua vez, é gerada em quantidades muito pequenas se comparadas ao montante de cana processada, e é destinada a fertilização da lavoura, juntamente com outros resíduos pelo sistema mostrado na foto da Figura 30.

As cinzas e a fuligem remanescente do sistema de lavagem de gases das caldeiras também são geradas em pequenas quantidades, apresentando-se como lodo, sendo adicionado a parcela de águas residuárias.

Os resíduos domésticos gerados nas instalações da indústria passam por coleta seletiva, com separação entre os materiais recicláveis da matéria orgânica, sendo posteriormente encaminhados para cooperativas de reciclagem, e aterro sanitário, respectivamente.

Tendo em vista o exposto acima, conclui-se que muito do que pode ser feito em relação aos resíduos já é colocado em prática, com potenciais de danos ambientais reduzidos, e alta recuperação de recurso na forma de energia, o que já contribui para competitividade da empresa, uma vez que transforma a maior parte dos resíduos em energia, restringindo então a capacidade de atuação e melhoria nesse aspecto, com o nível tecnológico atual.

3.1.5. Águas Residuárias

Como já visto anteriormente nos dados de referência, as águas residuárias do objeto de estudo são formadas pela soma dos efluentes decorrentes de diferentes processos. Dentre eles, destaca-se a lavagem de pisos e equipamentos, torres de resfriamento, a sobra de águas condensadas, os compostos de purgas e os esgotos sanitários. A indústria possui vazão zero de lançamento de efluentes em corpos hídricos, sendo que aqueles que não podem mais ser reutilizados são enviados para a lavoura e utilizados na fertirrigação. Essa prática pode ser considerada adequada, uma vez que o potencial poluidor dessas águas é baixo.

A indústria possui um sistema de separação de partículas, como mostra a Figura 31, que visa a redução de sólidos totais presentes nos efluentes, sendo os resíduos sólidos enviados para a lavoura por meio de caminhões, como visto anteriormente. Tornando, dessa forma, a eficiência do reaproveitamento das águas residuárias ainda maior.



Figura 31. Sistema de Separação de Partículas da Água. Fonte: Objeto de Estudo.

A indústria possui uma ETE (Figura 32) para tratar efluentes sanitários, sendo os resíduos sólidos da estação encaminhados para a SABESP para destinação final e os efluentes do tratamento encaminhados para a fertirrigação.



Figura 32. Estação de Tratamento de Esgoto. Fonte: Objeto de Estudo.

A Figura 33 relaciona os índices de captação de água com os índices de geração de águas residuárias que são destinadas para uso agrícola no objeto de estudo, sendo em geral aproximadamente metade da vazão captada. Considerando o alto índice de reuso de água da indústria, o alto desempenho já existente em termos de eficiência e as propriedades físico-químicas das águas residuárias da indústria, pode-se afirmar que esse aspecto está relativamente bem resolvido, sob a perspectiva de práticas de produção mais limpa e gestão ambiental.

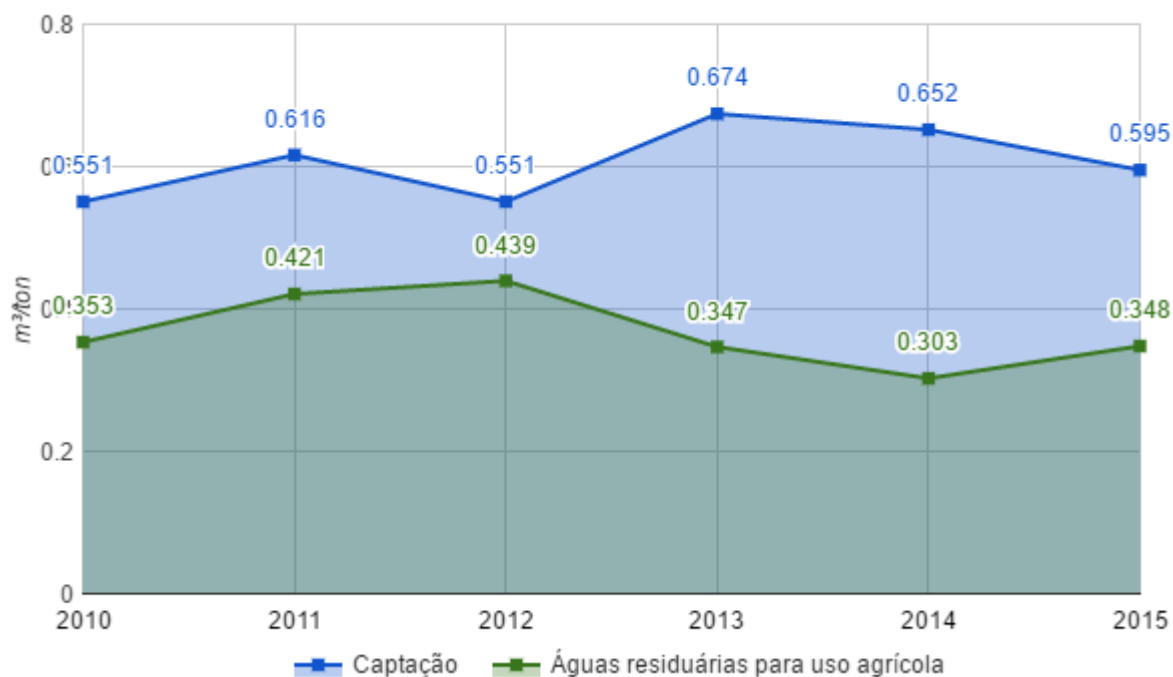


Figura 33. Captação de Água e Águas Residuárias Destinadas para Uso Agrícola: Fonte: Autores.

3.1.6. Vinhaça

Nota-se que a vinhaça é um dos maiores problemas ambientais associados às atividades ligadas à cana-de-açúcar, principalmente pelo fato de ser o seu resíduo o mais relevante tanto em termos quantitativos, quanto em termos qualitativos. Além disso, a legislação associada à vinhaça é bastante insuficiente e a única norma técnica existente se limita a regulamentar a sua aplicação em solo agrícola. Sabe-se também do seu grande potencial poluidor em termos de carga orgânica, sendo o seu descarte em corpos hídricos proibido, além da possibilidade de contaminação do lençol freático quando utilizada na fertirrigação.

A vinhaça, no objeto de estudo, é utilizada para fertirrigação da lavoura e seu transporte é feito pelos meios dutoviário e rodoviário, como ilustra a foto na Figura 34 Canais e tanques impermeabilizados compõe o sistema. Vale destacar que não é realizada a redução ou concentração da vinhaça, visando a redução de custos de transporte da mesma para a lavoura, e que essa prática vem sendo avaliada e estudada atualmente pela empresa.



Figura 34. Tanques, Canais e Caminhões utilizados para o Transporte e Armazenamento da Vinhaça:
Fonte: Objeto de Estudo.

A fim de preservar o solo, a empresa adota princípios de conservação como o plantio direto de mudas (no qual a palha e o resto de outras culturas são mantidos no solo, garantindo cobertura, maior retenção de água, incorporação de nitrogênio, proteção contra a erosão, contra a compactação e evitando maior perda de nutrientes); curvas de nível; eliminação de sulcos e depressões no terreno; correção de acidez e fertilidade do solo; descompactação e terraceamento. Além disso, emprega a rotação de culturas, sistema que melhora as características físicas, químicas e biológicas do solo; auxilia no controle biológico de espécies daninhas; doenças e pragas; e repõe matéria orgânica, além de proteger o solo de agentes climáticos.

Essas práticas, citadas no parágrafo anterior, diminuem o potencial fertilizador da vinhaça uma vez que o solo já vem sendo nutrido e condicionado adequadamente através de outras práticas.

A Tabela 17 mostra alguns indicadores de caracterização da vinhaça gerada no objeto de estudo e destaca-se nela a relevância quantitativa da produção desse resíduo no objeto de estudo. Uma característica relevante para esta análise é a de que a vinhaça produzida pela indústria é originada, principalmente, a partir do melaço.

Tabela 17. Geração e Caracterização da Vinhaça Gerada no Objeto de Estudo

Balanco de Geração de Vinhaça em Função da Geração de Etanol	
Produção de Etanol	600 m³/dia
	25 m³/h
Vinhaça	
Geração de Vinhaça	11 m³/m³ Etanol
	275 m³/h
Brix da Vinhaça	4,0 %
Densidade relativa	1,02
Vazão mássica	281,22 ton/h
Teor de Água	269,97 ton/h
Teor de Sólidos	11,25 ton/h

Outros indicadores importantes, relacionados à aplicação de vinhaça em solo agrícola, são apresentados na Tabela 18 de análise realizada em maio de 2016. Comparando a concentração de Potássio, medida pelo K₂O, na vinhaça, com os dados de referência, nota-se que essa concentração encontra-se bastante alta, aumentando o potencial poluidor do solo em termos de salinização, podendo comprometer a produtividade do solo.

Tabela 18. Resultados da Análise da Vinhaça. Fonte: Objeto de Estudo.

Análise da Vinhaça (05/2016)	
Potássio (mg/L) K ₂ O	18639
Nitrogênio Orgânico (mg/L)	2,24

Por fim, considera-se o potencial de reaproveitamento de recursos, desse aspecto, alto, uma vez que ele contém tanto água, como nutrientes e outras características e substâncias passíveis de reaproveitamento. A capacidade de atuação em termos de custos também é alta, uma vez que a empresa já gasta uma quantidade considerável de recursos nessa área e, como já foi visto, existem alternativas menos custosas até mesmo para o mesmo uso que já é feito por parte da indústria. Além disso, as condições de controle desse aspecto são baixas, considerando o seu potencial poluidor no solo agrícola e a insuficiência reguladora para tratar do assunto por parte de legislações, normas e agências. Acredita-se num potencial efeito positivo na competitividade econômica, se avaliadas alternativas para esse uso considerando fatores econômicos.

3.2. Matriz de decisão

3.2.1. Metodologia

Para a definição do problema associado, ao aspecto ambiental/impacto ambiental a ser tratado na continuação do trabalho, será utilizada uma matriz de decisão baseada nos sistemas de gestão ambiental, onde são atribuídos pesos aos aspectos e impactos conforme os filtros ou critérios estabelecidos.

3.2.2. Descrição dos Critérios e Parâmetros de Análise

A seguir são expostos e descritos os critérios a serem considerados na matriz de decisão:

- **Capacidade para Atuação (Custo)**

Este critério se relaciona ao quanto de recursos financeiros será necessário despendar para se adequar o aspecto de forma a diminuir seus impactos.

- **Condição de Controle Atual**

Aqui verifica-se a existência ou não de um ou mais sistemas que, adequem os aspectos ambientais, ou seja, se já existem medidas de controle no intuito de mitigar os possíveis impactos danosos ao meio ambiente.

- **Potencial de Danos Ambientais**

Este critério avalia a intensidade de possíveis impactos decorrentes de determinado aspecto.

- **Potencial de Recuperação de Recurso**

Avalia a possibilidade de recuperação e reaproveitamento de recurso de algum resíduo, ou ainda se é possível extrair e transformar em matéria prima ou insumo, o que é resíduo ou sobra de processo.

- **Grau de Restritividade da Legislação**

Avalia se existe legislação a ser respeitada e se o aspecto ambiental está de acordo com o preconizado na mesma.

- **Competitividade Econômica**

Avalia se a adequação do aspecto ambiental aos padrões e boas práticas irá melhorar a competitividade da empresa, ou seja, se irá proporcionar um diferencial em relação aos concorrentes.

A Tabela 19 mostra as notas a serem atribuídas para cada aspecto ambiental identificado, em relação a cada parâmetro de análise, segundo o potencial de cada aspecto para cada um dos critérios.

Tabela 19. Notas e Critérios Utilizados na Matriz de Decisão do Problema a ser Tratado.

Notas	Capacidade para Atuação (Custos)	Condição de Controle Atual	Potencial de Danos Ambientais	Potencial de Recuperação de Recursos	Grau de Restritividade da Legislação	Potencial de Melhora na Competitividade Econômica
1	Muito Baixa	Excelente	Muito Baixo	Muito Baixo	Excelente	Muito Baixo
2	Baixa	Bom	Baixo	Baixo	Bom	Baixo
3	Média	Regular	Médio	Médio	Regular	Médio
4	Alta	Ruim	Alto	Alto	Ruim	Alto
5	Muito Alta	Muito Ruim	Muito Alto	Muito Alto	Muito Ruim	Muito Alto

Notas mais altas significam maior relevância do aspecto para aquele parâmetro, sendo então as notas mais baixas atribuídas a menor relevância daquele aspecto em dado parâmetro.

3.3. Resultados

Com base no que foi discutido e analisado no item 3.1, foram atribuídas as notas para cada aspecto, e cada parâmetro de análise. A Tabela 20 mostra os resultados sintetizados em uma matriz de decisão.

Para o critério de atribuição de notas estabelecidas, as notas mínimas e máximas totais possíveis para um aspecto considerado são 6 e 30, respectivamente. Para efeito de compreensão, as notas são apresentadas também em uma escala de zero a dez (0 a 10).

Tabela 20. Resultados da Matriz de Decisão do Problema a ser Tratado.

ASPECTOS/ IMPACTOS	Capacidade e para Atuação (Custos)	Condição de Controle Atual	Potencial de Danos Ambientais	Potencial de Recuperação de Recursos	Grau de Restritividade de da Legislação	Potencial de Melhora na Competitividade Econômica	Pontuação Total	Pontuação (0 a 10)
Uso da Água e Recursos Hídricos	2	2	3	1	2	2	12	2.5
Uso de Energia e Cogeração	2	2	1	1	1	2	9	1.3
Emissões Atmosféricas	1	1	2	1	2	1	8	0.8
Resíduos Sólidos	1	1	2	1	2	1	8	0.8
Águas Residuárias	2	2	2	3	2	3	14	3.3
Vinhaça	3	3	4	5	4	3	22	6.7

O aspecto da geração da vinhaça obteve a maior nota, o que lhe confere uma maior importância na matriz decisória, tornando este aspecto destacado em relação aos outros.

4. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

4.1. Introdução

Após a realização da análise dos dados, do setor sucroalcooleiro em geral e do objeto de estudo, relativos aos aspectos ambientais relacionados ao uso de água, ao consumo e à geração de energia, às emissões atmosféricas, à geração de resíduos sólidos e efluentes líquidos, e à vinhaça, chegou-se a um resultado que tem a geração da vinhaça na fabricação de etanol como aspecto mais relevante, segundo os critérios e parâmetros considerados.

Por se tratar de um resíduo do processo gerado em grande quantidade, alternativas relacionadas a recuperação de recursos nele contidos, alternativas de tratamento possíveis, e destinação final desses resíduos podem ser melhor estudadas e exploradas. Nota-se que os outros aspectos identificados tiveram seus processos se tornando cada vez mais eficientes, tendo seus impactos mitigados ao longo de décadas recentes. A geração de vinhaça, por sua vez, apesar de ter uma aplicação bem estabelecida na fertirrigação, não obteve em outros usos ou aplicações, avanços igualmente significativos. Embora existam trabalhos que estudem a vinhaça e suas implicações, observa-se que trata-se de um aspecto que pode ser melhor entendido e avaliado.

Desta feita, o presente trabalho se propõe a avaliar alternativas de recuperação de recursos da vinhaça, de modo a agregar valor ao resíduo, entre outras alternativas de utilização do mesmo. Para tanto, faz-se uma caracterização e análise específicas da vinhaça, elencando os principais problemas e oportunidades de ganhos em termos de desempenho ambiental.

4.2. Caracterização da Vinhaça

A vinhaça é o resíduo mais importante da fabricação do álcool, tanto em termos de volume gerado como potencial poluidor. O problema da sua destinação remonta ao início da produção do combustível no Brasil, sendo um destacável e controverso tema de discussão (PINTO, 1999).

A vinhaça também é conhecida como vinhoto, calda, restilo, garapão, caxixi, mosto, slops, vinasse, dunder, stillage, cachaza, entre outros. Possui DBO na ordem de 12000 a 20000 ppm e é produzido em média 13 litros de vinhaça para um litro de

álcool. É caracterizada por ser um líquido marrom escuro de natureza ácida, poluente e corrosiva (SILVA, 2011).

O resíduo da destilação de uma solução alcoólica denominada vinho é o que se entende por vinhaça. O vinho por sua vez é o produto ou subproduto da fermentação alcoólica a partir do mosto, este último caracterizado como uma solução açucarada. A vinhaça é classificada segundo os componentes de preparo do mosto, quais sejam, caldo, melaço e misto.

A vinhaça de melaço é obtida quando praticamente toda a sacarose dos méis ricos e pobres é esgotada, através da reutilização desses méis na produção do açúcar, sendo o melaço o resíduo final. No entanto, hoje trabalha-se basicamente com o envio de méis para a destilaria e não somente o melaço, que normalmente é misturado com o caldo para correção do brix antes da fermentação, de acordo com o teor alcóolico pretendido. Portanto, a vinhaça classificada mista é bastante genérica, pois não considera a parcela referente ao caldo e aos méis utilizados na composição do mosto, e que influenciam na caracterização da vinhaça. Uma outra prática muito adotada por destilarias autônomas é o tratamento do caldo e mesmo a concentração deste, para obtenção do brix necessário, o que influencia nas características da chamada vinhaça de caldo.

Os insumos utilizados na fermentação e no tratamento da levedura (nutrientes, ácido fosfórico), nos componentes utilizados para desinfecção, a utilização de antiespumante, e o sangramento de levedura para a fabricação de levedura seca (fonte de proteínas para ração animal) influenciam nas características qualitativas da vinhaça. No caso das leveduras, destaca-se a redução da concentração de sólidos suspensos.

A vinhaça pode ter seu volume reduzido e seus parâmetros físico-químicos mais concentrados, através da injeção de vapor indireto nas colunas de destilação. A taxa de geração de vinhaça pode variar de 7 a 16 L/L de etanol, conforme o teor alcóolico no vinho e a recuperação ou não do vapor injetado na coluna de destilação "A". Se considerarmos que a flegmaça pode chegar a 18 L/L de etanol. É importante salientar a importância na redução da produção da vinhaça, o que otimiza sua reutilização na lavoura, reduzindo significativamente custos de transporte.

A Figura 35 mostra as variações das taxas de geração de vinhaça entre 1997 e 2009, em levantamento feito pelo CTC. É possível observar claramente as diferenças entre máximas e mínimas, e a taxa média tendendo a 12 L/L de etanol.

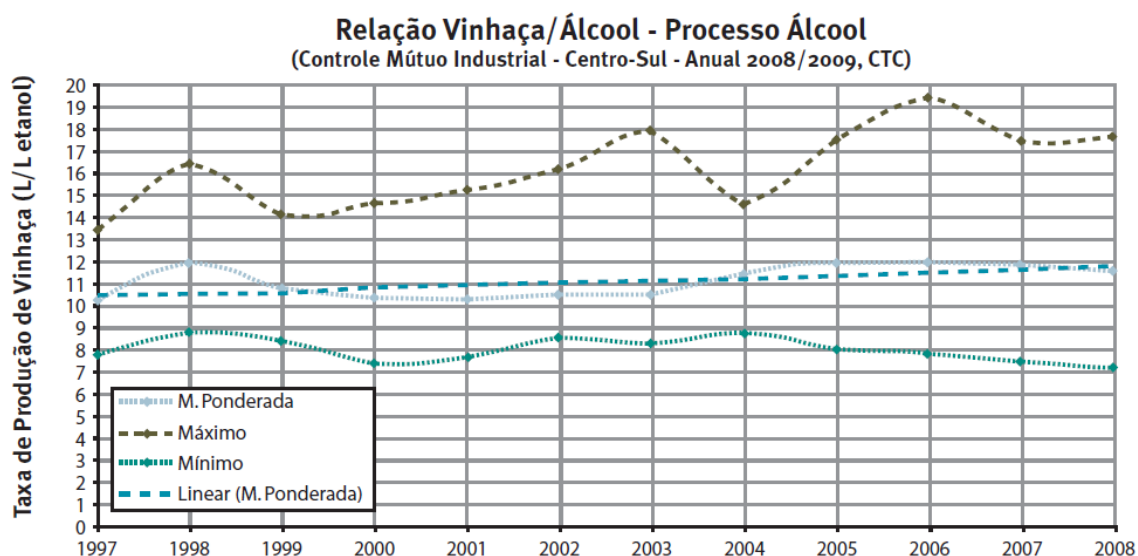


Figura 35 – Variações anuais das Taxas Máxima, Mínima e Média de geração de Vinhaça. Fonte: ANA, 2009.

De maneira geral, a vinhaça é um resíduo de alta temperatura, com quantidade elevada de matéria orgânica e concentração de sólidos, que pode ser reaproveitada como fertilizante devido a riqueza em potássio e teor de nitrogênio de nutrientes adequados à essa finalidade. Suas principais características físico-químicas do ponto de vista de controle de poluição e de sua utilização como fertilizante são (CTC, 2009):

Ph:	4,3
Temperatura:	90° C
Geração:	11,5 L/L etanol.
DBO ₅ :	14.833 mg/L
DQO:	23.801 mg/L
Relação DQO/DBO ₅ :	1,6
Sólidos Totais:	32.778 mg/L
N:P:K:	433:34:2,206 mg/L
Carga Orgânica:	274 g DQO/L etanol

A Tabela 21 mostra a tabela com a caracterização físico química da vinhaça obtida em dois levantamentos realizados pelo CTC em 2005 e 2007.

Tabela 21. Caracterização físico-química da vinhaça nos levantamentos realizados pelo CTC. Fonte: ANA, 2009.

Descrição	Un.	Valores Médios		Valores Extremos	
		CTC, 1995 ^(*)	CTC, 2007 ^(*)	Mínimo	Máximo
Alumínio	mg/L	-	18,30	< 5,0	120,0
Bário	mg/L	-	13,3	< 10	25,0
Cálcio (CaO)	mg/L	515,25	863,9	71	2614,7
Chumbo	mg/L	-	< 2,50	< 2,50	< 2,50
Cloreto	mg/L	1.218,91	-	480	2.300
Cobre	mg/L	-	0,50	< 0,2	3,2
Condutividade	µS/cm	-	6.553	3.780	12.500
DBO ₅	mg/L	16.949,76	11.331,1	5.879	75.330
DQO	mg/L	28.450,00	31.504,6	9.200	97.400
Dureza	mg/L	-	4.505,7	1.080	9.200
Etanol-CG	% v/v	0,09	-	0,01	1,19
Ferro	mg/L	25,17	14,71	2	200
Fósforo total	mg/L	60,41	32,0	< 10	188
Glicerol	% v/v	0,59	< 1,00	0,26	2,50
Levedura	% v/v	1,35	-	0,38	5,00
Lítio	mg/L	-	< 0,50	< 0,50	< 0,50
Magnésio (MgO)	mg/L	225,64	535,0	97	1.112,9
Manganês	mg/L	4,82	4,50	1	12
Nitrogênio total	mg/L	356,63	352,5	81,2	1.214,6
Nitrogênio amoniacal	mg/L	10,94	36,6	0,4	220,0
Nitrogênio nitrato	mg/L	-	< 0,8	< 0,1	4,2
Nitrogênio nitrito	mg/L	-	< 0,2	< 0,1	1,2
pH	-	4,15	4,8	3,50	4,90
Potássio total	mg/L	2.034,89	2.666,6	814	7.611,5
RAS ^(*)		2,47	1,10	0,3	4,69
Resíduos Sedimentáveis	mL/L	2,29	7,0	0,1	40
Sódio	mg/L	51,55	30,6	2,7	220
Sólidos Dissolvidos Fixos	mg/L	11.872,36	7.517,7	921	24.020
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	18.420,06	24.520,4	1.509	45.630
Sólidos Dissolvidos Voláteis	mg/L	6.579,58	1.7004,3	588	29.325
Sólidos Suspensos Fixos	mg/L	294,38	< 327,8	< 20	2.350
Sólidos Suspensos Totais	mg/L	3.966,84	-	260	9.500
Sólidos Suspensos Voláteis	mg/L	3.632,16	4901,1	40	15.900
Sólidos Totais (ST)	mg/L	25.154,61	29.596,3	10.780	56.780
Sulfato	mg/L	1.537,66	861,2	92,3	3.363,5
Sulfito	mg/L	35,90	-	5	153
Temperatura	°C	89,16	-	65	110,5
Zinco	mg/L	-	< 1,0	< 0,5	4,6

A figura 36 mostra a vinhaça saindo da destilaria e entrando em um tanque de armazenamento para distribuição na lavoura de cana:



Figura 36. Tanque de vinhaça da Usina de Cerradinho de Potirendaba. Fonte: SILVA, 2011.

4.3 Aspectos Ambientais da Vinhaça

Durante décadas, mesmo quando a geração da vinhaça era muito inferior aos volumes atuais, a comunidade científica e os órgãos de controle ambiental já se preocupavam com os impactos ambientais decorrentes da sua destinação incorreta (SILVA, 2011).

A literatura especializada lista inúmeros casos de disputas envolvendo usineiros e a população, por motivos de despejos das então chamadas “caldas de destilaria” nos cursos d’água, levando a graves problemas de poluição local, e até algumas catástrofes envolvendo casos de mortandade maciça de peixes, desabastecimento de água potável para cidades, proliferação excessiva de insetos, problemas de saúde pública e desorganização de economias locais dependentes da pesca (PINTO, 1999).

Desde os anos 40 e 50, o tema já havia despertado a atenção servindo como objeto de estudo, e as principais destinações da vinhaça eram o despejo em mananciais de superfície e áreas de sacrifício. Com a criação do PROÁCOOL na década de 70, os danos envolvendo essas práticas tomaram dimensões

preocupantes, devido ao aumento expressivo da produção do etanol e consequentemente da vinhaça.

Crescentes volumes do resíduo eram lançados em mananciais superficiais decorrendo na proliferação de microorganismos, depleção e até esgotamento do oxigênio dissolvido na água, e consequentemente a destruição da fauna e da flora aquáticas, além de comprometer o uso para fins de abastecimento público. Estava estabelecida a necessidade de buscar alternativas para o tratamento e ou destinação deste resíduo (SILVA, 2011).

É importante observar que embora o setor sucroalcooleiro tenha obtido importantes avanços do ponto de vista tecnológico desde a implementação do PROÁLCOOL, a taxa média de geração de vinhaça não apresentou reduções significativas nesse período, salvo em algumas usinas. A Figura 37 mostra o crescimento acentuado da produção de vinhaça entre 1967 e 1997.

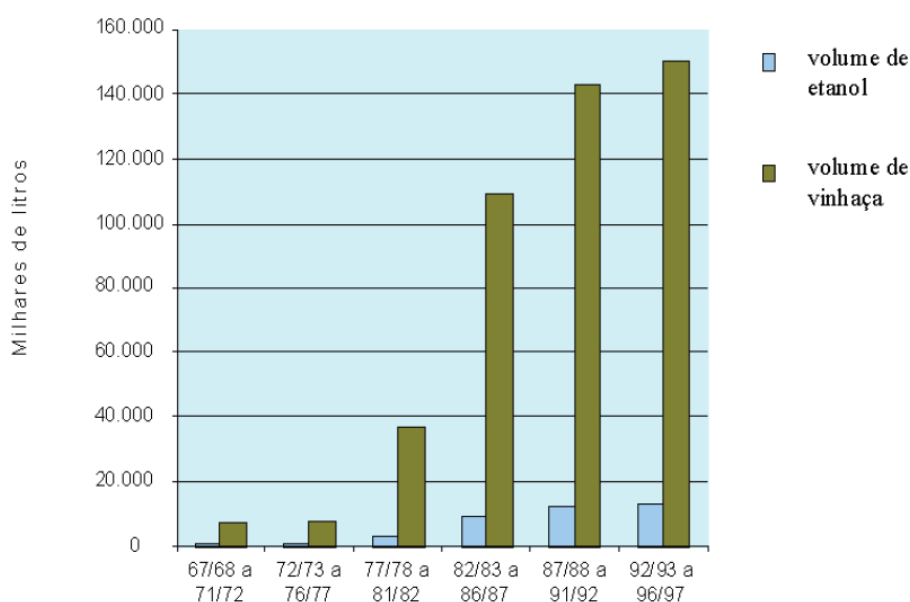


Figura 37. Evolução da produção anual de etanol e da geração da vinhaça pela indústria canaveieira no Brasil de 1967 a 1997. Médias em milhares de litros para safras agrupadas em quinquênios.

Fonte: SILVA, 2011.

Principalmente a partir da década de 80, com a difusão da prática de fertirrigação, e com o uso ainda continuado das “áreas de sacrifício”, o solo passou a ser o elemento mais afetado do ecossistema pela disposição da vinhaça, e passou a ser discutida também a contaminação das águas subterrâneas. Embora a própria lavoura da cana de açúcar tenha a capacidade de absorver muito rapidamente a maior parte dos sais, em especial o potássio, e assim diminuir os riscos de salinização e de contaminação do solo e do lençol freático, a ausência de controle

sobre a fertirrigação não garante essa prerrogativa. Deste modo há controvérsias sobre a salinização do solo e contaminação de aquíferos (SILVA,2011).

Os sais inorgânicos, em especial o potássio, a matéria orgânica e a água merecem destaque pela sua relevância e quantidade, ou concentração, em relação a outros componentes da vinhaça.

4.3.1. Carga Orgânica

A vinhaça possui alta carga de DBO (Demanda Biológica de Oxigênio) e DQO (Demanda Química de Oxigênio), e se a disposição for feita em mananciais, pode colocar em risco a vida da flora e da fauna, além de tornar a água imprópria para consumo humano devido ao cheiro e gosto desagradáveis e conter turbidez elevada, e ainda propiciar doenças endêmicas e proliferação de vetores. Produz mau cheiro devido a formação de gases fétidos, quando depositada por mais de 12 horas, ou empoçada na lavoura.

Sua aplicação desmedida pode provocar a saturação do solo e contaminação dos lençóis freáticos. A vinhaça é responsável pela maior parte de toda a DQO dos efluentes. A matéria orgânica pode elevar o pH do solo através da atividade microbiana na oxidação da mesma. No entanto, serve de alimento para os microorganismos do solo.

Com tratamento da vinhaça se obtém ganhos ambientais relevantes em relação ao aproveitamento integral da energia da biomassa da cana, aumentando a sustentabilidade na indústria e aumentando a taxa de conversão energética, podendo tornar a unidade produtora de etanol totalmente independente de combustíveis de origem fóssil, tanto na área agrícola como na planta industrial, já suprida pela energia cogenerada na queima do bagaço (PINTO,1999).

4.3.2. Água

A vinhaça é composta por 97% de água. Esta característica, somada ao fato de aquele resíduo ser produzido em grandes volumes, estabelece um grande potencial para recuperação deste recurso. A água retirada da vinhaça pode ser destinada à reuso na própria indústria, ou para irrigação da lavoura canavieira quando necessário.

Ainda, reduzir a quantidade de água minimiza o custo e aumenta a distância de transporte economicamente viável em relação à adubação química de origem

mineral. Os ganhos ambientais vêm da não saturação do solo por vinhaça e também da grande redução da aplicação dos adubos minerais.

A evaporação da água com o uso de evaporadores de múltiplo efeito é a tecnologia mais difundida e bastante utilizada na indústria da cana de açúcar em todo o mundo (SILVA, 2011). No entanto, outras técnicas de recuperação deste recurso podem ser exploradas, como a separação por membranas, que será abordada mais adiante neste trabalho.

4.3.3. Sais Inorgânicos

A vinhaça é um resíduo com altas concentrações de potássio, relativamente pobre em nitrogênio e carente de fósforo. Além desses elementos, apresenta teores apreciáveis de cálcio, magnésio e enxofre, como também outros minerais em quantidades menores.

Na grande maioria dos casos, este resíduo é empregado “in natura” na lavoura da cana de açúcar, em quantidades que variam entre 120 e 300 m³/ha, substituindo, em parte, o uso de fertilizantes. Com a fertilidade sendo mantida após anos de cultivo de cana de açúcar, a matéria orgânica sendo rapidamente mineralizada, a concentração de cálcio, potássio, nitrogênio e fósforo aumentam. A prática chamada de fertirrigação, parece ter oferecido a solução para o problema da disposição desse resíduo, quando foi proibido o simples descarte nos cursos d’água. No entanto, a prática requer cuidados, pois o nitrogênio na forma de nitrato pode infiltrar e atingir as camadas mais profundas do solo e do lençol freático, representando risco à saúde humana, em especial nos casos onde o descarte supera 400m³/ha (PINTO, 1999).

Estudos sobre efeitos da vinhaça no solo constataram que em solos arenosos, aplicações excessivas de vinhaça pode promover a salinização e o desbalanceamento catiônico, com redução da produção vegetal (SILVA, 2011).

De todos os resíduos da fabricação de açúcar e etanol, a vinhaça é o mais rico em nutrientes. Embora estudos e monitoramento do solo e lençol freático sejam necessários, a fertirrigação resulta em muitos benefícios para o solo agrícola. Muito progresso pode ser observado neste processo, como praticamente a banimento de áreas de sacrifício que deram lugar ao reaproveitamento do resíduo. Atingiu-se uma capacidade tecnológica, cujo ponto de equilíbrio econômico com a adubação mineral em função da distância a ser percorrida até a área a ser irrigada, satisfaz as exigências legais, e o transporte sendo feito via caminhões tanque e canais (SILVA, 2011).

A figura 38 mostra a quantidade de potássio produzido em função da produção de etanol e vinhaça, onde foi considerada a taxa de 13m³ de geração de vinhaça por m³ de etanol, e 3kg de potássio para 1m³ de vinhaça.

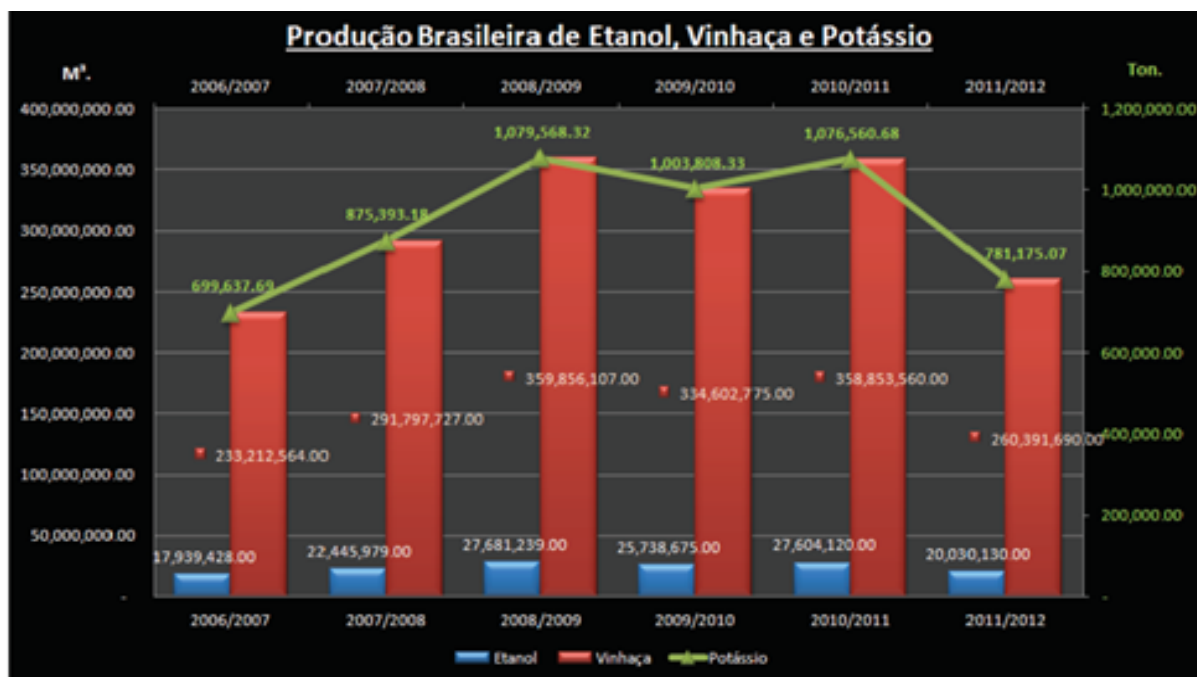


Figura 38. Produção brasileira de etanol, vinhaça e potássio (SILVA, 2011)

As dosagens de aplicação de vinhaça na fertirrigação variam de acordo com as necessidades da planta, a concentração do potássio disponível no solo e o seu grau de saturação em relação a Capacidade de Troca Catiônica que se pretende manter no solo (ANA, 2009).

O transporte rodoviário da vinhaça até a lavoura tem custo bem superior ao rodoviário, principalmente devido ao combustível. Daí a existência de uma distância econômica de aplicação. Essa distância depende em geral das condições topográficas, do tipo de projeto de fertirrigação, e da concentração de potássio na vinhaça. Em contrapartida, o transporte rodoviário consiste na aplicação imediata, não requerendo estudos complexos de implantação (ANA, 2009).

4.4. Considerações Finais

Em face ao exposto, conclui-se que a vinhaça se trata de um resíduo produzido em grandes volumes, composta principalmente por água e com grandes concentrações de matéria orgânica e sais inorgânicos, com destaque para o potássio. Devido aos riscos de contaminação que pode afetar o meio ambiente físico e biológico, e a saúde humana, e o comprometimento dos recursos naturais, se faz necessária a sua correta destinação. Ainda, possui um potencial para recuperação destes recursos, contribuindo para o aumento da eficiência do processo industrial, diminuindo a quantidade de resíduo gerado, melhorando o aproveitamento energético, diminuindo a necessidade de adubação mineral e possibilitando até ganhos financeiros consideráveis.

A Tabela 22 apresenta um resumo das principais características quali quantitativas da vinhaça, obtidas junto a representantes da indústria, objeto do estudo. Os itens assinalados com um asterisco (*) foram retirados da bibliografia (CTC, 2009), por se apresentarem adequados ao caso estudado. Os dados serão utilizados no dimensionamento da solução apresentada mais adiante.

Tabela 22. Características Quali Quantitativas da Produção de Vinhaça do Objeto de Estudo

Dados Gerais de Produção	
Total de cana processada	6 000 000 ton/ano
Produção de etanol	180 000 m³/ano
Produção de açúcar	10 500 000 sacas/ano
Geração de energia elétrica	144 200 MWh/ano
Produção de Etanol	
Produção de Etanol	600 m³/dia
	25 m³/h
Dados de Vinhaça	
Geração de Vinhaça	11 m³/m³ Etanol
	275 m³/h
Brix da Vinhaça	4,0 %
Densidade relativa	1,02
Vazão mássica	281,22 ton/h
Teor de Água	269,97 ton/h
Teor de Sólidos	11,25 ton/h
Potássio (mg/L) K ₂ O	18639 mg/L
Nitrogênio Orgânico (mg/L)	2,24 mg/L
Ph*	4,3
Temperatura*	90° C
DBO ₅ *	14.833 mg/L
DQO*	23.801 mg/L
Relação DQO/DBO ₅ *	1,6
Sólidos Totais*	32.778 mg/L
N:P:K*	433:34:2,206 mg/L
Carga Orgânica*	274 g DQO/L etanol
Produtividade Média	75 t/ha
Área Cultivada	80 000 ha

O tratamento da vinhaça depende do uso ao qual ela se destina. A solução ideal ainda não foi encontrada, embora tenha havido, sem dúvidas, grandes avanços com o uso da vinhaça na lavoura, propiciando seu aproveitamento econômico com redução do risco de poluição. Será feita a seguir uma breve descrição das propostas de opções de tratamento da vinhaça.

5. OPÇÕES PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA

Uma vez já definido o problema que se pretende atacar, faz-se aqui uma relação de alternativas para solução do mesmo. Separou-se então, em três grandes grupos, ou agrupamentos de alternativas, sendo eles:

- 5.1. Tratamento Físico-Químico e Concentração
- 5.2. Tratamento Biológico: Fermentação e Digestão
- 5.3. Aplicação de Vinhaça Bruta na Lavoura

Essa relação preliminar de alternativas objetiva, principalmente, a comparação entre as mesmas, de acordo com critérios que serão definidos mais adiante, e portanto, a princípio, não serão descritas em detalhe.

É importante lembrar que essas medidas visam o aproveitamento efetivo e rentável da vinhaça, seja com o objetivo de utilizá-la como fertilizante agrícola, insumo para a produção de energia ou ração animal. Dessa forma, considera-se a premissa de que o resíduo já foi produzido e necessita de algum destino e, portanto, não serão tratadas opções de minimização prévia a sua geração.

5.1. Tratamento Físico-Químico e Concentração

Após o processo de concentração, a vinhaça pode ser reaproveitada como fertilizante, complemento para ração animal e, também, ser incinerada objetivando geração de energia e obtenção de cinzas potássicas. A utilização de vinhaça concentrada na fertilização do solo preserva a maioria das características organominerais da vinhaça bruta, mas apresenta um volume menor a ser transportado para a lavoura e maior estabilidade. No entanto, podem surgir problemas de bombeamento e de incorporação ao solo (PINTO, 1999).

A concentração da vinhaça objetivando seu uso como ração animal, por possuir grande valor nutritivo, é geralmente realizada por processos de secagem até que esta se torne pó. Já a incineração da vinhaça concentrada apresenta, além da vantagem de gerar calor, a propriedade de remover praticamente toda a DBO do resíduo, com as cinzas ainda servindo de fertilizante (PINTO, 1999).

5.1.1. Evaporadores de Múltiplo Efeito

O tratamento da vinhaça por concentração objetiva, essencialmente, o aumento da viabilidade econômica e exequibilidade técnica da sua utilização na fertirrigação. Como já demonstrado anteriormente, essa prática se torna inviável em áreas mais afastadas ou áreas não contínuas, cujo projeto de fertirrigação rodoviário e dutoviário, respectivamente, tornam-se impraticáveis (ANA, 2009).

Para tanto, existe uma tecnologia de evaporação, com evaporadores de múltiplo efeito “falling film” (tecnologia DEDINI-VOGELBUSCH). Essa tecnologia requer equipamentos em aço inox e quantidade bastante significativa de energia em forma de vapor. Dessa forma, para concentrar a vinhaça em 10 vezes, a tecnologia requer cerca de 0,2 kg de vapor/L de vinhaça, ou 2 kg de vapor/L de etanol. Isso corresponderia a quase 60% do que é gasto de vapor na produção de álcool hidratado (ANA, 2009).

A opção pela implementação dessa tecnologia deverá considerar a comparação entre o custo de produção da vinhaça concentrada e o custo de transporte rodoviário ou dutoviário para ser utilizada no campo. Assim, dependendo do grau de concentração desejado, dimensiona-se o tamanho do equipamento e o gasto com energia necessária (ANA, 2009).

Um fator que deve ser considerado nessa alternativa consiste na quantidade e qualidade de condensado produzido, que apesar de límpido é caracterizado por ser ácido e possuir carga orgânica similar à da flegmaça, de forma que possa ser necessário outro sistema de tratamento para sua reutilização ou considerar a produção de mais um efluente. Além disso, com essa prática, não se altera em nada os problemas relacionados à alta carga orgânica, e à salinização do solo causadas pelo uso da vinhaça na fertirrigação (CARVALHO; SILVA, 2010).

A Figura 39 apresenta um esquema de um evaporador químico de múltiplo efeito com quatro estágios de operação dispostos para alimentação frontal e realimentação (SILVA, 2013).

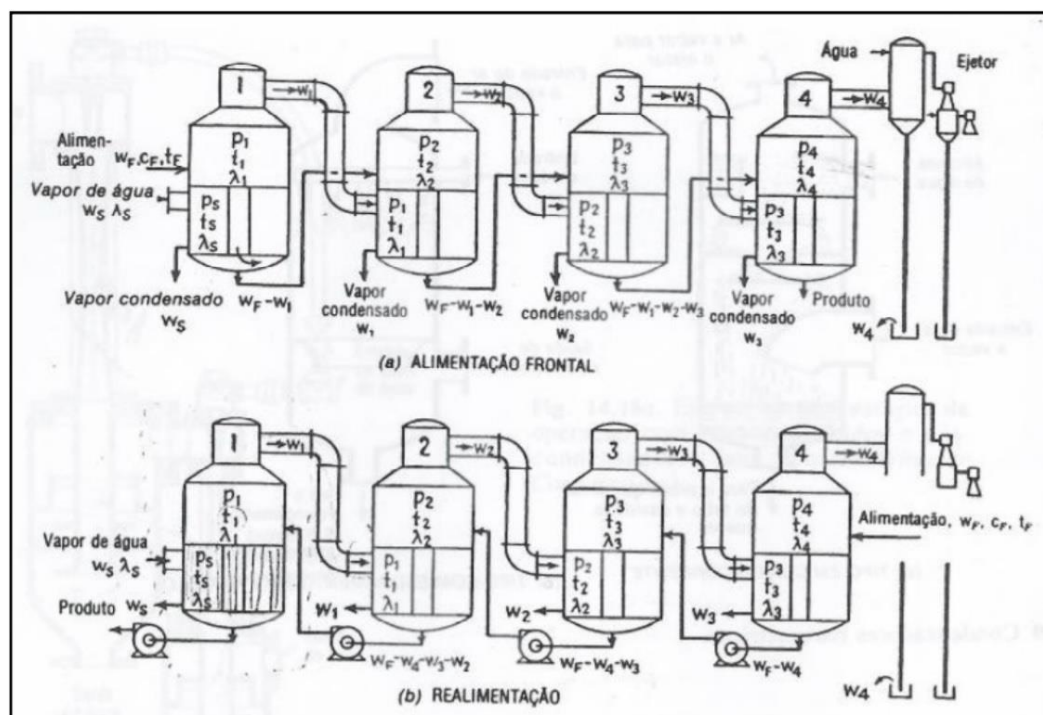


Figura 39. Diagrama Evaporadores de Múltiplo Efeito. Fonte: Silva, 2013

Nessa modalidade, considera-se dois tipos de evaporador: O evaporador tipo “falling film”, ou película fina, citado anteriormente, nele, o líquido a ser evaporado (no caso a vinhaça) escorre com alta velocidade pelas paredes internas dos tubos do trocador, o que reduz o seu tempo de permanência em contato com o vapor de aquecimento e diminui a resistência a incrustações. Outro tipo de evaporador é o evaporador a vácuo em múltiplo efeito com fluxo descendente tipo “névoa turbulenta”, de tecnologia T.A.S.T.E. (thermally accelerated short time evaporator). A empresa Codistil/Dedini é possuidora da licença, ou patente, da Vogelbusch para a fabricação desses equipamentos de concentração (GOMES, 2011).

Outra desvantagem relevante, associada a essa alternativa, é o seu alto consumo de combustível, por conta da alta necessidade de energia térmica empregada no processo (SILVA, 2011).

5.1.2. Processos de Separação por Membranas

A utilização da tecnologia de membranas pode ser entendida como um processo que emprega uma barreira seletiva que separa duas fases, permeado e concentrado, restringindo o transporte de uma ou mais espécies ou substâncias químicas de maneira seletiva e específica (GOMES, 2011).

Os processos mais comuns de separação por membranas são microfiltração, ultra filtração, nano filtração e osmose reversa e são caracterizados pela aplicação

de diferentes pressões hidráulicas, ou gradientes de pressão, como força motriz. Além disso, o tipo da membrana controla quais componentes irão permeá-la e quais ficarão retidos, já que os mesmos serão precisamente separados de acordo com suas massas molares ou tamanho de partícula, como ilustra a Figura 40. Portanto, a seletividade de uma determinada membrana está relacionada a distribuição de poros em sua estrutura, os quais geralmente não possuem diâmetro único mas um diâmetro médio (TREVISOLI, 2010).

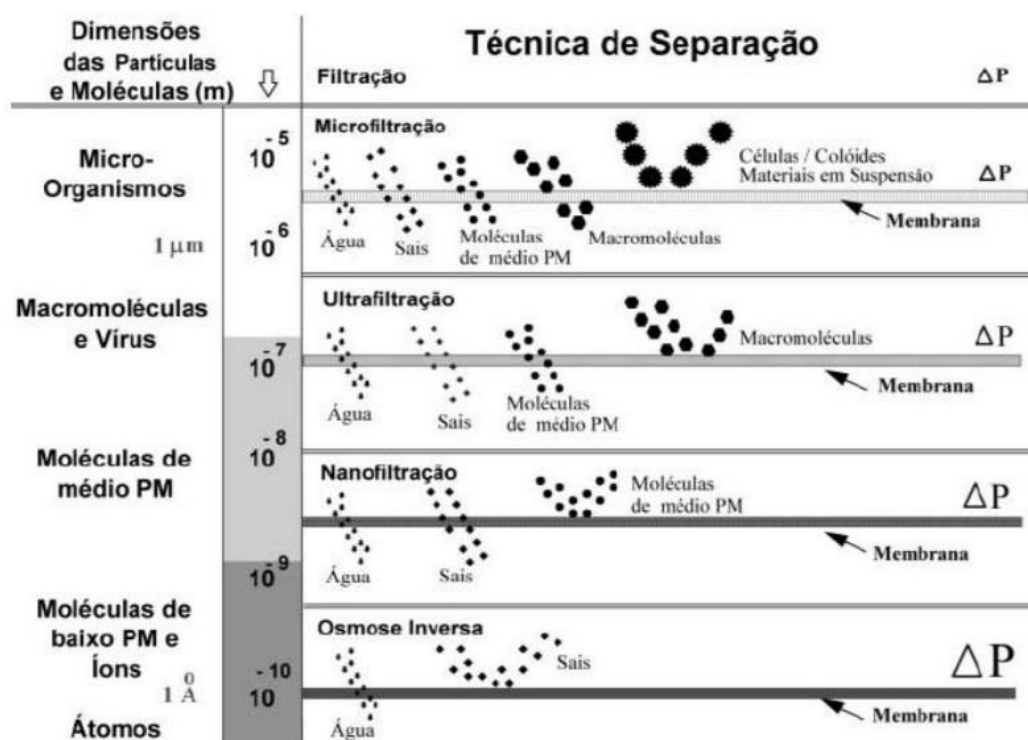


Figura 40. Técnicas de Separação por Membranas. Fonte: Trevisoli, 2010.

Uma unidade de separação por membranas típica é, geralmente, constituída por um cartucho de membrana, uma bomba de alimentação e sistemas de tubulação independentes para o concentrado e o permeado, além de instrumentos como manômetros e termômetros. A recirculação do produto concentrado pode ser necessária, objetivando o aumento da eficiência do processo. Na Figura 41 encontra-se um esquema básico do processo de separação com membranas (GOMES, 2011).

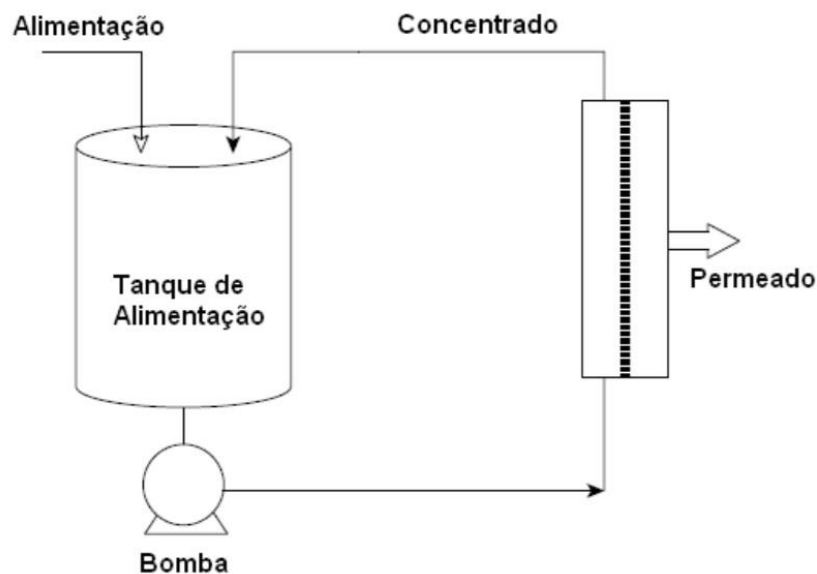


Figura 41. Esquema Básico do Processo de Separação por Membranas. Fonte: Gomes, 2011

Como vantagens da utilização de membranas em processos industriais pode-se citar a isenção da utilização de produtos químicos, a baixa (ou nula) demanda por energia térmica, vida útil relativamente grande, rapidez no processo em comparação com outros métodos como decantação, por exemplo. Além disso, possibilita boa redução de indicadores de qualidade como DQO, Sólidos Totais, Sólidos em Suspensão, Sólidos Dissolvidos, Turbidez, Cor e até mesmo sais inorgânicos, dependendo da aplicabilidade e das técnicas adotadas (TREVISOLI, 2010).

Por outro lado, essa opção poderá acarretar desvantagens por conta de seu alto custo, problemas operacionais relacionados à baixa vazão de permeado (causada pelo processo de *fouling*) e a complexidade do sistema, que irá requerer controle das características físico-químicas da fonte de alimentação e do fluxo do produto. Além de outros custos associados à instalação, operação e manutenção do sistema. Vale lembrar que existe grande flexibilidade desses fatores entre os vários tipos de membranas e sistemas a serem adotados (TREVISOLI, 2010).

Nessa alternativa, pretende-se optar pela utilização de membranas anisotrópicas, que apresentam boas propriedades mecânicas e um melhor fluxo de permeado para o caso da vinhaça e outras aplicações industriais. Além disso, vale lembrar de diferenças e especificações, como entre os processos operados no modo convencional (fluxo perpendicular) e do modo tangencial, como ilustra a Figura 42. Outro fator a ser destacado é o material do qual a membrana é composta, que pode ser inorgânica de material cerâmico, metálico e outros; ou polimérica de poliamida, nylon, polipropileno, celulose regenerada, entre outros. Cada qual apresentando vantagens e desvantagens, as quais não serão tratadas em detalhe nesta seção (TREVISOLI, 2010).

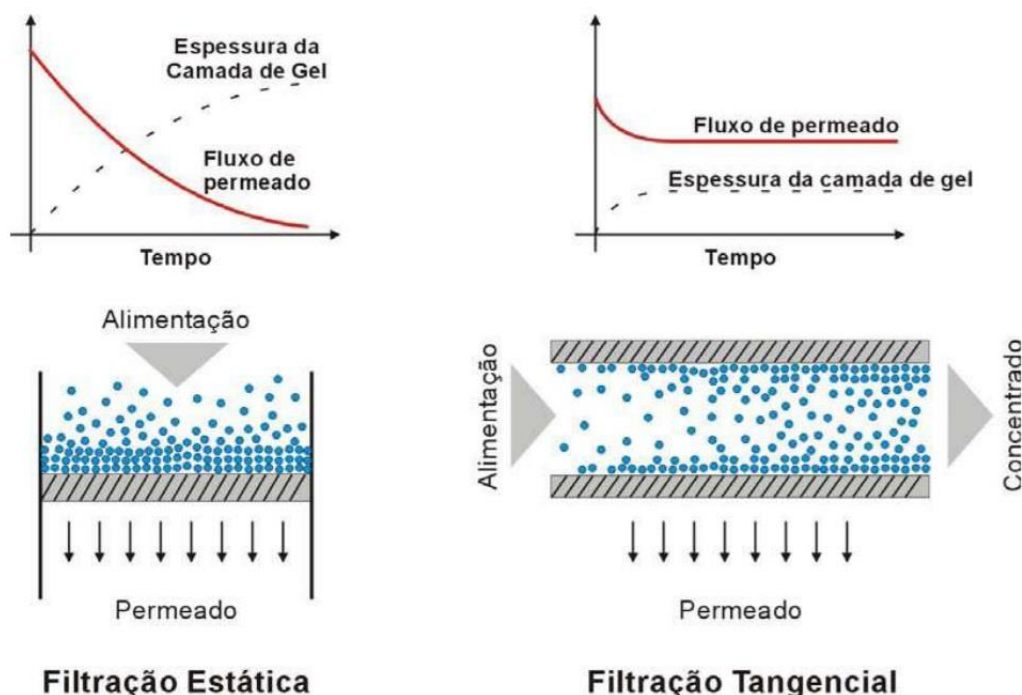


Figura 42. Comparação entre Processos Convencional e Modo Tangencial. Fonte: Trevisoli, 2010.

5.1.3. Tratamento Físico-Químico

A aplicação do tratamento físico-químico apresenta potencialidade considerável no que diz respeito ao tratamento da vinhaça. Ao adotar-se processos de coagulação, floculação e sedimentação, procura-se reduzir a DQO deste efluente, arrastando para o lodo as partículas coloidais presentes, nas quais concentra-se grande parte da matéria orgânica deste meio, permitindo-se então o seu aproveitamento nas diversas finalidades já apresentadas (GONÇALVES, SILVA, 2000).

Faz-se aqui, então, uma descrição, sucinta e pouco aprofundada, desses processos. A coagulação pode ser definida como um processo químico de desestabilização das partículas em suspensão, através da redução das forças de repulsão, permitindo a colisão entre as partículas para viabilizar o processo de floculação, no qual formam-se partículas com maiores dimensões, flocos, visando maior eficiência em sua remoção, subsequente, em processos como o de sedimentação (LÓIO, 2013).

Para tanto, faz-se necessário a utilização de produtos químicos, coagulante e floculante, que são adicionados aos processos de mistura rápida e lenta, respectivamente. O primeiro é utilizado para desestabilizar inicialmente a suspensão, enquanto que o segundo, adicionado posteriormente, tem como principal

finalidade a formação e aumento da resistência dos flocos, permitindo a aglutinação de material de difícil remoção. Esses produtos podem ser desde sais de ferro e alumínio até polieletrólitos, polímeros, e a escolha dos compostos mais adequados ou combinação dos mesmos dependerá dos poluentes que se deseja remover, do custo dos mesmos e da sua eficiência na agregação e sedimentabilidade dos flocos (LÓIO, 2013).

Já o processo de sedimentação, operação unitária amplamente utilizada no tratamento de águas residuárias, consiste na segregação, por gravidade, de partículas mais densas do que a água, ou do meio na qual estão contidas. Permite a clarificação do efluente e gera um lodo concentrado, que pode, assim ser manipulado, tratado ou destinado com maior facilidade (LÓIO, 2013).

Como tratamento complementar, pode-se aplicar o processo de adsorção em carvão ativado, o qual pode ser produzido a partir do próprio bagaço da cana de açúcar. Com esse processo, pode-se remover substâncias causadoras de cor, odor, teor de agrotóxicos e outras substâncias (LIMA, 2013).

Algumas das vantagens apresentadas por essa alternativa são: eficiência satisfatória na remoção de matéria orgânica e clarificação da vinhaça, custos de manutenção não muito elevados e redução de turbidez, cor e outros indicadores. Como contrapartida, pode-se citar a necessidade constante de utilização de insumos, produtos químicos, e o aporte inicial relativamente elevado para implantação do sistema, além de gerar um volume considerável de lodo (PINTO, 1999).

5.2. Tratamento Biológico: Fermentação e Digestão

Neste agrupamento de alternativas pretende-se avaliar, mediante estudo bibliográfico, diferentes maneiras de tratamento biológico da vinhaça, sendo elas a biodigestão anaeróbia, visando a produção de biogás, e a fermentação aeróbia, objetivando a produção de proteínas unicelulares que podem ser utilizadas como complemento nutritivo na agroindústria pecuarista. Além de, é claro, reduzir a alta carga orgânica e outros indicadores como turbidez e sólidos suspensos, por exemplo.

5.2.1. Biodigestão Anaeróbia: Produção de Biogás

A digestão anaeróbia pode ser caracterizada como um processo microbiológico controlado e que ocorre na ausência de oxigênio livre. Nele, populações de bactérias e arqueas transformam matéria orgânica em outras substâncias, tendo como produto principal uma mistura de gás metano e dióxido de carbono, além de pequenas quantidades de hidrogênio, nitrogênio e sulfeto de hidrogênio. Esta mistura, chamada de biogás, tem bom valor comercial por ser utilizada como combustível, uma vez que possui elevadas concentrações de metano, aproximadamente na faixa de 55% a 70%. Já o efluente líquido ao final do processo apresenta a parcela de matéria orgânica, que não foi convertida, em forma solúvel e estável. O processo de biodigestão pode se dar em reatores, também chamados de biodigestores, de tipos diferentes, como se apresenta na Tabela 23 (PINTO,2009).

Tabela 23.Classificação dos Biodigestores.

Tipo de operação	Forma de construção	Armazenamento de biogás	Faixa de temperatura	Fluxo do material
batelada (fixa)	enterrada	gasômetro	criofílico	vertical
semi-contínua	semi-enterrada	gasômetro externo	mesofílico	horizontal
contínua	externa		termofílico	ascendente

Fonte: PINTO, 2009

Os digestores, por sua vez, consistem basicamente em uma câmara de fermentação, na qual ocorre o processo de biodigestão de matéria orgânica, em uma campânula que tem como finalidade armazenar o gás produzido ou, em alguns casos simplesmente, numa saída para este gás. Além disso, constituem também um biodigestor uma entrada para o substrato, no caso a vinhaça, a ser fermentado e uma saída para o efluente produzido pelo processo. De maneira geral, pode-se afirmar que trata-se de uma tecnologia relativamente simples, na qual a principal preocupação é a manutenção das propriedades fermentativas da biomassa bacteriana. Aproximadamente 90% da DQO é removida, e o pH é aumentado nesse efluente em comparação ao substrato.

Apesar da alta taxa de remoção de DQO e DBO5, o efluente biodigerido ainda apresentará carga orgânica poluidora relativamente alta para lançamento em corpos d'água. Além disso, esta técnica remove apenas a carga orgânica e portanto seu efluente possui características muito parecidas com aquelas observadas antes dos processos de tratamento, por exemplo a carga de sais como o potássio. No entanto, a geração de biogás para fins de produção e comercialização de energia

elétrica ainda se mostra mais cara, entre aproximadamente R\$205/MWh e R\$255/MWh, do que o valor de mercado para contratos de médio e longo prazo com as concessionárias, da ordem de R\$ 150/MWh (ANA, FIESP, UNICA e CTC, 2009).

De acordo com (PINTO, 2009), o processo anaeróbio apresenta algumas vantagens, em comparação com o tratamento aeróbio, por resolver o problema do rejeito de forma mais abrangente, já que, segundo o autor:

- a) ao invés de consumir, produz energia útil na forma de biogás;
- b) apenas uma pequena parte da DQO é convertida em nova biomassa, ou seja, o volume do excesso de lodo é significativamente menor;
- c) pode ser aplicado em praticamente qualquer lugar e em qualquer escala, pois altas taxas de conversão podem ser obtidas com os modernos sistemas de tratamento, requerendo relativamente pouco espaço;
- d) pode ser operado com baixo custo, pois os reatores são relativamente simples e utiliza pouco ou nenhum aditivo de alto conteúdo energético;
- e) pode ser combinado com métodos de pós-tratamento do efluente para a recuperação de produtos úteis, como amônia, enxofre, ou algum outro, dependendo da natureza do rejeito tratado.”

5.2.2. Fermentação Aeróbia: Produção de Concentrado com Alto Teor Proteico

A opção da utilização do processo de fermentação aeróbia leva em consideração utilizar a vinhaça como substrato microbiológico para a produção de proteína unicelular (puc), a qual possui valor comercial quando empregada como complemento na formulação de rações animais.

A principal vantagem do processo de fermentação na produção de proteína é a velocidade de desenvolvimento da biomassa, que é bastante superior à velocidade de obtenção protéica obtida através de fontes convencionais, considerando a limitação dos ciclos agrícolas. Dessa forma, essa modalidade de produção não depende de condições ligadas ao clima e não está sujeita à sazonalidade (PINTO, 1999).

Por outro lado, apresenta como principal desvantagem a necessidade de investimentos e custos operacionais elevados, por implicar na instalação e operação de um sistema complexo de controle de processo, além da necessidade em se manter as condições assépticas (PINTO, 1999).

Essa alternativa poderá propiciar aumentos consideráveis nos teores de proteína bruta do substrato, sem a necessidade de adição de uma fonte de

nitrogênio, uma vez que a atividade microbiológica envolvida no processo encontra nutrientes adequados, presentes na vinhaça, apresentando resultados satisfatórios. Assim, o processo de enriquecimento protéico, utilizando-se a vinhaça como substrato, produz suplementos energéticos, protéicos e podem ser utilizados como aditivos vivos, que quando aplicados na dieta dos animais poderão substituir em parte os concentrados convencionais, dentre eles os aditivos que promovem o crescimento de aves como os antibióticos, por exemplo (ARAÚJO, BRITO, DIAS e JÚNIOR, 2009).

5.3. Aplicação da Vinhaça Bruta na Lavoura

Considera-se essa alternativa, a título de comparação e análise crítica em relação às outras alternativas, por ser a mais utilizada pelo setor em geral, e, inclusive pela indústria estudada. Dessa maneira, por todas as considerações acerca da mesma que já foram feitas anteriormente, não se faz necessário descrevê-la novamente nesta seção do estudo.

5.4. Considerações Finais

Assim, apresenta-se, na Tabela 24, um quadro síntese das principais vantagens e desvantagens comparáveis entre as diferentes opções consideradas neste estudo. Procurou-se analisar de forma que seja possível avaliá-las segundo os critérios que serão apresentados no próximo capítulo. Vale lembrar que foram avaliadas formas de tratamento e destinação bastante diversas e dos mais diferentes grupos, encontrados até em outros setores industriais, e que portanto, a maioria delas não está estabelecida ou consolidada, nem existe consenso acerca da utilização mesmas. Como já foi apresentado anteriormente, a aplicação de vinhaça bruta na lavoura predomina atualmente como destinação para a vinhaça, e também será considerada nesta avaliação.

Tabela 24. Vantagens e Desvantagens das Opções de Destinação da Vinhaça.

Quadro Síntese: Vantagens e Desvantagens		
Opção	Vantagens	Desvantagens
Evaporadores de Múltiplo Efeito	<ul style="list-style-type: none"> Grande redução de volume, e portanto, redução de custos com transporte ou posterior tratamento; Permite reúso, manipulação ou destinação do condensado com razoável facilidade; Isenção de utilização de insumos 	<ul style="list-style-type: none"> Não apresenta melhora em termos de redução da carga orgânica Não apresenta melhora em termos de redução da carga de sais inorgânicos (potássio e outros) Alto consumo de energia térmica (60% do que é gasto de vapor na produção de etanol hidratado)
Processos de Separação por Membranas	<ul style="list-style-type: none"> Isenção de utilização de insumos (produtos químicos por exemplo) Baixa (ou nula) demanda por energia térmica Grande rapidez no processo Boa redução de indicadores como DQO, Sólidos (Suspensos, Dissolvidos e Totais), Turbidez, Cor e Sais Inorgânicos Médio consumo de energia elétrica; Ampla flexibilidade na recuperação de diversos recursos (desde sais inorgânicos à água potável) 	<ul style="list-style-type: none"> Problemas operacionais relacionados à baixa vazão de permeado Altos custos de instalação operação e manutenção do sistema Alta complexidade do sistema (requer diversos tipos de controle operacionais)
Tratamento Físico-Químico	<ul style="list-style-type: none"> Eficiência satisfatória na remoção de matéria orgânica e clarificação Permite recuperação, manipulação e destinação do lodo e do efluente produzido com grande facilidade Baixos custos de manutenção Boa redução de indicadores como DQO, Sólidos Suspensos, Turbidez e Cor 	<ul style="list-style-type: none"> Constante necessidade de utilização de insumos (produtos químicos) Aporte inicial elevado para implantação do sistema Geração de grandes volumes de lodo
Biodigestão Anaeróbia	<ul style="list-style-type: none"> Remoção de aproximadamente 90% da DQO Tecnologia relativamente simples Ao invés de consumir, produz energia útil na forma de biogás, que possui bom valor comercial Produz efluentes estáveis, que ainda podem passar por tratamento ou recuperação Volume de lodo baixo, o qual ainda pode ser reutilizado Área ocupada pelo sistema relativamente baixa Baixo custo operacional 	<ul style="list-style-type: none"> Não apresenta redução de indicadores de concentração de sais inorgânicos (potássio) e outros O custo de geração de energia elétrica a partir do biogás é mais elevado do que comprá-la de uma concessionária (valores médios)

<p>Fermentação Aeróbia</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Apresenta subproduto com valor comercial razoável: produção de proteína unicelular (puc). Esse produto se apresenta altamente competitivo, quando produzido por essa técnica, por apresentar alta velocidade de desenvolvimento da biomassa e não depender de condições ligadas ao clima 	<ul style="list-style-type: none"> • Aporte inicial elevado, altos custos de instalação • Custos operacionais elevados • Complexidade técnica de controle do sistema • Necessidade em se manter condições assépticas
<p>Aplicação da Vinhaça Bruta na Lavoura</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Evita o despejo em corpos d'água, que é proibido por lei, e a disposição em áreas de sacrifício. • Diminui a necessidade de adubos minerais; 	<ul style="list-style-type: none"> • Implica em problemas de salinização do solo e portanto piora na qualidade da matéria-prima produzida no mesmo • Alto potencial poluidor de lençóis freáticos e águas subterrâneas • Alto custo de transporte, por conta do grande volume de geração

6. DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

6.1. Introdução

Uma vez já caracterizado e definido o problema que se pretende estudar, e apresentadas as principais opções encontradas para a solução do mesmo, faz-se aqui uma breve descrição dos critérios utilizados para a escolha da alternativa a ser elaborada e especificada e posteriormente avaliada através deste estudo.

6.2. Critérios Econômicos

- **Aporte Financeiro Inicial:** Custo de implantação;
- **Potencial de Melhora na Rentabilidade:** Avalia o quanto que a opção pode trazer retorno financeiro para a indústria;
- **Consumo/Geração de Energia:** Avalia o quanto que, pelo balanço energético, a alternativa irá consumir ou gerar energia;
- **Possibilidade de Recuperação de Recursos:** Avalia o quanto que a opção irá proporcionar um recurso aproveitável oriundo do resíduo (vinhaça);
- **Custos Operacionais:** Avalia o quanto que a opção custará em operação e manutenção;

6.3. Critérios Técnicos

- **Complexidade Operacional e Manutenção:** Avalia se a opção tem, na sua operação, variáveis mais ou menos complexas e se exige mais ou menos manutenção e utilização de insumos;
- **Dificuldades na Implantação:** Avalia se a opção requer poucos ou muitos esforços e estudos na sua implantação.
- **Relevância da Melhora de Desempenho Ambiental:** Refere-se ao grau de melhoria e adequação dos aspectos ambientais.
- **Aproveitamento de Infraestrutura Já Existente:** Avalia se, com a adoção da opção, é possível utilizar a estrutura industrial no tratamento proposto.
- **Área Ocupada:** Quantidade de área necessária para implantação e operação.

7. ESCOLHA DA SOLUÇÃO

Neste item será apresentada a escolha de uma opção dentre aquelas elencadas e descritas brevemente no Capítulo 5. A seleção será feita seguindo a metodologia de matriz de decisão, atribuindo Pontuação para cada alternativa, segundo os critérios estabelecidos no Capítulo 6. A Tabela 25 mostra as respectivas pontuações:

Tabela 25. Pontuações Relativas aos Critérios de Avaliação Para Escolha da Solução.

Notas	Critérios Econômicos				Critérios Técnicos				
	Aporte financeiro inicial	Potencial de melhoria na rentabilidade	Possibilidade de recuperação de recursos	Custos operacionais	Consumo/Geração de energia	Complexidade operacional e manutenção	Dificuldades na implantação	Relevância da melhoria de desempenho ambiental	Área Ocupada
1	Muito Alto	Muito Ruim	Muito Baixa	Muito Alto	Muito Alto	Muito Alto	Muito Alto	Muito Baixa	Muito Grande
2	Alto	Ruim	Baixa	Alto	Alto	Alto	Alto	Baixa	Grande
3	Médio	Regular	Média	Médio	Médio	Médio	Médio	Média	Média
4	Baixo	Bom	Alta	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Alta	Pequena
5	Muito Baixo	Excelente	Muito Alta	Muito Baixo	Nulo ou Geração	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Alta	Muito Pequena

Na Tabela 26 a seguir, é apresentada a pontuação das opções para cada critério e também a pontuação final. As notas finais podem variar no intervalo de 5 a 45 pontos. Para facilitar a comparação, a pontuação é apresentada também em uma escala de 0 a 100.

Tabela 26. Pontuação das Opções de Solução do Problema. Fonte: Autores

Opções	Aporte financeiro inicial	Potencial de melhora na rentabilidade	Consumo/Geração de energia	Possibilidade de recuperação de recursos	Custos operacionais	Complexidade operacional e manutenção	Dificuldades na implantação	Relevância da melhora de desempenho ambiental	Área Ocupada	Pontuação Total	Pontuação (0 a 100)
Evaporadores de Múltiplo Efeito	3	2	1	3	1	3	3	4	3	23	45.0
Processos de Separação por Membranas	2	4	3	5	2	3	3	5	4	31	65.0
Tratamento Físico-Químico	2	3	4	3	3	3	4	2	1	25	50.0
Biodigestão Anaeróbia	3	4	5	4	4	4	4	4	4	36	77.5
Fermentação Aeróbia	2	4	4	4	2	1	2	3	2	24	47.5
Aplicação da Vinhaça Bruta na Lavoura	5	2	3	3	3	4	4	2	2	28	57.5

Seguindo essa metodologia, a alternativa de Biodigestão Anaeróbia obteve a maior pontuação (77.5), sendo esta, portanto, a escolhida. A pontuação obtida foi satisfatória para a alternativa de Processo de Separação por Membranas, mas esta não será abordada detalhadamente neste trabalho.

Assim, propõe-se este tratamento com a principal finalidade de reduzir a alta carga orgânica da vinhaça, cerca de 100 vezes a do esgoto doméstico (ANA, 2009), possibilitando o aproveitamento de recursos, no caso o biogás. Vale lembrar que essa alternativa não objetiva a redução do volume (ou concentração) da vinhaça, nem a remoção de sais inorgânicos, como o potássio. Sendo necessário, e serão mencionados mais adiante, outros tratamentos para tais finalidades. Tratamentos estes que muitas vezes requerem uma redução significativa da carga orgânica do afluente, o que também justifica a opção escolhida.

8. EPECIFICAÇÃO DA SOLUÇÃO

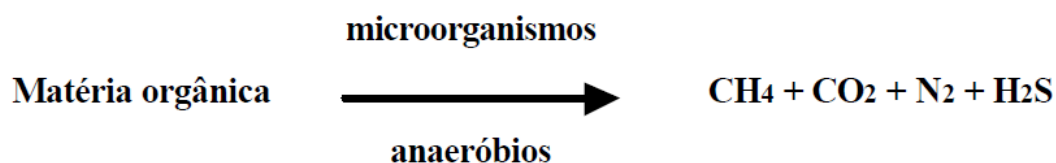
A digestão anaeróbia de resíduos poluentes vem despertando grande interesse e sendo utilizada com sucesso para vários tipos de efluentes, tanto industriais como domésticos, em diversas partes do mundo. Segundo (GRANATO, 2003), o processo anaeróbio resolve o problema do rejeito de uma maneira abrangente, já que:

- ao invés de consumir, produz energia útil na forma de biogás;
- apenas uma pequena parte da DQO é convertida em nova biomassa, ou seja, o volume do excesso de lodo é significativamente menor;
- pode ser aplicado praticamente em qualquer lugar e em qualquer escala, pois altas taxas de conversão podem ser obtidas com os modernos sistemas de tratamento, requerendo relativamente pouco espaço;
- pode ser operado com baixo custo, pois os reatores são relativamente simples e utilizam pouco ou nenhum aditivo de alto conteúdo;
- pode ser combinado com métodos de pós tratamento do efluente para a recuperação de produtos úteis, como amônia, enxofre, ou algum outro, dependendo da natureza do rejeito tratado;

Trata-se de um processo biológico que ocorre na ausência de oxigênio livre. Diversas populações de bactérias e arqueas convertem a matéria orgânica em uma mistura de gases como metano, dióxido de carbono e pequenas quantidades de hidrogênio, nitrogênio e

ato de hidrogênio. A mistura é o chamado biogás, que pode ser utilizado como combustível, dado a sua elevada concentração de metano, comumente na faixa de 55% a 70%. O efluente final do processo contém a matéria orgânica não convertida em forma solúvel e estável. A digestão pode ser realizada em diferentes tipos de reatores, também chamados digestores ou biodigestores (GRANATO, 2003).

A degradação microbiológica de matéria em um ambiente anaeróbio só pode ser obtida por microorganismos capazes de utilizar outras moléculas, em vez de oxigênio, como aceptores de hidrogênio. A reação pode ser simplificada, como se apresenta a seguir:



A biodigestão anaeróbia da vinhaça é uma resposta recente às alternativas de aproveitamento da vinhaça, permitindo a estabilização da matéria orgânica e o aproveitamento dos gases. Vários grupos de microorganismos estão presentes

neste processo, que fornecem uns para os outros substratos adequados a um processo contínuo. Na natureza, estão presentes em ambientes anaeróbios como fundo de lagoas, pântanos, rúmen de herbívoros e fezes de animais e humanos (GRANATO, 2003).

8.1. Descrição da Solução

Neste item será apresentado uma descrição mais detalhada das técnicas envolvidas; microbiologia e bioquímica; principais fatores que influenciam o processo de biodigestão; tipos mais usuais de biodigestores; justificativa da escolha e descrição do sistema que pretende-se dimensionar. Vale lembrar que a solução deverá ter grau de detalhamento e especificação compatíveis com os propósitos deste estudo.

8.1.1. Biodigestão Anaeróbia: Microbiologia e Bioquímica

A biodigestão é o processo de decomposição biológica da matéria orgânica presentes nos mais diversos resíduos gerados pela atividade humana ou por fontes naturais. O principal produto é o Biogás, tendo sua geração controlada podendo ser realizada em pequena ou grande escala, servindo não só como fonte de recursos (combustível), mas também como forma de tratamento aos mais diversos resíduos e efluentes com concentrações de carga orgânica adequadas (GEHRING, 2014). A seguir descreve-se a principais características químicas e, em seguida, os processos microbiológicos e bioquímicos da biodigestão.

A Figura 43 ilustra as etapas da fermentação anaeróbia para produção de metano (PINTO, 2009).

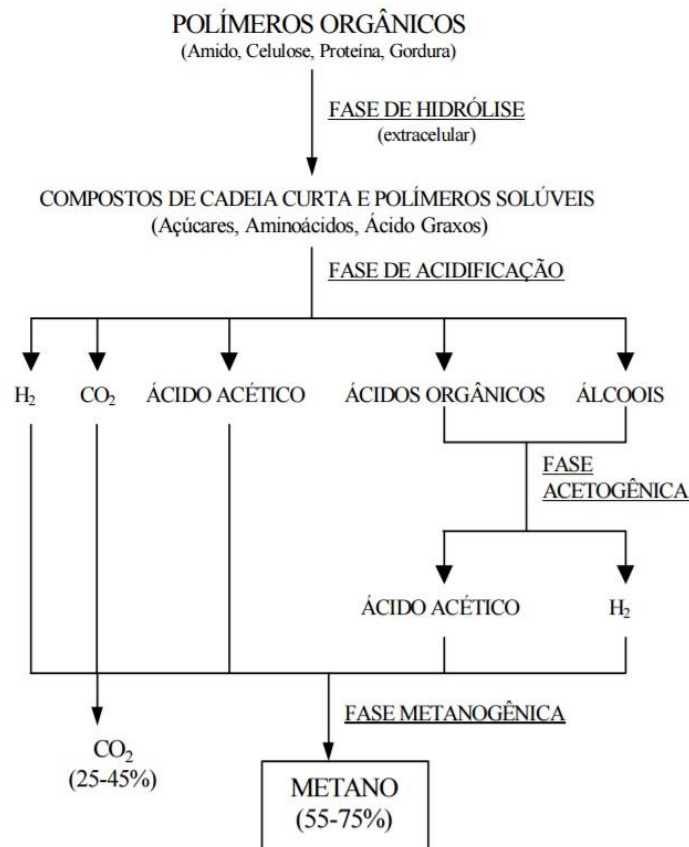


Figura 43. Etapas da Fermentação anaeróbica para produção de metano Fonte: PINTO, 2009.

- **Hidrólise**

A Hidrólise é a primeira etapa na degradação da matéria orgânica até a geração de metano e, resumidamente, é responsável pela quebra de moléculas grandes e complexas, como proteínas, amidos, lipídios e celulosas, em compostos mais simples como açúcares, ácidos orgânicos, aminoácidos entre outros. Esse processo ocorre com a liberação de enzimas extracelulares liberadas pelas bactérias fermentativas hidrofílicas e, conhecida como a etapa lenta, pode ser considerada como limitante ao processo de digestão anaeróbica. Fatores que afetam esse processo são: temperatura, pH, tempo de retenção e superfície de contato das partículas. Condições ótimas: pH levemente ácido, temperatura levemente alta e com partículas finamente divididas (GEHRING, 2014).

- **Acidogênese**

Na etapa de acidogênese, bactérias heterogêneas, e acidogênicas, incorporam os compostos mais simples gerados na hidrólise e os convertem em ácidos graxos (ácido acético, propiônico, butírico), álcoois, hidrogênio e amônia. Essas bactérias apresentam tempo de duplicação de 30 minutos, podendo ser tanto

anaeróbias quanto facultativas sendo que estas últimas consomem o oxigênio dissolvido no substrato, que é fatal às bactérias anaeróbias. A dinâmica do processo, nesta etapa, é rápida (GEHRING, 2014).

- **Acetogênese**

De forma sucinta, a etapa de acetogênese consiste na transformação dos subprodutos da etapa anterior monômeros (ácidos graxos voláteis, álcoois, aminoácidos e carboidratos), em acetatos, H_2 e CO_2 . Dois mecanismos participam desse processo: a acetogênese de hidrogenação, que produz o acetato a partir do dióxido de carbono e do hidrogênio; e a acetogênese de desidrogenação, no qual os monômeros produzidos na etapa anterior são oxidados a acetato, formando também dióxido de carbono e hidrogênio. Os tipos de bactérias responsáveis por esses processos são, respectivamente, bactérias homoacetogênicas e acetogênicas (GEHRING, 2014).

A duplicação destes grupos de bactérias ocorre no intervalo de tempo de 1,4 a 4 dias, o que configura uma situação de baixo crescimento microbiano. Os produtos gerados nesta etapa são assimilados e apropriados pelo processo seguinte, a metanogênese (GEHRING, 2014).

- **Metanogênese**

A metanogênese é a última etapa do processo de degradação anaeróbia de matéria orgânica e apresenta como subproduto, essencialmente, o metano e o dióxido de carbono. As arqueas metanogênicas são responsáveis por esta etapa que ocorre na presença de dois mecanismos, que se caracterizam pelos diferentes insumos que se utilizam para gerar o metano (GEHRING, 2014).

O primeiro se utiliza do dióxido de carbono (CO_2) e do hidrogênio (H_2) para a produção de metano (CH_4) e água (H_2O). Esse processo é realizado por arqueas hidrogenotróficas, que desenvolvem-se em velocidade alta (tempo mínimo de duplicação de 6 horas). Já o segundo mecanismo é realizado por arqueas acetoclásticas que se utilizam do acetato para a geração de metano. Estas arqueas são de lento desenvolvimento, alteram o pH do ambiente e são responsáveis por aproximadamente 70% do metano total produzido (GEHRING, 2014).

Esta é a etapa mais sensível do processo e a sua eficiência depende de condições de pH, temperatura, nutrientes e tempo de retenção nas quais o processo está submetido (GEHRING, 2014).

- **Bactérias Sulfetogênicas**

Compostos com a presença de enxofre podem implicar na redução de sulfato pelas bactérias sulfetogênicas e pode ocorrer como uma segunda etapa da metanogênese. A redução ocorre com o acetato produzido na etapa anterior, a acetogênese é um fator a ser considerado no processo.

Essa ocorrência apresenta vantagens como a possibilidade de redução de formas mais agressivas do sulfeto presentes no afluente, em formas menos agressivas, e a redução do potencial de toxicidade de metais pesados no sistema. Porém esse processo é considerado indesejado devido a problemas causados ao sistema, por ser um componente (sulfeto) inibidor às bactérias anaeróbias, provoca redução da capacidade de geração energética do biogás produzido, além de poder vir a danificar equipamentos do sistema, como tubulações e geradores (GEHRING, 2014).

- **Propriedades Químicas do Biogás**

As principais propriedades químicas do biogás variam de acordo com o tipo de matéria prima e de biodigestor utilizados no processo. Sua composição se dá pela mistura de diversos gases, como descreve-se a seguir, além de seu poder calorífico e massa específica (GEHRING, 2014):

- ☐ Metano (CH₄): de 50 a 90% vol;
- ☐ Gás Carbônico (CO₂): de 10 a 50% vol;
- ☐ Hidrogênio (H₂): de 0 a 1% vol;
- ☐ Gás Sulfídrico (H₂S): de 0 a 3% vol;
- ☐ Oxigênio (O₂) + Nitrogênio (N₂): de 0 a 1% vol;
- ☐ Massa Específica (Biogás 60% CH₄): 1,2143 kg/nm³
- ☐ Poder Calorífico Inferior (Biogás 65% CH₄): 5100 kcal/kg

Vale lembrar de outras características importantes como o fato do biogás ser menos denso que o ar, o que implica em menores riscos relacionados ao seu manuseio e maiores dificuldades ao se comprimir e liquefazer o mesmo, gerando dificuldades de logística e de estocagem. Possui baixa concentração de monóxido de carbono (CO), que é altamente tóxico, e apresenta característica corrosiva devido à presença de H₂S, implicando na necessidade de utilização de materiais apropriados para o seu manuseio (GEHRING, 2014).

8.1.2. Fatores que Influenciam o Processo

Algumas características do ambiente e da matéria prima utilizada no processo são determinantes para a eficiência na produção de biogás e de metano. Sendo parte dessas variáveis controláveis, e parte incontrolláveis, devendo ser consideradas e acompanhadas a fim de manter-se a eficiência do processo. De acordo com PINTO (1999), quatro fatores principais influenciam no processo de biodigestão anaeróbia:

- **Temperatura**

A produtividade do processo de digestão anaeróbia e a faixa de temperatura de operação apresentam forte correlação como mostram as várias experiências já realizadas. A faixa de temperatura de trabalho dos diferentes tipos de microorganismos permite classificá-los, também, com relação a este parâmetro. Bactérias que operam numa faixa inferior a 20°C são chamadas psicofílicas, as que operam entre 20 a 45°C são chamadas mesofílicas, enquanto as que operam acima de 45°C são conhecidas como bactérias termofílicas (GRANATO, 2003).

Foi constatado que certos compostos atingem maiores taxas de hidrólise na faixa de 55 a 70°C e que, portanto, a faixa termofílica apresenta taxas de conversão maiores o que implica em um menor tempo de residência do resíduo no digestor, menores volumes do mesmo e custos iniciais reduzidos. No entanto, digestores que trabalham na faixa mesofílica apresentam maior confiabilidade, não necessitando de controle de temperatura e por isso são mais utilizados (GRANATO, 2003).

- **pH**

Os microrganismos necessitam de um meio propício para seu desenvolvimento, sendo a acidez e a alcalinidade fatores importantes no processo de digestão anaeróbia. O pH deve ser mantido entre 6 e 8, sendo de 7 a 7,2 o intervalo considerado ótimo. O controle é através do acúmulo de bicarbonato, da fração de CO₂ da parte gasosa, concentração de ácidos voláteis ionizados e concentração de nitrogênio amoniacal (GRANATO, 2003).

Durante a digestão, inicialmente ocorre o fracionamento da matéria orgânica pelas bactérias formadoras de ácido, e são produzidos ácidos voláteis. O pH é reduzido nesta etapa, e aumenta a seguir com a ação de bactérias metanogênicas transformando os ácidos em metano, neutralizando o meio. O aumento do teor de amônia também contribui para a elevação do pH, ocorrendo na digestão de proteínas. A concentração de íon bicarbonato é diretamente proporcional ao teor de dióxido de carbono, e ao pH do meio (GRANATO, 2003).

Se o meio do digestor tornar-se muito ácido, é comum restaurar o pH ideal interrompendo a alimentação por alguns dias, dando tempo para as bactérias metanogênicas reduzirem a concentração dos ácidos voláteis. No caso dos biodigestores de grande porte, problemas de estocagem podem inviabilizar a interrupção, e o pH pode ser elevado pela adição de hidróxido de cálcio, altamente alcalino (GRANATO, 2003).

- **Composição e Concentração do Resíduo**

As características do resíduo afetam diretamente a produção de biogás. Quanto maior a concentração de sólidos voláteis (sólidos orgânico) na amostra, e também a disponibilidade de nitratos fosfatos e sulfatos, maior será a geração do

biogás. A presença de nitrogênio protéico é favorável, pois conduz a formação de amônia, que é útil na neutralização do pH.

A demanda química de oxigênio (DQO) é uma unidade que mede, dentre outros fatores, a concentração dos sólidos voláteis responsáveis pela formação de metano, portanto quanto maior for a DQO da matéria prima utilizada, maior será o potencial gerador de produto, no caso o metano (GEHRING, 2014).

Alguns nutrientes são essenciais, como ferro, e micronutrientes como níquel e cobalto. O enxofre aumenta a produção de H₂S. Certos íons orgânicos, como K⁺, Na⁺, Ca⁺⁺, NH₄⁺, Mg⁺⁺ e S⁻, quando em quantidades diminutas, são excitantes do metabolismo celular. Já em maiores concentrações, apresentam propriedades inibidoras do mesmo metabolismo.

Alguns destes dados são raramente conhecidos, e portanto para muitos resíduos não é possível prever alguns dos controles para ajustar o resíduo. Um dado básico que deve ser estudado é a DQO, uma vez que este se relaciona diretamente com a produção de metano, como já foi apontado anteriormente. A relação de indicadores do efluente, usualmente tida como ideal nesse tipo de tratamento é:

$$\text{DQO} : \text{N} : \text{P} \quad - \quad 350:5:1 \text{ (GEHRING, 2014)}$$

Alguns materiais orgânicos são tóxicos para as bactérias, em especial os sintéticos, como detergentes não biodegradáveis e à base de cloro, e antibióticos. Apesar da susceptibilidade das bactérias acidogênicas e metanogênicas a compostos tóxicos na matéria orgânica, elas têm grande potencial para se adaptarem e efetuar a conversão do composto químico. Portanto, uma das vantagens da digestão anaeróbia está justamente na diversidade de substratos passíveis de sofrer fermentação.

- ***Tempo de Retenção***

O tempo de retenção é o fator referente ao tempo de permanência do resíduo no reator, ou digestor. Em outras palavras ele corresponde ao tempo entre a entrada do afluente no reator até a saída do efluente do mesmo. Esse fator apresenta os mesmos parâmetros para os diferentes tipos de reatores e é determinado pela carga aplicada ao digestor, pelo volume e forma do mesmo, pela sua eficiência, pela demanda geral de biogás projetada e pelo tipo de operação utilizada. O tempo de retenção pode variar de longos períodos, chegando a 50 dias em biodigestores rurais, até algumas horas, em reatores industriais (GEHRING, 2014).

8.1.3. Características e Diferenciação de Técnicas

Existe uma diversidade considerável de técnicas de tratamento anaeróbio, visando a produção de biogás, disponíveis no mercado. Faz-se aqui uma breve descrição das principais características e diferenciações técnicas inerentes aos processos. A Tabela 27 apresenta essa classificação conforme critérios.

Tabela 27. Classificação das técnicas conforme critérios

Critério	Tipo
Teor de matéria seca dos substratos	digestão úmida digestão seca
Tipo de alimentação	descontínua semicontínua contínua
Nº de fases do processo	uma fase duas fases
Temperatura do processo	psicrofílico mesofílico termofílico

Fonte: GEHRING, 2014

- **Teor de Matéria Seca dos Substratos**

Trata-se, essencialmente, da consistência do substrato a ser digerido, que varia de acordo com o teor de matéria seca nele contido. Os limites dos teores de matéria seca que determinam as técnicas são de difícil compreensão e estabelecem-se faixas nas quais classificam-se os substratos como aqueles em que ocorre fermentação seca e úmida. Substratos com baixos teores de matéria seca são considerados substratos úmidos e podem ser bombeados para os biodigestores, já a fermentação a seco faz uso de substratos empilháveis (GEHRING, 2014).

- **Tipo de Alimentação**

Refere-se à forma de alimentação do biodigestor, podendo ser basicamente os seguintes tipos: contínua, semicontínua e descontínua, ou por bateladas. A alimentação contínua é a forma mais comum de alimentação praticada e, nela, o resíduo é introduzido continuamente, ou várias vezes ao dia de trabalho, ao biodigestor, de forma que o tanque do biodigestor deve ficar sempre cheio e a produção de biogás e efluentes é uniforme. A semicontínua é pouco usual e nesta técnica as cargas de matéria são introduzidas com baixa frequência no biodigestor e

não de forma contínua. Por fim, na alimentação descontínua ou por batelada, uma carga de resíduo é introduzida no biodigestor e permanece confinada até que o tempo de retenção termine, sendo assim, retirada praticamente toda a carga orgânica do biodigestor (GEHRING, 2014).

- **Número de Fases do Processo**

A fermentação de matéria orgânica em biodigestores pode ocorrer em uma ou duas fases. Nos sistemas com uma fase, todas as etapas de fermentação ocorrem em um único tanque, enquanto que quando as etapas de hidrólise e metanogênese são realizadas em diferentes tanques, o processo é de duas fases (GEHRING, 2014).

8.1.4. Tipos de Biodigestores

Os reatores e biodigestores anaeróbicos são basicamente recipientes, tanques, destinados à digestão. São câmaras que proporcionam ao resíduo orgânico as condições desejáveis para uma digestão rápida e controlada. A seguir serão apresentados os mais utilizados para a função de produção de biogás e tratamento de resíduos industriais.

a) Reator Anaeróbio de Manta de Lodo e Fluxo Ascendente.

Também conhecido como RALF, e com nomenclatura em inglês UASB (upflow anaerobic sludge blanket). Operam com fermentação úmida, alimentação contínua e são monofásicos. Representam um avanço na tecnologia de biodigestores anaeróbios, e são amplamente utilizados no tratamento de efluentes urbanos e industriais, e, esgotos sanitários.

Segundo (CHERNICHARO, 1997), as vantagens deste modelo são:

- Sistema compacto, baixa necessidade de área disponível;
- Baixo custo de implementação e operação;
- Baixa produção de lodo;
- Baixo consumo de energia;
- Satisfatória eficiência na remoção de DQO e de DQO, entre 65% e 75%;
- Capacidade de rápido reinício, mesmo após longas interrupções;
- Elevada concentração de lodo excedente;
- Boa desidratabilidade do lodo;

E desvantagens:

- Emissão de odores desagradáveis;
- Baixa capacidade de tolerância às cargas tóxicas;
- Grande intervalo de tempo necessário para a partida do sistema;
- Necessidade de uma etapa de pós tratamento;

A partida do sistema sem utilização de inóculos pode chegar a 4 ou 6 meses. No entanto, com uma carga de inóculo inferior a 4% do volume do reator, o tempo de partida pode ser reduzido para 3 semanas.

Há necessidade de pós tratamento quando a qualidade do efluente produzido pelo reator não se enquadra nos padrões exigidos pela legislação ambiental. No caso de seu reúso como biofertilizante sabe-se que, desde que estando livre de componentes tóxicos e atendendo às normas vigentes, a etapa de licenciamento ambiental é dispensada.

O projeto e a montagem destes reatores, são simples, não requerem nenhum equipamento sofisticado. Porém, os parâmetros de construção devem ser bem claros. Os reatores industriais são em geral alimentados por distribuidores localizados nas bases dos reatores. A camada dessa região do reator é chamada leito do lodo, onde se encontra a maior concentração de carga orgânica no reator. Acima desta camada, fica a manta de lodo, com concentrações orgânicas mais baixas. A mistura é feita pelo próprio sistema, devido ao fluxo ascendente do substrato e da ascensão das bolhas de biogás. Portanto, não necessita de um misturador, implicando em custos menores de investimento e manutenção.

O fluxo ascendente e as bolhas de biogás carregam sedimentos do lodo ao topo do reator, onde é instalado um separador trifásico. Este, garante que o lodo carregado para a camada superior retorne ao manto de leito do lodo. Acima do separador trifásico ficam a câmara de captura do biogás e o canal de saída do efluente.

O separador trifásico proporciona um tempo de retenção de lodo elevado, superior ao tempo de retenção hidráulico, podendo chegar a 30 dias. Por isso tem uma alta capacidade de produção de biogás, e produz um lodo excedente a ser descartado com alto grau de estabilização.

A Figura 44 mostra o esquema de um Biodigestor UASB, com as estruturas, camadas e fluxos do processo:

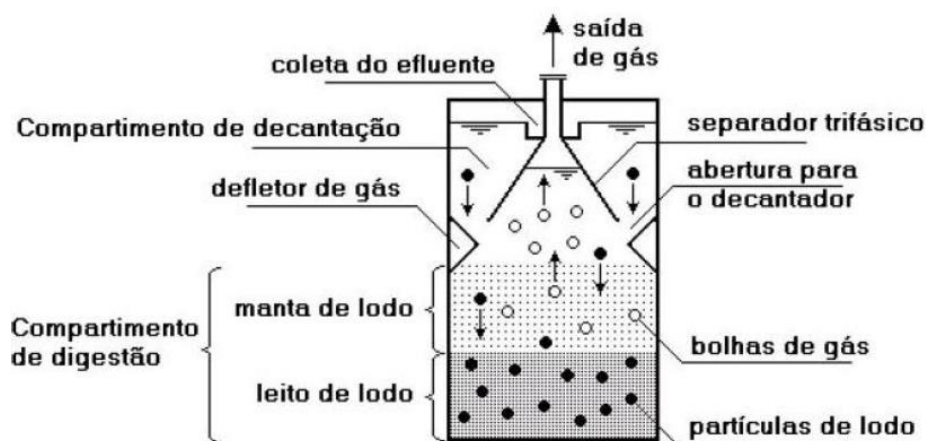


Figura 44: Representação de Biorreator de Fluxo Ascendente de Manta de Lodo (UASB). Fonte GEHRING, 2014.

b) Biodigestor de Mistura Completa

Esta é a forma convencional de reatores anaeróbios, e a técnica consiste em um tanque vertical com fundo de concreto e paredes de aço ou concreto armado. O reservatório pode ser total, parcial ou não enterrado.

Os fluxos de entrada e saída são constantes, e a reação ocorre totalmente dentro do biodigestor monofásico, utilizado para fermentações úmidas. Demanda fonte de agitação continua, sendo intermitente em alguns casos. A agitação pode ser mecânica ou pneumática. O objetivo é a mistura completa do substrato e dos microrganismos internos, proporcionando uma concentração equilibrada em todo o volume. As características dos sistemas de misturas variam conforme demanda do projeto.

O tempo de detenção hidráulica é igual ao tempo de retenção celular ou o tempo de retenção da carga orgânica. Esta característica do equipamento torna o processo lento, com tempo de retenção hidráulica de 20 a 30 dias. A eficiência de remoção da DQO é alta, alcançando níveis de 80% a 95%.

A técnica é empregada na digestão de resíduos com alta carga orgânica, e normalmente apresenta grande volume para poder reter o substrato por longos períodos. No caso de processamento de grandes volumes de resíduos, este biodigestor pode ser inviável devido ao tamanho que ele deverá possuir.

A figura 45 mostra um esquema de um reator convencional de mistura completa com agitação mecânica.

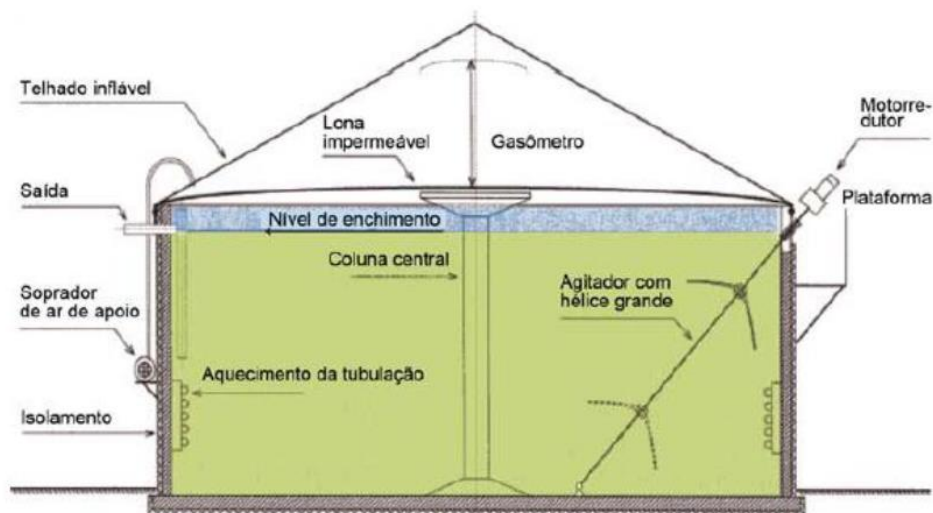


Figura 45. Corte Lateral de Reator Convencional de Mistura Complea. Fonte: GEHRING, 2014.

c) Biodigestor de Fluxo Pistonado

Nesta categoria, os reatores são normalmente horizontais, podendo ser utilizados tanto para fermentações úmidas quanto secas. São operados de maneira contínua e são monofásicos. O resíduo é introduzido em uma das extremidades do reator, funcionando como pistão que empurra o restante do substrato ao lado oposto no sentido de saída. A agitação é feita por palhetas dispostas ao longo do compartimento.

Nos sistemas de fluxo pistonado, a taxa de remoção do substrato é constante, mas a concentração do material biodegradável diminui conforme o fluxo percorre o reator. Ainda, produzem um biogás de qualidade, porém não são aplicados para grandes volumes de resíduo.

d) Biodigestor Modelo Indiano

Este modelo é um dos mais utilizados mundialmente para receber resíduos rurais. É aplicado para sistemas contínuos, monofásicos e de fermentação úmida. Requer concentração de sólidos voláteis menores que 8%, o que limita a utilização no tratamento de resíduos industriais.

Trata-se de um equipamento simples de construir e operar, com baixo consumo de energia e necessidade de mão de obra, sendo ideal para ambientes rurais. É posicionado abaixo do nível do solo, praticamente todo enterrado. Possui duas câmaras, promovendo a circulação do substrato no interior do biodigestor, diminuindo efeitos de curto circuito, e melhorando a agitação. Acima da câmara existe uma campânula que atua como gasômetro.

O processo de fermentação acontece relativamente rápido, dado que por estar enterrado, e a temperatura do solo ser pouco variável, a ação das bactérias é

favorecida. Ainda, ocupa pouco espaço e dispensa o uso de reforços, como cintas de concreto. A produção de biogás é contínua e a pressão constante, garantida pela campânula móvel, que pode expandir seu volume.

A Figura 46 mostra um esquema de biodigestor modelo Indiano:

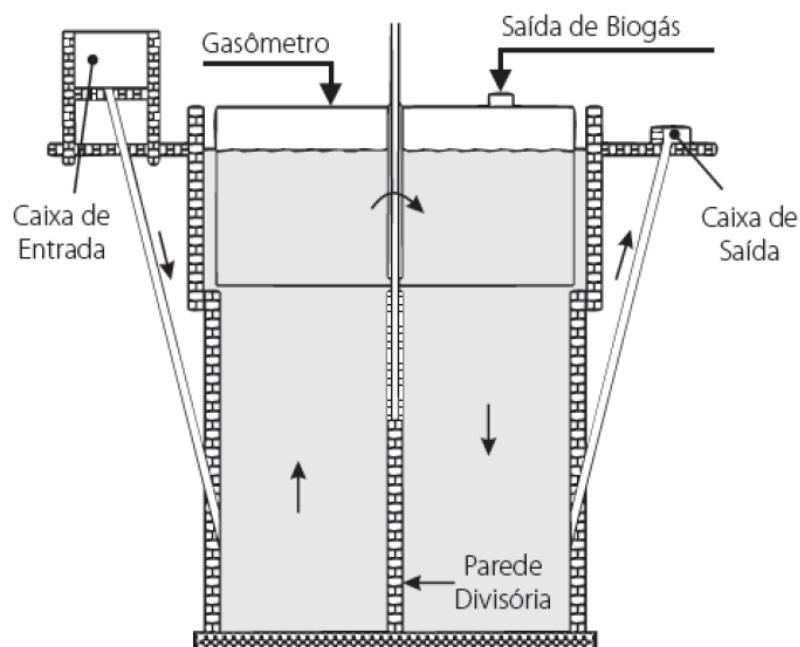


Figura 46. Esquema de Biodigestor Modelo Indiano. Fonte: GEHRING, 2014

e) Biodigestor Modelo Chinês

O modelo chinês opera com alimentação e produção de biogás contínuas. Assim como o modelo indiano, apresenta uma limitação de sólidos, sendo recomendado para resíduos com limite de 8% de sólidos totais, e para pequenos volumes.

Diferentemente do modelo indiano, a câmara não apresenta divisões, sendo única e cilíndrica, onde o substrato é acumulado e fermentado. Possui teto fixo e sem variação de volume, em forma de abóbada responsável por acumular o biogás. Funciona através de uma prensa hidráulica, onde a movimentação do substrato dentro da câmara é consequência do aumento da pressão interna devido a produção do biogás.

Pode ser construído em alvenaria ou concreto armado, de forma totalmente enterrada. A vedação das paredes e do teto é muito importante, a fim de evitar o escape do biogás. Por contar com uma caixa de saída, parte do biogás gerado é lançado na atmosfera sem tratamento ou reaproveitamento, reduzindo o potencial de utilização do mesmo. Por fim, é um modelo de operação simples, com baixo custo de operação e manutenção, sendo limitado a pequenos volumes. A Figura 47 mostra o esquema do corte lateral do biodigestor modelo Chinês.

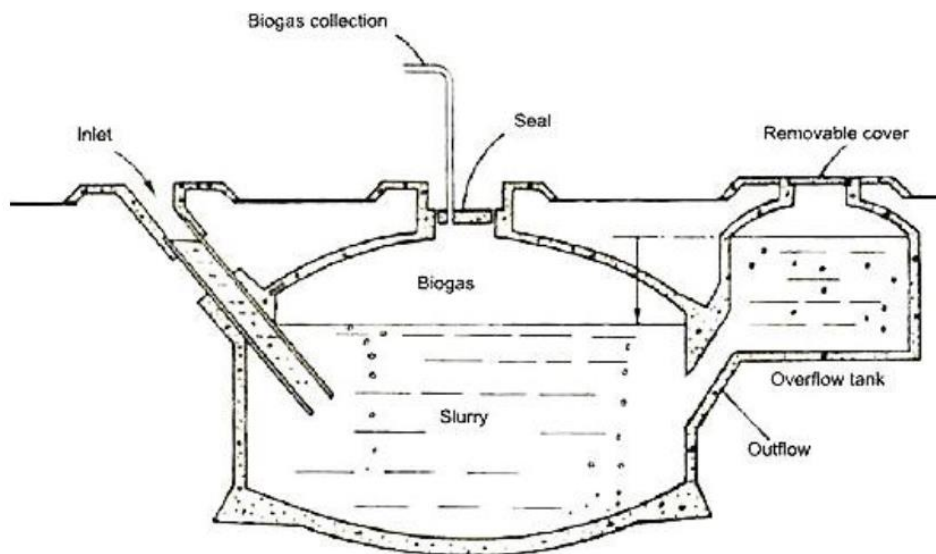


Figura 47. Esquema do corte lateral do biodigestor modelo Chinês. GHERING, 2014.

f) Biodigestor à Batelada

Dos modelos aqui apresentados, este é o único com operação descontínua. A operação em batelada é alimentada uma única vez até que o resíduo atinja o tempo de retenção hidráulica planejado. No término deste, o substrato é removido para que se possa introduzir a próxima carga. É comum deixar uma pequena quantidade ainda no biodigestor, para inoculação da próxima carga.

Podem assumir diversas formas de construção, podendo atuar de maneira individual ou associada a outros biodigestores à batelada. A câmara de gás também pode variar, podendo ser de lona com volume variável, ou peça móvel superior formando o gasômetro. As estruturas devem ser herméticas e impermeáveis.

São geralmente aplicados em casos onde não há uma geração constante de resíduos, e para volumes não muito grandes. O tempo de retenção hidráulica é elevadíssimo, e a produção do biogás varia conforme a idade de retenção hidráulica.

8.1.5. Biodigestão da Vinhaça

Faz-se então considerações sobre os processos de tratamento por biodigestão anaeróbia, levando-se em conta propriedades e características específicas da vinhaça. O processo de biodigestão da vinhaça acontece em duas etapas que serão descritas a seguir.

Na primeira etapa do processo atuam as bactérias fermentativas, não produtoras de metano, que através da hidrólise quebram os polímeros orgânicos, e

incorporam e fermentam os produtos de hidrólise em ácidos orgânicos, álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono.

A segunda etapa é onde os produtos citados acima são transformados em metano e dióxido de carbono pela ação das bactérias acetogênicas e metanogênicas. Estas se reproduzem mais lentamente e são mais sensíveis às alterações de condições ambientais e condições adversas em relação às bactérias produtoras de ácidos. As condições ótimas para esse processo são pH próximo de 7, e temperatura entre 35 e 37°C, e evitando concentrações inibidoras de compostos químicos no meio de fermentação (GRANATO, 2003). Apesar do caráter ácido da vinhaça, quando introduzida no reator ocorre rápida elevação do pH do meio reacional, devido ao consumo dos ácidos orgânicos e formação de compostos como amônia, dispensando a adição de compostos alcalinos.

Na vinhaça, os principais inibidores são os íons dos compostos de enxofre na forma de sulfeto e o potássio solúvel, e apresentam concentrações, apresentando concentrações mais críticas na vinhaça oriunda de mosto de melaço e misto de caldo e melaço.

Com relação aos nutrientes básicos, o conteúdo de nitrogênio e fósforo e micronutrientes presentes na vinhaça são adequados para o bom desenvolvimento do processo. No caso do procedimento de partida de novos reatores, é recomendada a complementação de nutrientes, a fim de favorecer o desenvolvimento inicial das bactérias. Podem ser usados compostos de nitrogênio e fósforo na forma de fertilizantes minerais, sendo a quantidade função da composição da vinhaça. As quantidades excedentes de nutrientes não consumidos no crescimento microbiano, estarão disponíveis no efluente do processo, podendo ser atrativo para a fertirrigação (GRANATO, 2003)

Observa-se que o lodo do reator anaeróbio possui baixa taxa de autoconsumo, sendo capaz de conservar a sua atividade específica com a mesma intensidade anterior, mesmo após longo períodos de inatividade. Consequentemente, a volta do funcionamento do reator após períodos de entressafra é facilitada e portanto não há a necessidade de substituir ou readaptar o lodo biológico (GRANATO, 2003).

No processo convencional, onde o tempo de retenção celular é igual ao tempo de detenção hidráulica, o mínimo tempo de retenção hidráulica permitido é limitado pelo tempo e duplicação das bactérias metanogênicas, equivalente a um tempo de retenção de dez dias, o que inviabiliza a aplicação para despejos industriais. O reator de fluxo ascendente (UASB), com leito de lodo, se configura uma evolução tecnológica que permite, através da retenção dos microrganismos em suspensão, ser possível sua operação com tempo de retenção hidráulica de poucas horas, incorrendo em menores volumes e custos envolvidos.

Na implantação de unidades industriais, a rápida partida do sistema ("start up") depende fundamentalmente da disponibilidade de lodo bacteriano já adaptado à vinhaça, com características adequadas de atividade e decantabilidade. Grandes

A Figura 48 mostra o esquema básico da biodigestão anaeróbica da vinhaça, com as principais etapas pelas quais o efluente deve passar, para se obter um biogás de qualidade aceitável, que não contenha contaminantes como normalmente ocorre em outros processos de biodigestão.



8.1.6. Tecnologias de Destinação e Aproveitamento do Biogás, Lodo e Efluente Gerados

113

desse efluente, quanto a purificação do biogás e outras técnicas não estão no escopo deste estudo, mas serão considerados nas análises, estimativas e avaliações. Assim, descreve-se brevemente algumas dessas técnicas.

8.1.6.1. Tecnologias de Aproveitamento do Biogás

O aproveitamento do biogás está diretamente relacionado à sua conversão energética, que envolve algumas tecnologias disponíveis para esse processo em diversos níveis. Primeiro, pode-se converter a energia química do biogás em energia térmica (através da queima do metano) e essa, por sua vez, pode ser utilizada diretamente, com a cogeração, ou convertida em energia cinética e elétrica. De maneira geral, o biogás pode ser utilizado para cogeração, geração de energia elétrica ou como combustível para motores a combustão de máquinas, veículos e outros equipamentos (GEHRING, 2014).

Vale ressaltar que esta fonte energética não é, ainda, muito praticada, por diversos fatores, como por exemplo a falta de interesse de concessionárias, governo e outros *stakeholders* em reduzir o número de barreiras econômicas, permitindo a sua alavancagem (GEHRING, 2014).

Dessa forma, descreve-se primeiramente o processo de purificação do biogás, uma vez que esse pode estar condicionado ao atendimento de padrões e normas técnicas. Em seguida faz-se considerações acerca de algumas das principais tecnologias de aproveitamento do produto em questão. A Figura 40 ilustra resumidamente as etapas de produção e utilização do Biogás.

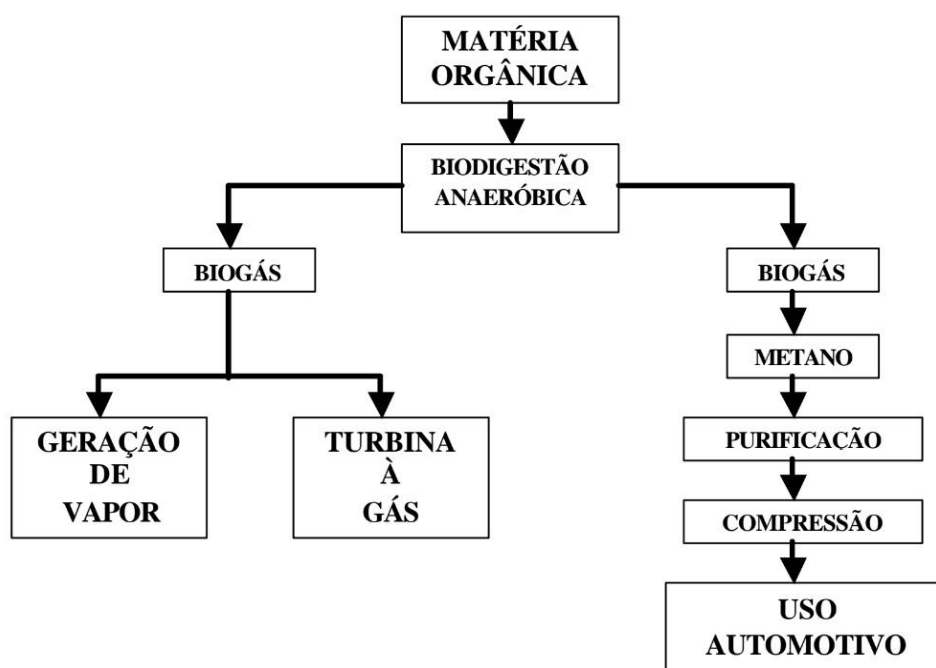


Figura 49. Etapas de Produção e Utilização do Biogás. Fonte: GEHRING, 2014.

- **Purificação do Biogás**

O biogás é composto por uma mistura de diferentes gases, como visto anteriormente, entre eles o metano. Alguns desses gases são indesejáveis dependendo da aplicação ou uso deste produto, sendo necessária a limpeza do mesmo através de sistemas purificadores. Esses sistemas são projetados de acordo com a necessidade e especificação técnica demandadas pela operação do biogás tratado ou purificado.

Esse processo é indicado principalmente para o uso do gás como combustível, de veículos, máquinas ou até mesmo para geração de energia, e deve atender a padrões mínimos, de suas propriedades, estabelecidos por fabricantes desses equipamentos. A presença de dióxido de carbono e água, na combustão, reduz o poder calorífico pois há absorção de parte da energia no processo. O ácido sulfídrico (H₂S), por sua vez, é outra substância que deve-se eliminar do biogás, uma vez que ele o torna um gás corrosivo, o que implica em maiores investimentos em equipamentos e manutenção (GEHRING, 2014).

Existem diversas técnicas empregadas para essa finalidade. Para a remoção da umidade pode-se utilizar, por exemplo, o tratamento com sílica gel, refrigeração do gás entre outros. Já para a remoção do dióxido de carbono pode-se citar, dentre as inúmeras técnicas, a absorção, a adsorção e a separação por membranas. Já para tratamentos que envolvam processos de dessulfurização, pode-se destacar a biossulfurização externa ou interna ao digestor, o lavador biológico de gás, precipitação de sulfeto, dessulfurização química e remoção por carvão ativado (GEHRING, 2014).

Por fim, destaca-se o método de lavagem com Genosorb, que é capaz de remover o dióxido de carbono, o sulfeto de hidrogênio e a água, sendo o único método capaz de remover os três componentes de uma só vez (GEHRING, 2014).

- **Motores a Combustão**

O biogás pode servir de combustível tanto para motores Ciclo Otto, quanto para motores Ciclo Diesel. Ambos são de combustão interna, não necessitam de óleo de ignição e divergem apenas no funcionamento dos ciclos de compressões. O motor ciclo Otto, por exemplo, pode trabalhar com combustíveis líquidos (gasolina, etanol e outros), mas também com combustíveis gasosos (gás natural, propano e biogás), possuindo modelos fabricados para aplicações com gases, entre eles o biogás. Além disso, esse tipo de motor é bastante utilizado para a geração de energia elétrica. Os motores Ciclo Diesel, por sua vez, apresentam maior potência e menores custos de operação, do que os motores Ciclo Otto, mas não há versões específicas para o biogás, o que implica em utilização de motores Diesel adaptados à essa utilização (GEHRING, 2014).

- **Turbinas**

Visando a geração de energia elétrica, o biogás pode ser utilizado em diferentes tipos de turbina: turbinas a gás, turbinas a vapor, ciclo combinado e até microturbinas. As turbinas a gás podem operar com a utilização de gás natural, propano, querosene e biogás como combustível e apresentam tamanho relativamente pequeno por não necessitar o uso de nenhum fluido adicional intermediário como o vapor. As turbinas a vapor são amplamente utilizadas em usinas de cogeração, possuindo grande flexibilidade técnica e podendo adaptar-se de acordo com a aplicação e complexidade desejadas. As microturbinas possuem modelos, de menor escala, similares às turbinas a gás e se baseiam no Ciclo de Brayton. Já o ciclo combinado utiliza turbinas a gás e a vapor, de forma que os gases da turbina a gás podem ser reaproveitados (GEHRING, 2014).

- **Cogeração**

A cogeração, como já citado anteriormente, permite a geração simultânea de calor e potência elétrica e/ou mecânica, ou a recuperação de calor de processo rejeitado a temperaturas altas para a produção de potência. Essa tecnologia é amplamente utilizada, pela indústria de açúcar e álcool no Brasil, através da queima do bagaço de cana de açúcar, e vem mostrando ser uma fonte importante por apresentar altos índices de eficiência.

8.1.6.2. Destinação do Lodo

Na maioria das técnicas e processos de tratamento por digestão anaeróbia, o lodo residual costuma ser de baixo volume e de caráter estável. Esse lodo poderá passar por tratamentos em processos como adensamento, estabilização (se necessário), condicionamento, desidratação, higienização e outros. Para que então possa ocorrer a sua destinação final (GOMES, 2013).

Para o caso específico de tratamento com reatores de digestão anaeróbia de vinhaça, o lodo gerado poderia passar por diversos tipos de tratamento, mas o tratamento por desidratação se apresenta bastante adequado aos propósitos deste estudo. A desidratação é uma operação unitária que reduz o volume do lodo em excesso por meio da redução de seu teor de umidade (GOMES, 2013).

De acordo com GOMES (2013) as vantagens da desidratação do lodo são a melhoria nas condições de manejo e manuseio do lodo, sendo este mais facilmente transportado (redução de custo) até o local de disposição final, redução do volume para reuso como biofertilizante na agricultura e aumento do poder calorífico do lodo por meio da redução da umidade com vistas à sua preparação para a incineração. Assim, as principais destinações do lodo gerado são o uso como fertilizante nas lavouras, a incineração do mesmo ou a disposição em aterros sanitários.

8.1.6.3. Pós-tratamento do Efluente Gerado

As principais características e volume da vinhaça bruta serão bastante semelhantes e da mesma ordem de grandeza das propriedades apresentadas pelo efluente gerado após o processo de tratamento por digestão anaeróbia, exceto pela carga orgânica, que será reduzida de forma significativa a taxas que variam de acordo com o tipo de reator e técnicas empregadas. Além disso o efluente gerado possui caráter estável.

Assim, o efluente gerado poderá ainda ser usado na fertirrigação passando ou não por outros tratamentos já citados anteriormente, como por exemplo a separação por membranas, que permite o reaproveitamento controlado de nutrientes e até da água presente no efluente. Além disso, essa técnica possibilita uma redução expressiva do volume do efluente gerado, sem que este perca a estabilidade e propriedades nutritivas, podendo assim ser utilizado na lavoura ou até ser destinado a outros usos.

8.1.7. Justificativa

Nos reatores convencionais (como o de mistura completa, por exemplo), o processo é relativamente lento, com tempos de retenção hidráulica do resíduo dentro do reator de vários dias, ou até semanas. Este é sem dúvida o principal obstáculo técnico para a aplicação do processo de digestão anaeróbia da vinhaça, uma vez que pela alta vazão afluente no sistema, os volumes, do reator e demais conectados, seriam muito grandes. Esta dificuldade pode ser contornada mantendo uma elevada concentração de microrganismos no interior do reator, através de recirculação externa ou retenção interna destes. Os biodigestores de alta eficiência, com fluxo ascendente podem alcançar esse objetivo. O biorreator de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) é o biodigestor de elevada eficiência mais estudado e aplicado em todo o mundo (GRANATO, 2003).

Trata-se, então, de um processo de digestão úmida, que possui alimentação contínua, uma fase no processo e faixa de temperatura termofílica. O sistema de tratamento consiste basicamente em componentes, citados na Figura 48, como tanque de equalização, reator anaeróbio, gasômetro, tanque de nutrientes e trocador de calor. Sendo que destes o principal é o biorreator, que será dimensionado obedecendo os critérios técnicos necessários.

Como todo sistema de tratamento, possui vantagens e desvantagens, no entanto a prática mostra que os resultados obtidos com o UASB são consideravelmente superiores em relação aos demais reatores. O fato deste reator poder reter grandes cargas orgânicas volumétricas com tempo de retenção curto, de algumas horas, o torna superior aos demais, quando se compara tamanho e eficiência de remoção da DQO (GEHRING, 2014).

Para o caso da biodigestão da vinhaça, os biodigestores UASB tem sucesso comprovado, sendo que o dimensionamento deste equipamento é feito levando-se em conta:

- Produção máxima diária de etanol da destilaria em estudo;
- Volume de vinhaça a ser gerado em consequência dessa produção;
- DQO do efluente, dado devido a sua origem no processo de fabricação;
- Carga Orgânica a ser removida por dia;

A partir desses dados, é possível determinar o volume do reator (diâmetro e altura) e, posteriormente, o fornecimento da produção de biogás para o sistema (GRANATO, 2003).

8.2. Dimensionamento e Avaliação Técnica

Faz-se então o dimensionamento do reator e número de distribuidores, não abarcando o dimensionamento de outros componentes como tanques de nutrientes e de equalização, gasômetro, trocador de calor, gradeamento entre outros. Expõe-se primeiramente os dados utilizados e critérios adotados. Em seguida apresenta-se os cálculos de dimensionamento. Além disso, faz-se também cálculos de estimativas de indicadores esperados com relação ao tratamento em si, mas também ao aproveitamento e destinação do biogás gerado, que será dividido em duas opções, já descritas anteriormente, mas que serão explicitadas mais adiante.

Utilizou-se como metodologia diversos autores, presentes na bibliografia e citados ao longo deste item, mas destacam-se as seguintes referências: (GRANATO, 2003), (CHERNICHARO, 1997) e (GEHRING, 2014).

8.2.1. Dados Utilizados

Para os cálculos de dimensionamento e estimativas acerca dos sistemas e soluções estipuladas, foram utilizados diversos dados obtidos de diferentes fontes. Esses dados estão dispostos da Tabela 28, juntamente com a fonte dos mesmos. Aqueles que não possuírem fonte foram obtidos junto ao objeto de estudo, como citado anteriormente.

Tabela 28. Dados Utilizados Para Dimensionamento e Estimativas

Dados Utilizados para Dimensionamento e Estimativas	
Operação	
Média de Dias por Ano de Operação	228 dias/ano
Produção de Etanol	
Produção de Etanol	180 000 m ³ /ano
	600 m ³ /dia
	25 m ³ /h
Vinhaça Bruta Afluente	
Geração de Vinhaça - Vazão Média	11 m ³ /m ³ Etanol
	275 m ³ /h
	6600 m ³ /dia
Geração de Vinhaça - Vazão Máxima (GEHRING, 2014)	7.920 m ³ /dia
DQO (ANA, 2009)	23.801 mg/L
Concentração de Substrato (ANA, 2009)	23,8 kgDQO/m ³
Ph (ANA, 2009)	4,3
Temperatura (ANA, 2009)	90° C
Sólidos Totais (ANA, 2009)	32.778 mg/L
Vazão mássica	281,22 ton/h
Teor de Água	269,97 ton/h
Teor de Sólidos	11,25 ton/h
	4%
Reator UASB	
Carga Orgânica Volumétrica (JORDÃO, PESSOA, 1995)	25 - 35 kg DQO/m ³ .dia
Velocidade de Escoamento (CHERNICHARO, 1997)	0,5 - 0,7 m/h
Área de Influência dos Distribuidores (CHERNICHARO, 2007)	2 - 3 m ²
Custos - Implantação dos Reatores (GEHRING, 2014)	755 R\$/m ³
Custos - Implantação do Sistema de Tubulações (GEHRING, 2014)	115 R\$/m ³
Custos - Produtos Químicos Reatores UASB (SPERLING, 2013)	0,05 R\$/m ³ de produto tratado
Custos - Operação e Manutenção Reatores UASB (SPERLING, 2013)	0,55 R\$/m ³ de produto tratado
Custos - Manutenção Sistemas de Tubulações (GEHRING, 2014)	4000 R\$/ano

Lodo	
Teor de Sólidos Secos (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001)	3,0 - 6,0 %
Coeficiente de Produção de Sólidos (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001)	0,12 - 0,18 (kgSS/kgDQO)
Densidade (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001)	1020 kg/m ³
Coeficiente de Segurança da Centrífuga (JORDÃO e PESSÔA, 1995)	1,15
Uso de Polieletrólitos (JORDÃO e PESSÔA, 1995)	6 kg polímero/tonSS
Densidade da Mistura do Lodo com Polieletrólitos (JORDÃO e PESSÔA, 1995)	1060 kg/m ³
Biogás	
Fator de Conversão de Biogás (GEHRING, 2014)	0,45 Nm ³ /kg DQO removida
Poder Calorífico Inferior do Biogás (GRANATO, 2003)	5100 kcal/Nm ³
Fração Volumétrica de Metano (GEHRING, 2014)	50 - 90 % vol
Grau de Pureza do Sistema de Limpeza do Biogás (GEHRING, 2014)	> 96 %
Custos - Implantação do Sistema de Lavagem de Gases (GEHRING, 2014)	2,15 R\$/dia/m ³
Custos - Operação e Manutenção do Sistema de Lavagem de Gases (GEHRING, 2014)	8000 R\$/ano
Opção 1 - Geração de Energia Elétrica Moto Geradores Ciclo Otto	
Eficiência Elétrica (GEHRING, 2014)	35 - 45 %
Faixa de Potência Recomendada (GEHRING, 2014)	30kW - 20 MW
Receita com a Venda da Energia Gerada (CCEE, 2016)	218,98 R\$/MWh
Fator de Relação entre Potência Real e Potência Instalada (GEHRING, 2014)	0,75
Custos - Implantação (GEHRING, 2014)	1146 R\$/kW
Custos - Operação (GEHRING, 2014)	0,025 R\$/kWh
Opção 2 - Utilização de Gás Natural como Combustível na Cadeia Produtiva	
Redução dos Custos com Combustível (COMPAGAS, 2016)	50%
Preço do Óleo Diesel (ANP, 2016)	2,803 R\$/l
Consumo Médio de Combustível para Veículos Pesados (MMA, 2011)	3,17 km/l

8.2.2. Critérios Técnicos de Dimensionamento

- **Carga Orgânica Volumétrica (COV)**

COV Adotado: 35 kg DQO/m³.dia (JORDÃO, PESSOA, 1995).

- **Velocidade de Escoamento**

Segundo (CHERNICHARO, 1997), as velocidades de escoamento podem variar de 0,5 a 0,7 m/h. Adota-se 0,6 m/h.

- **Volume Unitário dos Reatores**

Encontram-se em operação em diversos países reatores de diversos volumes unitários, mas não ultrapassando cerca de 2500 m³.

- **Tempo de Retenção Hidráulico**

São observados em sistemas semelhantes já implantados ou estudados tempos de retenção hidráulicos de algumas horas até poucos dias e o mesmo está diretamente relacionado à eficiência do processo. Além disso, este pode ser usado como critério de dimensionamento desde que implique no atendimento dos outros critérios.

8.2.3. Dimensionamento

- **Volume do Reator**

Existem dois métodos para o cálculo do volume do reator, através da fixação do tempo de retenção hidráulico, ou fixando a COV, através das seguintes equações:

$$CHV = \frac{Q}{V}$$
$$\theta_h = \frac{V}{Q}$$
$$COV = \frac{Q \cdot S}{V}$$

Onde:

CHV: Carga Orgânica Volumétrica (m³/m³.dia)

Q: Vazão (m³/dia)

V: Volume (m³)

θh: Tempo de Retenção Hidráulico (dia)

S: Concentração de Substrato (kgDQO/m³)

COV: Carga Orgânica Volumétrica (kg DQO/m³.dia).

Para efluentes industriais, a COV pode variar entre 25 a 35 kg DQO/m³.dia (JORDÃO, PESSOA, 1995). Para a estimativa do volume a COV será fixada em 35kg DQO/m³.dia. A concentração de substrato do objeto de estudo fornecida é de 23,8kg DQO/m³. A seguir a demonstração do cálculo estimando a vazão máxima diária.

Considerando a vazão máxima como 20% maior que a vazão média (GEHRING, 2014), temos uma vazão máxima de 7.920 m³/dia.

Assim, o volume pode ser calculado:

$$V = \frac{Q \cdot S}{COV} = \frac{7920 \left(\frac{m^3}{dia} \right) \cdot 23,8 \left(\frac{kgDQO}{m^3} \right)}{35 \left(\frac{kgDQO}{m^3 \cdot dia} \right)} = 5385,6 m^3$$

Serão adotados quatro reatores de 1500 m³ cada, totalizando 6000 m³, e uma COV de 31,4 kg DQO/m³.dia.

- **Carga Hidráulica Volumétrica (CHV)**

A carga hidráulica volumétrica é calculada dividindo-se a Vazão (Q) pelo volume (V) do reator.

$$CHV = \frac{Q}{V} = \frac{7920 \left(\frac{m^3}{dia} \right)}{6000 (m^3)} = 1,32 m^3/m^3 \cdot dia$$

- **Tempo de Retenção Hidráulico**

O tempo de retenção é o inverso da Carga Hidráulica Volumétrica, sendo portanto equivalente a θh = 0,76 dia = 18,2 h

- **Velocidade de Escoamento e Altura do Reator**

A altura do reator é calculada como se segue:

$$H = v \cdot \theta h = 0,6 \left(\frac{m}{h} \right) \cdot 18,2 (h) = 10,92 m$$

Onde:

H : altura do reator (m)

v: velocidade de escoamento (m/h)

O Cálculo de altura do reator pela metodologia apresentada por Chernicharo (1997) resulta em uma altura maior que o recomendado para reatores do tipo UASB. Por tanto, a altura será fixada em 5,5 m, e será considerada uma vazão de recirculação, como apresentado a seguir.

- **Área do Reator**

$$\text{Área} = \frac{V}{H} = \frac{1500 (m^3)}{5,5 (m)} = 272,7 m^2$$

- **Diâmetro**

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot \text{Área}}{\pi}} = 18,7 m$$

A Figura 50 mostra um croqui da planta e o corte do reator UASB dimensionado (o separador trifásico não está apresentado nas dimensões verdadeiras:

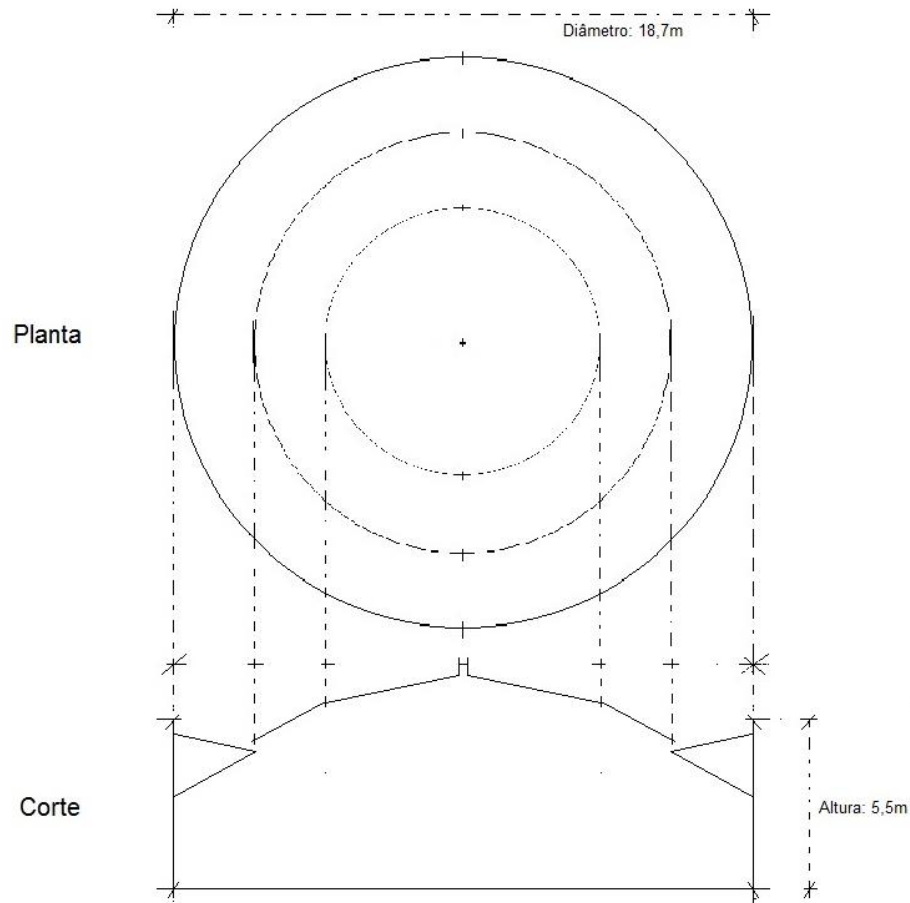


Figura 50 - Planta e Corte do Reator UASB Proposto

• Número de Distribuidores

O número de distribuidores pode ser calculado dividindo-se a área do reator, pela área de influência de cada tubo, que pode variar de 2 a 3 m² (CHERNICHARO, 2007). Adota-se 2,5 m², como se segue:

$$N_D = \frac{\text{Área}}{A_i} = \frac{272,7}{2,5} = 109,08$$

Onde:

Nd: Número de distribuidores.

Ai: Área de influência do distribuidor.

Será adotado o número de 109 distribuidores.

- **Vazão de Recirculação**

Como a altura dos reatores foi fixada em 5,5 m, e a velocidade de escoamento fixada em 0,6 m/h (14,4 m/dia), como preconiza a literatura, é necessário considerar uma vazão de recirculação justamente para manter a velocidade de escoamento no valor recomendado. Considerando os quatro reatores, a área total será de 1091 m². Então a vazão de recirculação pode ser calculada como se segue:

$$\frac{Q + Q_r}{Área} = v$$

$$\frac{7920 + Q_r \left(\frac{m^3}{dia}\right)}{1091 (m^2)} = 14,4 \left(\frac{m}{dia}\right)$$

$$Q_r = 7.789,1 m^3/dia$$

Onde:

Q: Vazão máxima (m³/dia)

Q_r: Vazão de Recirculação (m³/dia)

v: velocidade de escoamento (14,4 m/dia)

Então, com o objetivo de reduzir a altura dos reatores para 5,5 m, será necessária recircular uma vazão de 7789,1 m³/dia nos reatores, de modo a manter a velocidade de escoamento dentro do intervalo recomendado (0,5 – 0,7 m/h)

8.2.4. Estimativas

Neste item, são feitas estimativas de caráter técnico e econômico, ressaltando que, principalmente para este último, as estimativas podem ser grosseiras, objetivando resultados que permitam a análise da ordem de grandeza dos mesmos, o que faz sentido levando em conta os fins deste estudo. Primeiramente, são feitas estimativas relativas ao processo de tratamento em si, abarcando indicadores de eficiência, remoção de DQO, custos de implantação e operação, dentre outros.

Posteriormente, faz-se então as estimativas relativas à produção, aproveitamento e destinação do biogás gerado, as quais, a partir de certo ponto, serão divididas em duas opções:

Opção 1 - Geração de Energia Elétrica pela Utilização de Motores a Combustão Interna Ciclo Otto.

Opção 2 - Utilização de Gás Natural como Combustível na Cadeia Produtiva.

8.2.4.1. Estimativas Relativas ao Processo de Tratamento

- **Eficiência de Remoção de DQO**

Segundo (CHERNICHARO, 1997), a eficiência do sistema na remoção de DQO para reatores que operam na faixa mesofílica pode ser estimada através da seguinte equação:

$$E_{DQO} = 100 \cdot (1 - 0,68 \cdot \theta_h^{-0,35})$$

Onde:

E_{DQO} : Eficiência de redução de DQO (%)

θ_h : Tempo de retenção hidráulico (horas)

No caso da digestão da vinhaça, que será operada na faixa termofílica, é esperada uma eficiência ainda maior se comparada a faixa mesofílica (GEHRING, 2014). Para o TDH de 18,2 horas, a eficiência estimada é de aproximadamente 75%.

- **Carga de DQO**

$$Carga\ DQO_{afl} = Q_{méd} \cdot S = 6.600 \left(\frac{m^3}{dia} \right) \cdot 23,8 \left(\frac{kg\ DQO}{m^3} \right) = 157.080\ kg\ \frac{DQO}{dia}$$

Onde:

$Q_{méd}$: Vazão Média Afluente (6600 m³/dia)

S : Concentração de DQO Afluente (23,8 kg DQO/m³)

- **Carga Orgânica Removida**

$$Carga\ DQOr = Carga\ DQOafl \cdot E = 157.080 \left(kg \frac{DQO}{dia} \right) \cdot 0,75 = 117.810\ kg \frac{DQO}{dia}$$

Onde:

Carga DQOr: Carga de DQO Removida (kg DQO/m³).

E_{DQO}: Eficiência de Remoção de DQO (75%).

Carga DQOafl: Carga de DQO Afluente (152.328 kg DQO/dia)

- **Carga Orgânica Residual**

$$Carga\ DQOefl = Carga\ DQOafl \cdot (1 - E) = 157080 \left(kg \frac{DQO}{dia} \right) \cdot (1 - 0,75) = 39270\ kgDQO/dia$$

Onde:

Carga DQOefl: Carga de DQO efluente ou residual (kgDQO/m³)

E: Eficiência de Remoção de DQO (75%)

Carga DQOafl: Carga de DQO Afluente (157.080 kg DQO/dia)

- **Produção de Lodo**

Baseando-se no estudo de (GOMES; BERNARDINO, 2013), estima-se a produção de lodo adotando-se 0,18 kgSS/kgDQO como Coeficiente de Produção de Sólidos.

$$PL = Y \cdot Carga\ DQOafl = 0,18 \left(\frac{kgSS}{kgDQO} \right) \cdot 157080 \left(\frac{kgDQO}{dia} \right) = 28274,4\ kg \frac{SS}{dia}$$

Onde:

PL: Produção de lodo (kg SS/ dia)

Y: Coeficiente de Produção de Sólidos (0,18 kgSS/kgDQO)

Carga DQOafl: Carga de DQO Afluente (157.080 kg DQO/dia)

- **Vazão de Lodo**

Baseando-se no estudo de (GOMES; BERNARDINO, 2013), estima-se a vazão de lodo, adotando-se 4% como Teor de Sólidos Secos e 1020 kg/m³ como Densidade.

$$Q_{lodo} = \frac{PL}{TS \cdot \rho} = \frac{28274,4 \left(kg \frac{SS}{dia} \right)}{0,04 \cdot 1020 \left(\frac{kgSS}{m^3} \right)} = 693 m^3 / dia$$

Onde:

PL: Produção de Lodo (carga de sólidos – kgSS /dia)

TS: Teor de Sólidos Secos (4%)

ρ : Densidade (1020 kg/m³)

Portanto a Vazão de Lodo estimada é de 693 m³/dia.

- **Sistema de Desidratação ou Desaguamento do Lodo**

Será adotado um sistema de desidratação mecânico do tipo centrífugo, descrito abaixo:

Capacidade total da centrífuga

O lodo proveniente do reator apresenta-se estabilizado, porém ainda contém um alto teor de umidade, sendo necessária a sua desidratação. Será adotado um processo de desidratação mecanizada através do uso de uma centrífuga, utilizando-se como metodologia os apontamentos contidos em (JORDÃO e PESSÔA, 1995).

Considera-se que a centrífuga opera (tempo de operação) 16 h/dia e $Q_{lodo} = 693 m^3/dia$, e considerando que o coeficiente de segurança (pico) é de 1,15, tem-se que:

$$Capacidade\ Total\ da\ Centrifuga = \frac{Q_{lodo} \cdot 1,15}{t} = \frac{693 \left(\frac{m^3}{dia} \right) \cdot 1,15}{16 \left(\frac{h}{dia} \right)} = 49,8 m^3 / h$$

Adota-se 50 m³/h.

Uso diário de polieletrólitos

Serão empregados polímeros para condicionar o lodo e facilitar seu desaguamento, ou centrifugação. Considerando o uso de polieletrólitos na razão de 6 kg por tonelada de lodo afluyente à centrífuga (JORDÃO e PESSÔA, 1995) e a produção de lodo de 28.274,4 kgSS/dia, tem-se:

$$6 \left(kg \frac{polímero}{ton\ SS} \right) \cdot 28,28 \left(\frac{ton\ SS}{dia} \right) = 169,68 kg\ polímero / dia$$

Sendo assim, o uso total de polieletrólitos será de aproximadamente 170 kg/dia.

Vazão de lodo para destinação final

Será considerado teor de sólidos esperado na torta de 30% e a massa específica da mistura do lodo com polieletrólitos de 1060 kg/m³ (JORDÃO e PESSÔA, 1995).

$$Q_{lodo} = \frac{28274,4 \text{ (kgSS/dia)}}{1060 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot 1 \cdot 0,3} = 88,9 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Portanto a quantidade de lodo que seguirá para a destinação final é de aproximadamente 88,9 m³/dia.

• **Estimativa de Custos com a Implantação do Sistema de Tratamento**

(GEHRING, 2014) faz uma estimativa de custo por metro cúbico em relação aos custos envolvidos na implantação do sistema de tratamento, considerando relações típicas utilizadas por empreiteiras que prestam serviços ao segmento, contabilizando material e mão de obra para a construção. O sistema usado é bastante semelhante ao aqui estudado e para estimativa deste índice considerou-se os custos de implantação do sistema de reatores, custos com a montagem mecânica da linha de tubulações, com seus respectivos acessórios (válvulas, flanges, curvas e conexões) e gastos com o sistema de bombeamento.

A Relação de Custo relativa à implantação dos reatores e à implantação do sistema de tubulações são respectivamente de 755 R\$/m³ e 115 R\$/m³, aproximadamente, de acordo com o estudo citado acima.

$$\text{Custo de Implantação} = 6000 \text{ (m}^3\text{)} \cdot 870 \left(\frac{\text{R\$}}{\text{m}^3} \right) = 5.220.000,00 \text{ R\$}$$

Assim a Relação de Custo total do sistema de tratamento é 870 R\$/m³ e portanto para um sistema com 6000 m³ de volume tem-se, aproximadamente, um custo de R\$ 5.220.000,00.

• **Estimativa de Custos Operacionais do Sistema de Tratamento**

De acordo com (SPERLING, 2013), os custos com produtos químicos utilizados para a estabilização dos reatores e outros custos de operação e manutenção dos reatores UASB são de 0,05 R\$/m³ e 0,55 R\$/m³ de produto tratado. Segundo GEHRING (2014) os custos com manutenção nos sistemas de tubulações equivalem a 5% do valor das bombas e exaustores ao ano e, portanto, aproximadamente 4000 R\$/ano.

Sabendo que o volume anual de produto tratado é de, aproximadamente, 1.504.800 m³/ano (6600 m³/dia * 228 dias/ano), estima-se os custos operacionais, sem considerar custos com salários e ordenados nem manutenção predial.

$$\begin{aligned} \text{Custos Operacionais} &= (0,05 + 0,55) \left(\frac{\text{R\$}}{\text{m}^3} \right) \cdot 1504800 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{ano}} \right) + 4000 \left(\frac{\text{R\$}}{\text{ano}} \right) = \\ &= 906.880,00 \text{ R\$/ano} \end{aligned}$$

Portanto os custos operacionais do sistema de tratamento são de aproximadamente 906.880,00 R\$/ano.

8.2.4.2. Estimativas Relativas à Produção, Aproveitamento e Destinação do Biogás Gerado

- **Produção de Biogás**

A produção de biogás pode ser estimada da seguinte forma, considerando a vazão média de vinhaça:

$$PB = CO \cdot E \cdot F = 6600 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \right) \cdot 23,8 \left(\text{kg} \frac{\text{DQO}}{\text{m}^3} \right) \cdot 0,76 \cdot 0,45 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kgDQO}} \right) = 53.721,4 \text{ Nm}^3/\text{dia}$$

Onde:

PB: Produção de Biogás (Nm³/dia)

CO: Carga Orgânica (kg DQO/dia)

E: Eficiência de remoção (75%)

F: Fator de conversão de biogás por kg DQO removida (0,45 Nm³/kg DQO)

Portanto, é estimada uma produção diária de 53.721,4 m³ de biogás nas condições normais de temperatura e pressão.

- **Sistema de Limpeza do Biogás**

Segundo (GEHRING, 2014), a fração volumétrica de metano no biogás está na faixa de 50 - 90% vol. Adota-se o valor de 65% para fins de estimativa também por estar coerente com os valores já adotados anteriormente.

Adota-se um sistema de lavagem semelhante ao apresentado por (GEHRING, 2014), que é constituído por 3 secadores de gases e uma torre de adsorção com carvão ativado. Adota-se uma pureza de metano ao final do processo de no mínimo 96%. Assim, admitindo as premissas supracitadas, faz-se uma estimativa da produção de gás natural.

$$PGN = PB \cdot FVM \cdot \alpha = 53721,4 \left(\frac{Nm^3}{dia} \right) \cdot 0,65 \cdot 0,96 = 33.522,15 \frac{Nm^3}{dia}$$

Onde:

PB: Produção de Biogás (Nm³/dia)

FVM: Fração Volumétrica de Metano (CH₄) no Biogás (65%vol)

α : Grau de Pureza (96%)

Portanto, é estimada uma produção diária de 33.522,15 m³ de gás natural (metano) nas condições normais de temperatura e pressão.

• Custos de Implantação e Operação do Sistema de Lavagem de Gases

Seguindo a mesma metodologia adotada por (GEHRING, 2014), considera-se o Índice de Custo de Implantação, do sistema de lavagem de gases adotado, que corresponde a 2,15 R\$.dia/m³ de capacidade diária de tratamento em volume de biogás.

$$\begin{aligned} \text{Custo de Implantação do Sistema de Lavagem de Gases} &= \\ &= 2,15 \left(R\$ \cdot \frac{dia}{m^3} \right) \cdot 53.721,4 \left(\frac{m^3}{dia} \right) = 115.501,00 \text{ R\$} \end{aligned}$$

Dessa forma, com a produção de 53721,4 m³/dia de biogás, tem-se o custo de implantação do sistema estimado em R\$ 115.501. E com relação aos custos de operação, estima-se gastos na ordem de 8000 R\$/ano, com carvão ativado e manutenção.

8.2.4.2.1. Opção 1 - Geração de Energia Elétrica pela Utilização Motores a Combustão Interna Ciclo Otto

• Energia contida no Biogás Gerado

A quantidade de energia pode ser estimada:

$$GEB = PB \cdot PCIB = 53.721,4 \left(Nm^3/dia \right) * 5100 \left(\frac{kcal}{Nm^3} \right) = 273.979.140 \text{ kcal/dia}$$

Onde:

PB: Produção de Biogás (Nm³/dia)

GEB: Quantidade de energia contida no biogás (kcal/dia)

PCIB: Poder calorífico Inferior do Biogás (5100 kcal/Nm³) (GRANATO, 2003)

A quantidade de energia diária gerada equivale a 318.638 kWh/dia, ou 318,64 MWh/dia.

- **Energia Elétrica Gerada**

Admite-se a adoção de um sistema de geração utilizando motores de combustão interna de ciclo Otto, já citado anteriormente, pois segundo (GEHRING, 2007) esse sistema apresenta elevados índices de eficiência elétrica (35 - 45%), em comparação com outras tecnologias, e apresenta outras condições adequadas para os fins deste cálculo, como a faixa de potência recomendada (30kW - 20 MW). Assim, adota-se 40% de eficiência elétrica.

$$E = GEB \cdot \eta = 318638 \left(\frac{kWh}{dia} \right) \cdot 0,4 = 127.455,2 \text{ kWh/dia}$$

Onde:

E: Energia Elétrica Gerada por Dia (kWh/dia)

GEB: Quantidade de Energia Contida no Biogás (kWh/dia)

η : Eficiência Elétrica (40%)

Assim, a energia gerada por dia é 127.455,2 kWh/dia ou 127,46 MWh/dia. Divide-se por 24 horas para se obter a potência de geração, que vale 5.310,63 kW ou 5,31 MW.

- **Receita com a Venda da Energia Gerada**

Crises nos regimes de produção de energia hídrica fazem com que as concessionárias e grandes consumidores procurem energia no mercado livre, o que eleva o preço final da energia para os consumidores.

O preço pago pela energia elétrica, no chamado mercado livre, baseia-se no Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) divulgado mensalmente pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). Assim, o preço da energia varia conforme a procura por energia no mercado. Para os fins de estimativa, neste estudo, adota-se o valor de 218,98 R\$/MWh, referente ao mês de novembro de 2016 e para o Sudeste e Centro-Oeste, Preço Médio de acordo com (CCEE, 2016). Assim, faz-se uma estimativa de receita com a venda de energia.

$$R = PLD \cdot E \cdot DO =$$

$$218,98 \left(\frac{R\$}{MWh} \right) \cdot 127,46 \left(\frac{MWh}{dia} \right) \cdot 228 \left(\frac{dias}{ano} \right) = 6.363.751,50 \text{ R\$/ano}$$

Onde:

R: Receita anual da venda de Energia Elétrica Gerada pelo Biogás, em R\$/ano.

PLD: Preço Médio da CCEE (218,98 R\$/MWh)

E: Energia Elétrica Gerada por Dia (127,46 MWh/dia)

DO: Dias por ano de operação da usina (228 dias/ano)

• Custos de Implantação

Faz-se então uma estimativa, também baseada no estudo de GEHRING (2014), para os custos de implantação e operação do sistema, contendo barracão dos geradores, grupo gerador com subestação e painel de conexão com a rede. Leva-se em consideração que a unidade já possui a infraestrutura para venda de energia, linha de alta tensão já instalada e admite-se que não haverá custos adicionais com a conexão dos geradores à rede nem com a interligação com os demais geradores já implantados. Utilizando-se de dados do estudo, uma vez que o projeto é bastante semelhante, adotando-se um índice de custo de investimento equivalente a 1146 R\$/kW. Adota-se também o fator de relação (0,75) entre potência real e potência instalada para garantir que o sistema não opere em sua carga máxima ou em sobrecarga.

$$\text{Custos de Implantação} = 1146 \left(\frac{R\$}{kW} \right) \cdot 5310,63 \left(\frac{kW}{0,75} \right) = R\$ 8.022.000,00$$

Portanto, para um sistema com aproximadamente (5.310,63 kW/0,75) 7000 kW de potência, tem-se que os custos relativos à implantação do sistema, de geração de energia elétrica, são equivalentes a R\$ 8.022.000.

• Custos de Operação e Manutenção

Os custos com operação do sistema de geração, incluso óleo lubrificante, filtro de ar e óleo, correias e outros, é da ordem de 0,025 R\$/kWh, segundo GEHRING (2014). Faz-se abaixo uma estimativa dos custos operacionais do sistema de geração.

Custos Operacionais =

$$127.455,2 \left(\frac{kWh}{dia} \right) \cdot 228 \left(\frac{dias}{ano} \right) \cdot 0,025 \left(\frac{R\$}{kWh} \right) = 726.494,64 \text{ R\$/ano}$$

Portanto, para um sistema com geração aproximada de 127.455,2 kWh/dia e 228 dias/ano de operação, tem-se que os custos relativos à operação e manutenção do sistema, de geração de energia elétrica, são equivalentes a 726.494,64 R\$/ano.

8.2.4.2.2. Opção 2 - Utilização de Gás Natural como Combustível na Cadeia Produtiva

- **Ganhos com a Utilização do Gás Natural em Veículos e Máquinas**

Os dados e informações utilizados neste item foram extraídos de (KNIGHT, 2009), (CEGAS, 2016) e (COMPAGAS, 2016). A utilização de Gás Natural como combustível para caminhões, máquinas e outros veículos movidos a diesel, por exemplo, já é uma realidade. Através da utilização de motor Otto de fábrica, em média 30% mais caros ou da adaptação do motor a diesel para a utilização de gás natural, estimado em R\$ 25.000 por veículo. Mas a tecnologia que atualmente apresenta-se com os melhores resultados e rendimentos é a tecnologia *dual fuel* (ou bicomcombustível), que permite ao motor a utilização de dois combustíveis (Gás Natural e Óleo Diesel).

De acordo com (COMPAGAS, 2016), os caminhões que rodam utilizando o gás natural veicular no sistema *dual fuel*, que possibilita a utilização alternada de diesel e GNV, geram uma economia de até 50% e reduzem em até 70% a emissão de gases poluentes. Por ser uma tendência em todo mundo, inclusive pela significativa redução nas emissões de material particulado, considera-se ser uma tecnologia que tende a se aprimorar em termos de custo benefício. A Figura 50, contém um veículo que utiliza essa tecnologia.



Figura 51. Caminhão Bicombustível Dual Fuel Fonte: COMPAGAS

Lembrando ainda que não considera-se aqui os custos relativos à sua implantação e que portanto trata-se de uma estimativa de quanto se economizaria por quilômetro rodado com combustível, num cenário no qual todo o sistema já estaria implantado. Adota-se 2,803 R\$/l de Óleo Diesel (ANP, 2016), o consumo de 0,32 l/km.caminhão de óleo diesel para caminhões pesados (MMA, 2011) e a taxa de 50% de economia.

$$\text{Economia de Custos com Combustível} = 0,32 \left(\frac{l}{\text{km. caminhão}} \right) \cdot 2,803 \left(\frac{\text{R\$}}{l} \right) \cdot 0,5 = 0,45 \left(\frac{\text{R\$}}{\text{km. caminhão}} \right)$$

Portanto, neste cenário estima-se que seriam economizados 0,45 R\$/km.caminhão rodado para cada caminhão ao longo da cadeia produtiva, ainda que o gás natural fosse comprado de distribuidoras ou postos de combustível.

8.3. Apresentação dos Resultados

Apresentam-se então, aqui, os resultados, obtidos através deste estudo, separados por dimensionamento e estimativas de cada segmento. Um resumo dos resultados encontra-se na Tabela 29:

Tabela 29: Apresentação dos Resultados

Apresentação dos Resultados	
Dimensionamento - Reator UASB	
Vazão Afluente	7.920 m ³ /dia
Volume Unitário dos Reatores	1500 m ³
Volume Total	6000 m ³
Carga Hidráulica Volumétrica	1,32 m ³ /m ³ .dia
Tempo de Retenção Hidráulico	0,76 dia ou 18,2h
Velocidade de Escoamento	0,6 m/h
Altura	5,5 m
Área	272,7 m ²
Diâmetro	13,2 m
Número de Distribuidores	109
Estimativas - Sistema de Tratamento Anaeróbio	
Eficiência de Remoção de DQO	75 %
Carga Orgânica Removida	117.810 kg DQO/dia
Carga Orgânica Residual	39.270 kg DQO/dia
Produção de Lodo	28.274,4 kgSS/dia
Vazão de Lodo	693 m ³ /dia
Custos - Implantação	R\$ 5.220.000,00
Custos - Operação e Manutenção	906.880,00 R\$/ano
Estimativas – Sistema de Desidratação de Lodo	
Capacidade Total da Centrífuga	50 m ³ /h
Uso Diário de Polieletrólitos	170 kg/dia
Vazão de Lodo para Destinação Final	88,9 m ³ /dia
Estimativas – Sistema de Lavagem de Gases	
Custos - Implantação	R\$ 115.501,00
Custos - Operação	8.000,00 R\$ /ano
Estimativas - Opção 1	
Energia contida no Biogás Gerado	318,64 MWh/dia
Energia Elétrica Gerada	127,46 MWh/dia
Potência de Geração	5,31 MW

Receita com a Venda da Energia Gerada	6.363.751,50 R\$/ano
Custos - Implantação	R\$ 8.022.000,00
Custos – Operação e Manutenção	726.494,64 R\$/ano
Estimativas - Opção 2	
Economia de Custos com Combustível	0,45 R\$/km.caminhão

Considerando o sistema de tratamento proposto e as sugestões e possibilidades de destinação avaliadas e estimadas, apresenta-se o fluxograma da Figura 51, que compreende os processos e alguns dos componentes supracitados. Em vermelho, azul, verde e marrom, encontram-se a vinhaça, o efluente líquido gerado, o biogás e o lodo, respectivamente. Procurou-se abranger uma forma mais holística dos processos e portanto não contém informações como balanços de massa e energia.

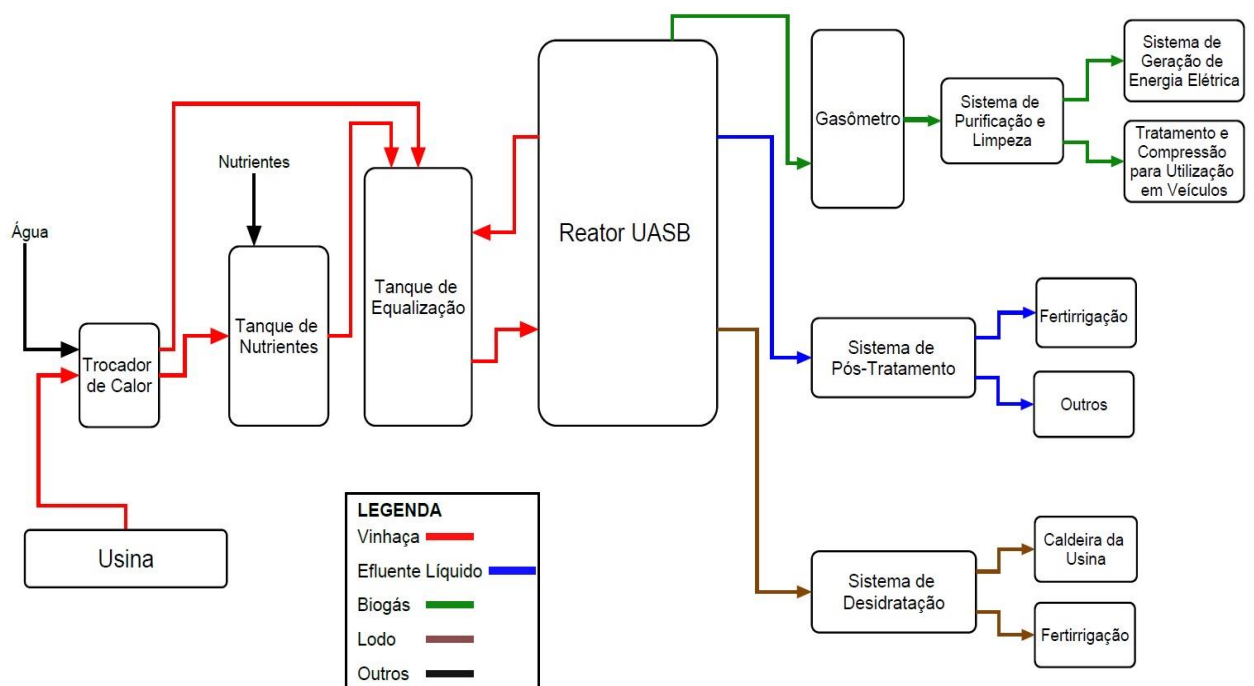


Figura 52: Fluxograma dos Processos e Sistemas Propostos: Fonte: Autores

- **Considerações de Ordem Técnica**

Faz-se aqui algumas considerações de ordem técnica acerca dos resultados e da solução proposta. Primeiramente, vale destacar um aspecto facilitador que é o fato de se poder utilizar da estrutura de escoamento e transporte de vinhaça já existente na unidade estudada, tanto para o transporte da vinhaça afluyente ao sistema de tratamento, quanto para o efluente e seu transporte para a lavoura.

Com relação a aspectos construtivos dos reatores é usual e recomendável que o tanque de reação seja construído em concreto armado, com laje de concreto e pilares de concreto, internos, para suporte da laje e do separador trifásico. Já para a estrutura do separador trifásico e do defletor, recomenda-se que esta seja de aço inox, de forma a garantir maior vida útil e maiores intervalos de manutenção dos elementos.

A recirculação nos reatores, como pode-se observar no fluxograma, permite a diluição e uma efetiva mistura do afluyente que adentra ao reator, ou seja, propicia um melhor condicionamento do resíduo a ser processado.

É importante lembrar de outros componentes do sistema que não foram mencionados como o sistema de proteção e controle dos geradores, contendo transformadores, disjuntores, medidores de tensão e corrente, dentre outros. Com relação ao sistema de tubulações, recomenda-se a utilização de tubos e conexões de aço inox para alimentação dos reatores e para o transporte do biogás até o sistema de purificação, por conta do caráter corrosivo de ambos.

O biogás contendo principalmente metano não é facilmente armazenável e não pode ser liquefeito a pressão e temperatura ambiente. Assim, faz-se necessário, dependendo da aplicação do mesmo, a utilização de um sistema de armazenamento, ou de compressão, que é mais eficiente para o biogás limpo, ou tratado. Alguns tipos de sistemas são o Selo d'água (de aço e à baixa pressão), Gás *bag* (à baixa pressão e de plástico, vinil ou lona) e os Cilindros Comerciais de Gás (à alta pressão e de aço) (SALOMON, 2007).

Para efeitos de análise faz-se uma relação entre a energia elétrica produzida pela opção 1 (29.060 MWh/ano), detalhada anteriormente, e a energia elétrica total consumida na unidade (64.790 MWh/ano), estimada no início do estudo. Assim, constata-se que a energia gerada pela opção 1 corresponderia a 45 % da energia elétrica total consumida pela unidade.

Algumas considerações sobre o efluente líquido gerado se fazem necessárias. A Tabela 30, retirada de (SALOMON, 2007), mostra as principais características físico-químicas da vinhaça antes e depois da biodigestão. Pode-se observar que ocorre melhora (considerando os possíveis usos, como a própria fertirrigação) significativa de indicadores importantes como pH, DQO, Nitrogênio

Total, Nitrogênio Amoniacal e Fósforo. No entanto, não altera a concentração de Potássio, que é alta considerando seu potencial de salinização do solo.

Tabela 30. Características Físico-Químicas da Vinhaça.

Parâmetro	Vinhaça (antes da biodigestão)	Vinhaça (depois da biodigestão)
pH	4,0	6,9
DQO (mg/l)	29.000	9.000
Nitrogênio total (mg/l)	550	600
Nitrogênio Amoniacal (mg/l)	40	220
Fósforo P ₂ O ₅ (mg/l)	17	32
Sulfato (mg/l)	450	32
Potássio K ₂ O (mg/l)	1400	1400

Fonte: SALOMON, 2007.

Por fim, vale mencionar a possibilidade de utilização de outros tipos de reatores, como o de mistura completa por exemplo. Este tipo de biodigestor apresenta eficiência de remoção de DQO superior aos reatores UASB, chegando a 80-95%. Além disso, essa modalidade é bastante adequada para o processamento de resíduos com alta carga orgânica. No entanto, apresenta algumas desvantagens, motivo pelo qual não foi escolhida para o dimensionamento, como o fato de o tempo de retenção hidráulica ser igual ao tempo de retenção celular e portanto muito alto, tornando o processo lento e implicando em volumes muito altos dos reatores.

• Considerações de Ordem Econômica

Faz-se aqui algumas considerações de ordem econômica acerca dos resultados e da solução proposta. Primeiramente, deixa-se claro que as estimativas econômicas são marcadas pelas incertezas, primeiro porque os índices adotados estão sujeitos a oscilações no tempo, segundo porque as estimativas realizadas são baseadas em experiências reais, mas nada garante que tudo ocorrerá conforme se previa. Além disso, não foram consideradas ferramentas e fatores como fluxos de caixa, taxa mínima de retorno, avaliação de risco, valores presentes e futuros, ponto de equilíbrio econômico, taxa de atratividade, juros nem impostos como PIS, ICMS, CONFINS e outros. Além disso é importante lembrar que não está sendo considerado, nas estimativas, os custos relativos a projeto, instalação e comissionamento.

Não se pode esquecer das barreiras econômicas existentes, que podem impedir ou inviabilizar o empreendimento, impostas às tecnologias adotadas. Alguns exemplos de barreiras são: importação de equipamentos (altas taxas de impostos e variação cambial), instituições de investimento (muitas vezes ao se tratar de empreendimentos desse tipo, o financiamento não é concedido facilmente),

intervenção do governo (interferência do governo sobre o preço final da energia elétrica pode gerar desconfiança no mercado e um ambiente desfavorável a investidores) e, por fim, a concorrência com o preço da energia gerada por hidrelétricas (que possuem padrões de financiamento muito mais vantajosos). Sem esquecer das inúmeras barreiras impostas pela estrutura econômica baseada em combustíveis fósseis.

Sobre a utilização do gás natural, como combustível veicular, na cadeia produtiva da indústria, a estimativa de 0,45 R\$ / km.caminhão mostrou-se bastante significativa, sendo equivalente a R\$ 450 de economia para cada 1000 km rodados por cada caminhão da cadeia produtiva. Além disso nota-se, pelos dados mostrados na Tabela 31, que a produção de biogás, tanto para utilização em veículos quanto para queima em caldeiras mostra-se competitiva em relação a outros energéticos potencialmente concorrentes.

Tabela 31. Comparação Entre os Custos de Produção.

1ª alternativa (veículos)		2ª alternativa (queima em caldeiras)	
Energético	US\$/t EP	Energético	US\$/t EP
Óleo Diesel	327	Óleo Combustível	150
Gasolina	437	GLP	204
Álcool Etílico	238	Carvão Natural	25,9
Biogás	80 - 147	Gás Natural	103
		Biogás	63 - 129

Fonte: GRANATO, 2003

Outra consideração pertinente é que a metodologia apresentada para avaliação econômico financeira da geração de energia elétrica considerou apenas a venda no mercado livre e não a venda no mercado regulado, no qual os preços seriam significativamente inferiores. E o índice de preço de referência utilizado (PLD) nessa estimativa apresenta grande variabilidade ao longo do tempo, como mostra a Figura 52.

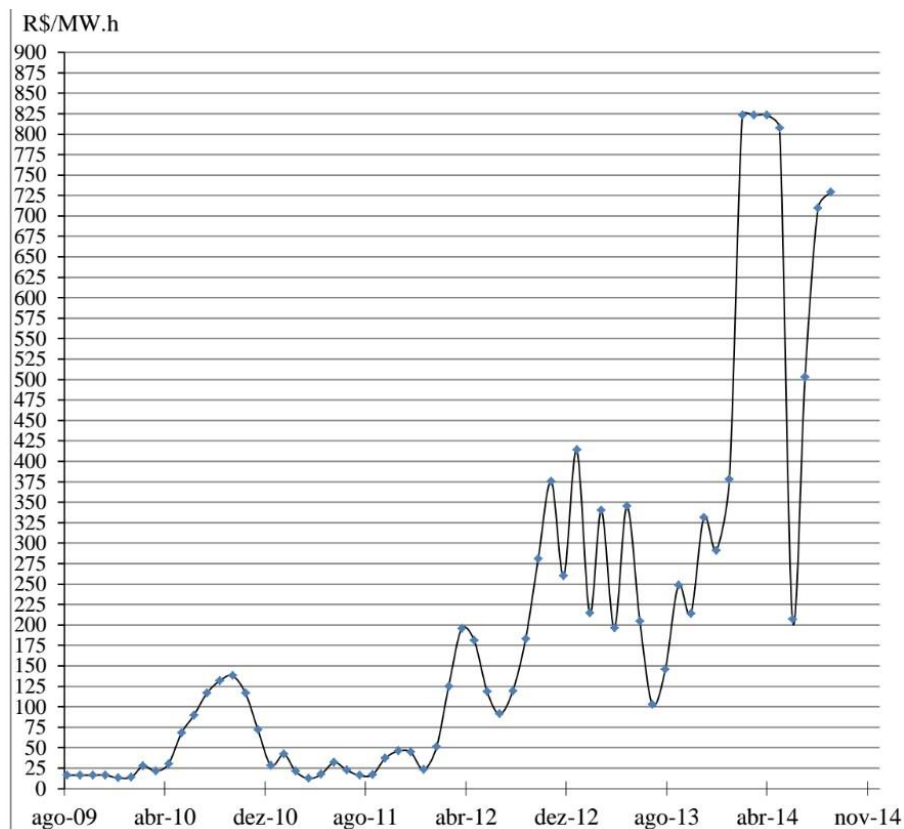


Figura 53. Gráfico PLD de Agosto de 2009 a Setembro de 2014 divulgados pela CCEE. Fonte: GEHRING, 2014.

Pela Tabela de Apresentação de Resultados, somando-se todos custos de implantação e de operação e manutenção, dos sistemas de tratamento anaeróbio, lavagem de gases e moto geradores de energia elétrica, tem-se:

- Custos Totais de Implantação: R\$ 13.357.501,00
- Custos Totais de Operação e Manutenção: 1.691.374,64 R\$/ano
- Receita Total: 6.363.751,50 R\$/ano

Por fim, vale lembrar que o reaproveitamento e tratamento da vinhaça é um assunto ainda pouco estudado e discutido e que, portanto, podem apresentar elevados custos de investimentos e incertezas com relação a seu retorno financeiro.

9. CONCLUSÕES / RECOMENDAÇÕES

O setor sucroalcooleiro tem importância histórica para o Brasil, desde o período colonial até os dias atuais. Os números do setor são expressivos, tornando o Brasil um dos principais produtores de cana, açúcar e etanol do mundo.

A adoção de práticas de produção mais limpa, e consequente aumento da eficiência dos processos industriais, se faz necessária no cenário atual, onde a competitividade no mercado externo de biocombustíveis e de etanol só tende a crescer, considerando ainda as pressões exercidas e barreiras impostas pelo setor petrolífero. As preocupações e anseios da sociedade por fontes renováveis de energia faz com que importantes avanços aconteçam no desenvolvimento de tecnologias e técnicas visando ganhos socioambientais e econômicos.

Esses avanços são ainda mais pertinentes e necessários no contexto da atividade da indústria da cana, uma vez que o setor é caracterizado por ser um expressivo consumidor de recursos e matérias primas, como água e energia, além de produzir efluentes em larga escala, onde a maior parcela é referente a vinhaça.

A vinhaça é um efluente com cargas orgânicas expressivamente altas, chegando a cem vezes a carga orgânica observada em esgotos sanitários, e na maioria dos casos, como na unidade estudada, a principal aplicação do efluente é na fertirrigação da lavoura, por apresentar compostos nutrientes. No entanto, apresenta altas concentrações de potássio, que a longo prazo trazem problemas de salinização dos solos e consequentemente à matéria prima neles produzida, no caso a cana de açúcar.

O fato de ser produzida em grandes volumes e de seu descarte em corpos d'água ser proibido por lei, implica na existência de um grande problema para as indústrias sucroalcooleiras. Estas por sua vez defendem a fertirrigação como a melhor forma de aproveitamento dos recursos contidos na vinhaça. No entanto, essa prática, que apesar de poder trazer algumas vantagens, pode ser entendida muito mais como um paliativo, ou seja, como uma forma simples e barata de destinação da vinhaça, do que uma medida que realmente promova um aumento de eficiência nos processos e reaproveitamento de recursos.

No sentido, então, de se buscar alternativas para destinação deste efluente, chegou-se a biodigestão como opção para aumentar o aproveitamento de recursos, e diminuir perdas, aumentando a eficiência do processo. Com isso, foi possível dimensionar um sistema de digestão anaeróbia de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB), e estimar a produção de biogás, e geração de lodo.

Os resultados obtidos revelam que a adoção dos sistemas propostos traz ganhos não só em termos de diminuição do potencial poluidor da vinhaça, mas também ganhos significativos em termos de reaproveitamento de recursos,

principalmente no caso do biogás. Este subproduto do tratamento, através dos sistemas propostos, apresenta sólida viabilidade técnica, tendo como principal fator de inibição as barreiras econômicas impostas sobre a utilização do mesmo, tanto na geração de energia elétrica quanto no seu uso como combustível veicular.

Devido à pouca quantidade de estudos realizados sobre a vinhaça, houve uma certa dificuldade em se encontrar uma metodologia específica a ser aplicada no tratamento da vinhaça. O que se tem, é a metodologia de tratamento de efluentes industriais de forma geral, que aqui foi aplicada para o caso particular da vinhaça.

Há um enorme potencial de produção de biogás na vinhaça, e um enorme contingente produzido anualmente é visto como resíduo sendo, de certa forma, desperdiçado. O tratamento da vinhaça em reatores UASB reduz o potencial poluente da vinhaça e melhora suas características nutritivas ao cultivo da cana de açúcar, através da redução da carga orgânica. A utilização do biogás, proveniente de efluentes industriais e esgotos domésticos, na geração de energia elétrica ou como combustível representa um importante passo em direção a uma matriz energética mais renovável e menos dependente das cadeias produtivas e tecnologias derivadas de combustíveis fósseis. Espera-se que nas próximas décadas, tecnologias como esta estejam mais consolidadas e portanto com maiores índices de eficiência e viabilidade econômica.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENDA 21. **Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento**. Brasília: Câmara dos Deputados, Coordenação de Publicações, 1995.

ANA, Agência Nacional de Águas; Federação das Indústrias do Estado de São Paulo; União da Indústria da Cana-de-açúcar; Centro de Tecnologia Canavieira. **Manual de conservação e reúso de água na agroindústria sucroenergética**. Brasília, 2009.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: DESA; Universidade Federal de Minas Gerais, 2001.

ANP, Agência Nacional do Petróleo. **Síntese dos Preços Praticados - SÃO PAULO; Resumo I - Diesel R\$/l; Período: De 27/11/2016 a 03/12/2016**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/preco/prc/Resumo_Por_Estado_Municipio.asp>. Acessado em 1 de dezembro, de 2016.

ARAÚJO, Lúcia de Fátima; DIAS, Maria V. C.; BRITO, Evaneusa A.; JÚNIOR, S. O.; **Enriquecimento protéico de alimentos por levedura em fermentação semissólida: alternativa na alimentação animal**. *Tecn. & Ciênc. Agropec.*, João Pessoa, v.3, n.3, p.47-53, set. 2009.

AUDIBERT, Luiz Encinas. **Avaliação Quantitativa e Análise do Potencial Energético do Biogás a partir da Vinhaça na Indústria Sucroalcooleira**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2015.

CAMARGO, A.L.B. **As dimensões e os desafios do desenvolvimento sustentável: concepções, entraves e implicações à sociedade humana**. Florianópolis, 2002. 197f.

CARVALHO, Túlio; SILVA, Celso. **Redução da Quantidade de Vinhaça Através da Evaporação**. Periódico Eletrônico: Fórum Ambiental da Alta Paulista Volume VI, Ano 2010.

CCEE, Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Preço Médio da CCEE (R\$/MWh)**. Disponível em: <http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/precos/precos_medios?_afLoop=711203493466416#%40%3F_afLoop%3D711203493466416%26_adf.ctrl-state%3Dkn1ormb7z_62>. Acessado em 29 de novembro, de 2016.

CEGAS, Companhia de Gás do Estado do Ceará. **O Gás Natural**. Disponível em: <http://www.cegas.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=70&Itemid=158>. Acessado em 5 de dezembro, de 2016.

CETESB. Norma Técnica P4.231: **Vinhaça - Critérios e Procedimentos de Aplicação no Solo Agrícola**, 3ª Edição. São Paulo, Fevereiro, 2005.

CETESB. **Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos**. São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Vol. 5 Ed. 10. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais. 1997.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbicos**. Belo Horizonte. 1997.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios: princípio de tratamento de águas residuárias**, v. 5. Belo Horizonte. Universidade Federal de Minas Gerais. 2007.

CMMAD, Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. **Nosso Futuro Comum**. 2 ed. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1991.

COMPAGAS, Companhia Paranaense de Gás. **Compagas Apresenta Tecnologia para Utilização de GNV em Veículos Pesados**. Disponível em: <<http://www.compagas.com.br/index.php/noticias-rodape/468-compagas-apresenta-tecnologia-para-utilizacao-de-gnv-em-veiculos-pesados>>. Acessado em 4 de dezembro, de 2016.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **Perfil do setor do Açúcar e do Alcool no Brasil**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasília, 2010.

COPERSUCAR, Cooperativa Central dos Produtores de Açúcar e Etanol do Estado São Paulo. **Circuitos de água de usinas de açúcar e destilaria de álcool: balanço hídrico**. Piracicaba, SP. 1984. 72p.

CPTI/IPT, **Relatório Técnico 393/08 (MINUTA)**. Franca, SP, Novembro, 2008.

DEDINI, International Sugar Journal. **Agribusiness Intelligence** . Disponível em: <<https://www.internationalsugarjournal.com/tag/dedini/>>. Acessado em 6 de junho, de 2016.

EIA, Energy Information Administration. **International Energy Statistics**. Disponível em: <<http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=79&pid=80&aid=1&cid=regions&syid=2000&eyid=2012&unit=TBDP>>. Acessado em 5 de junho, de 2016.

FIESP, Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. **2023: Projeções para o Agronegócio Brasileiro**. São Paulo, 2013.

GEHRING, Carlos Gustavo. **Análise da Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás produzido na Fermentação Anaeróbica de Vinhaça**. São Carlos, 2014.

GOMES, Maria Thereza de Moraes Santos. **Concentração da vinhaça por microfiltração seguida de nanofiltração** / Maria Thereza de Moraes Santos Gomes. - Campinas, SP: [s.n], 2011.

GOMES, I. H.; BERNARDINO, U. B. **Estudo Comparativo da Produção de Lodo das Estações de Tratamento de Esgoto de Mulembá e Vale Encantado e Avaliação dos Custos com sua Disposição**. FAESA. Vitória, 2013.

GONÇALVES, C. A. S.; SILVA, E. L.; **I-021 - Tratamento Físico-Químico da Vinhaça. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Porto Alegre, 2000.

GRANATO, Eder Fonzar. **Geração de Energia Através da Biodigestão Anaeróbica da Vinhaça**. Bauru - SP, 2003.

JORDÃO, E.P., PESSOA, C.A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**, 3a ed., ABES, Rio de Janeiro, 1995.

KNIGHT, Vivian Mac; YOUNG, Carlos Eduardo Frickmann. **Análise de Custo-Benefício da Substituição do Diesel por Gás Natural Veicular em Ônibus na Região Metropolitana de São Paulo**. Revista de Economia Mackenzie, Volume 7 n.3 pg 24-36. São Paulo, 2009.

LIMA, Herbert Henrique Souza. **Tratamento físico-químico da vinhaça por coagulação e adsorção em carvão ativado do bagaço da cana de açúcar.** João Pessoa, 2013.

LÓIO, Davi Ambrozio. **Tratamento físico-químico de vinhaça por coagulação e sedimentação e seu aproveitamento no cultivo da microalga *Chlorella vulgaris*.** São Carlos, 2013.

MARTINS, Juliano Araújo. **Resposta espectral do nitossolo submetido a diferentes doses de vinhaça.** Piracicaba, 2011.

MELO, Silvia Barbosa de. **O processo de certificação ISO 14001 nas práticas de gestão ambiental em uma indústria sucroalcooleira do Estado de Minas Gerais.** 2009. 157 f. Dissertação (Mestrado em Controladoria e Contabilidade) - FECAP - Faculdade Escola de Comércio Álvares Penteado, Dissertação (Mestrado em Ciências Contábeis) - FECAP, 2009.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. **1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários.** Brasília, 2011.

MTE, **Cadastro Geral de Empregados e Desempregados e Relação Anual de Informações Sociais.** Ministério do Trabalho e Emprego, 2014.

NEVES, M. et al. **Mapeamento e quantificação da cadeia sucroenergética na safra 2013/2014.** Mimeo, 2014.

PINTO, Cláudio Plaza. **Tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça e desenvolvimento sustentável.** Campinas, SP: [s.n.], 1999.

RIBEIRO, Flávio. **A Indústria Sucroalcooleira e as Oportunidades de Produção mais Limpa.** 7ª Conferência Municipal de Produção mais Limpa: O Etanol e a Cidade de São Paulo. Cetesb, 2008.

RIBEIRO, Fabíola Maria Gonçalves. **Usos da Água na Indústria Sucroalcooleira: Estudo de Caso.** Unicamp: Dissertação de Mestrado. Campinas, 2011.

SALOMON, Karina Ribeiro. **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade.** Itajubá - MG, 2007.

SAPCANA, Sistema de Acompanhamento da Produção Canavieira. **Acompanhamento da Produção.** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, em 26 de outubro de 2015.

SAPCANA, Sistema de Acompanhamento da Produção Canavieira. **Relação de Instituições Cadastradas no Departamento de Cana-de-Açúcar e Agroenergia.** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, em 4 de fevereiro de 2016.

SILVA, Gaspar Antônio da. **Avaliação das tecnologias de disposição de vinhaça de cana de açúcar quanto ao aspecto de desenvolvimento ambiental e econômico.** São Carlos, 2011.

SILVA, Priscila Ribeiro Santoro. **Simulação Dinâmica e Otimização de Evaporadores de Múltiplos Efeitos em Biorrefinarias** – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

SOARES, Paulo Augusto. ROSSEL, Carlos Eduardo Vaz. **O Setor Sucroalcooleiro e o Domínio Tecnológico.** Nucleo de Análise Interdisciplinar de Políticas e Estratégia da Universidade de São Paulo (NAIPPE-USP), 2004

SPERLING, M. V. **Tecnologias de Tratamento de Esgotos.** IV Seminário Internacional de Engenharia de Saúde Pública. Belo Horizonte. Universidade Federal de Minas Gerais. 2013.

SZYMANSKI, M. S. E. **Biodigestão Anaeróbia da Vinhaça: Aproveitamento Energético do Biogás e Obtenção de Créditos de Carbono - Estudo de Caso.** Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v.31, n.4, p. 901-912. Londrina, 2010.

TREVISOLI, Antônio Marcos dos Santos. **Estudo experimental da microfiltração tangencial com membrana cerâmica aplicada na clarificação da vinhaça.** São Carlos, 2010.

UNICA, União das Indústrias de cana-de-açúcar. **Produção e uso do etanol combustível no Brasil:** respostas às questões mais frequentes. São Paulo, SP, Março, 2007.

ANEXO I

Legislação Aplicável aos Recursos Hídricos

A evolução da legislação brasileira, aplicável à indústria de cana-de-açúcar e à produção de etanol, mostrou ser determinante durante a ascensão, queda e o posterior salto de produção e investimento do setor no Brasil.

Com relação à produção e economia do etanol destaca-se o programa Próalcool que, em 1975, foi responsável pela consolidação do uso de álcool hidratado como combustível. Outro marco importante foi a Lei do Petróleo, de 1997, que resultou na criação do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e a atual Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Hoje a ANP é responsável pela maioria das leis sobre especificações e produção de combustíveis. A mistura de álcool anidro à gasolina é regulamentada pelo Conselho Interministerial do Açúcar e do Álcool (CIMA) por meio do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA).

Faz-se então, mais especificamente, considerações com relação à legislação aplicável à utilização dos recursos hídricos e à legislação aplicável à reutilização e reaproveitamento de resíduos e efluentes, e para tanto consultou-se ANA, FIESP, UNICA e CTC, 2009. No que se refere à obtenção de licenças e autorizações, a legislação relacionada se apresenta nos três níveis de poder, federal, estadual e municipal, juntamente com as resoluções, deliberações e outros dispositivos.

Âmbito Federal

As normas, leis e dispositivos legais relacionados visam uma adequada gestão das águas, com o objetivo de garantir o seu uso por diversos agentes, atendendo as necessidades de todos os setores de usuários, promovendo assim o equilíbrio entre as partes e o desenvolvimento sustentável.

A Constituição Federal de 1988 estabelece as águas que podem pertencer à União, como por exemplo, lagos ou rios que banhem mais de um Estado ou sirvam de limites com outros países, enquanto que os demais, sejam águas superficiais, subterrâneas, emergentes, fluentes ou em depósito, pertencem aos Estados.

De maneira sintética, destaca-se a Lei nº 9.433/97, conhecida como Lei das Águas, que cria a Política e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SNGRH). Dos fundamentos dessa lei, decorrem diversas disposições posteriores relacionadas ao funcionamento do SNGRH, permitindo que os principais setores usuários de água, a sociedade civil, participem das discussões das políticas públicas, juntamente com o poder público.

Com essa finalidade, o SNGRH é composto pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), a Agência Nacional de Águas (ANA), Conselhos Estaduais, Agências de Água de âmbito estadual e pelos Comitês de Bacias Hidrográficas, que podem funcionar tanto no âmbito federal, como no âmbito estadual. Os Comitês de Bacia têm como atribuição legal aprovar o Plano de

Recursos Hídricos da Bacia, estabelecer mecanismos de cobrança pelo uso da água e promover o debate das questões relacionadas.

Dentro desse contexto, a Lei das Águas estabelece, em seu artigo 5º, a outorga dos direitos de uso e a cobrança pelo uso da água, dentre outros instrumentos.

Outorga pelo Uso da Água

A outorga pelo uso da água é um instrumento do poder público que visa regulamentar e equilibrar o uso, entre os interessados, dentro de uma bacia hidrográfica e serve como base de cálculo ao estabelecer valores a serem cobrados. A outorga é solicitada pelo usuário e avaliada pelos órgãos gestores competentes, os quais irão considerar aspectos quantitativos e qualitativos e a disponibilidade hídrica do manancial.

Uma vez aprovada, a outorga é publicada no Diário Oficial, juntamente com características técnicas, condicionantes legais e a identificação do usuário. Ainda que fraca legalmente para este fim, a outorga, do ponto de vista do usuário, pode servir como uma garantia do direito de uso, nas condições estabelecidas e pelo prazo determinado.



RESOLUÇÃO Nº 217, DE [REDACTED]

O SUPERINTENDENTE DE OUTORGA E COBRANÇA DA AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA, no uso de suas atribuições, bem como da competência que lhe foi cometida pela Diretoria Colegiada, com fundamento no art. 12, inciso V, da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, por meio da Resolução nº 542, de 3 de novembro de 2004, e republicada no D.O.U de 22 de dezembro de 2004, torna público que o Diretor Oscar Cordeiro Netto, com base no que consta do Processo nº [REDACTED], e na Delegação que lhe foi conferida na citada Resolução, resolveu:

Art. 1º Outorgar a [REDACTED] CNPJ nº [REDACTED], doravante denominada Outorgada, o direito de uso de recursos hídricos para captação de água do Rio Sapucaí com a finalidade industrial, na propriedade denominada Fazenda [REDACTED], Município de [REDACTED], Estado de São Paulo, com as seguintes características:

Cobrança pelo Uso da Água

Em termos legais a cobrança pelo uso da água começou a ser regulamentada no Código Civil de 1916, bem como no Código de Águas, Decreto-Lei nº 24.642/34, que estabeleceram o uso comum de bens públicos, como o das águas, podendo ser gratuitos ou retribuídos. Posteriormente, a Lei nº 6.938/81 criou a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), a qual inclui a possibilidade de contribuição impositiva, ao usuário, pelo uso de recursos naturais com fins econômicos.

No entanto, somente com a Lei nº 9.433/97 este instrumento foi consolidado e com a criação da ANA, pela Lei nº 9.984/2000, que estabelece sua competência na implementação da cobrança pelo uso dos recursos hídricos, juntamente com os Comitês de Bacia Hidrográfica. É importante salientar a importância da Lei das Águas na medida em que esta reconhece a água como um recurso natural limitado e estabelece o princípio do usuário pagador com a criação da cobrança pelo uso da água.

A cobrança atua como um importante indutor de aumento de eficiência no uso da água, tanto quantitativamente como qualitativamente, ao reconhecê-la como possuidora de valor econômico, e viabiliza o financiamento de outras ações estabelecidas pelos planos de recursos hídricos.

Reúso

A outorga e a cobrança não objetivam o reúso em si, uma vez que este não interfere diretamente no corpo hídrico, porém atua também como indutor da sua adoção, uma vez que a reutilização de águas e efluentes resulta numa significativa redução de captação e lançamento, gerando uma menor cobrança. Vale lembrar que qualquer alteração no processo produtivo deve passar por processo de licenciamento ambiental, bem como as alterações no balanço hídrico devem ser objeto de alteração da outorga existente.

Existem poucas normas que regulamentem as práticas de reúso, dentre elas destaca-se o CNRH que estabelece modalidades, critérios gerais e diretrizes para a prática de reúso direto não potável de água por meio da Resolução nº 54, de 2005.

Aspectos qualitativos

Além dos instrumentos legais supracitados, é preciso salientar a necessidade de se atender a legislação ambiental correspondente principalmente ao que se refere aos aspectos qualitativos de efluentes lançados nos corpos d'água ou em solo, mesmo depois de tratados.

A maioria dos licenciamentos ambientais são feitos no âmbito estadual, no entanto, salienta-se a importância das resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), nesse contexto. Quanto a aspectos qualitativos relacionados ao lançamento de efluentes, destacam-se a Resolução CONAMA nº 357/05, que

classifica os corpos d'água e estabelece condições e padrões de lançamento de

Tabela 64 - Principal legislação no âmbito federal

Tipo	Número	Descrição
Lei Federal	6.938/81	Determina a competência do CONAMA para estabelecer normas, critérios e padrões relativos ao controle e à manutenção da qualidade do meio ambiente com vistas ao uso racional dos recursos naturais.
	9.433/97	Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, disciplinando os principais instrumentos como o plano de bacia, o enquadramento dos corpos de água, a outorga e a cobrança pelo uso das águas e institui penalidades.
	Lei nº 9.984/00	Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas – ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências.
Decreto	24.643/34	Código de Águas. – Dispõe os diversos usos da água, para os diversos fins
	2.612/98	Regulamenta o Conselho Nacional de Recursos Hídricos, e dá outras providências.
	3.942/01	Regulamenta a competência do CONAMA, no estabelecimento de normas, critérios e padrões relativos ao controle e à manutenção da qualidade do meio ambiente com vistas ao uso racional dos recursos ambientais, principalmente os hídricos;
Resolução	CONAMA 01/86	Dispõe sobre a elaboração do Estudo de Impacto Ambiental - EIA e respectivo Relatório de Impacto Ambiental – RIMA. – Determina que tipo de atividade deva possuir EIA.
	CONAMA 357/05	Estabelece a classificação das águas doces, salobras e salinas do território nacional e os padrões de lançamento de efluentes.
	ANA nº 135/02	Estabelece que os pedidos de outorga de direito e de outorga preventiva de uso de recursos hídricos encaminhados à ANA observarão os requisitos e a tramitação previstos nesta Resolução.
	CONAMA nº 396/08	Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas.

efluentes, e a Resolução CONAMA nº 396/08, que estabelece a classificação e diretrizes acerca das atribuições das águas subterrâneas.

Âmbito Estadual

Protocolo Agroambiental

O chamado Protocolo Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro, resultado de um acordo entre o setor sucroenergético paulista e o Estado de São Paulo, é de adesão voluntária e apresenta diretrizes de boas práticas ambientais. Dentre elas, o fim da queima da palha de cana para colheita manual, a proteção de nascentes de água e matas ciliares de corpos d'água que integrem áreas rurais de empreendimentos canavieiros.

O protocolo, que serviu de base para a elaboração do Programa Etanol Verde do Governo do Estado de São Paulo, teve grande adesão por parte dos industriais e aquele que estiver de acordo com o Protocolo recebe um Certificado de Conformidade Agroambiental, que possui validade de 1 ano. Vale lembrar que os

fornecedores independentes de cana-de-açúcar, que representam 25% da produção de cana no Estado, adotaram um protocolo semelhante, visando a adoção de boas práticas e preservação dos corpos d'água.

Zoneamento e Licenciamento Ambiental

A Secretaria Estadual da Agricultura e Abastecimento (SAA) juntamente com a Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SMA) estabeleceram, em 2008 por meio da Resolução Conjunta SMA/SAA nº 04, o Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro no Estado de São Paulo (ZAA).

O ZAA tem como objetivo propiciar a Avaliação Ambiental Estratégica dessa atividade no território do Estado, aprimorar o processo de licenciamento ambiental e de gestão das áreas agricultáveis, promovendo maior eficiência e sustentabilidade do setor. O referido Zoneamento é o resultado da junção de um conjunto de informações presentes em mapas que avaliaram o território sob diferentes perspectivas, como: condições climáticas e de solo para cultivo de cana, declividade de solo agrícola (avalia restrições à mecanização), disponibilidade hídrica e vulnerabilidade de águas subterrâneas, áreas de proteção ambiental, unidades de conservação e respectivas zonas de amortecimento, qualidade do ar, dentre outras. Como resultado desse mapa gerado, estabeleceram-se condições e critérios, que culminaram na criação de quatro tipos de áreas: Áreas Adequadas, Áreas Adequadas com Limitações, Áreas Adequadas com Restrições e Áreas Inadequadas.

A SMA, visando definir condições técnicas para viabilizar o licenciamento ambiental de novos projetos no Estado e expansão dos já existentes, criou a Resolução SMA 88/08, com base na classificação do ZAA. Essa resolução estabelece, por exemplo, a proibição do licenciamento de novos projetos ou expansão daqueles já existentes em áreas classificadas como Inadequadas.

Outras normas aplicáveis, relacionadas à preservação dos recursos hídricos, destaca-se o estabelecimento de consumo máximo de 1 m³ de água para cada tonelada de cana processada (0,7 m³ para áreas consideradas como Adequadas com Restrições), medidas mitigadoras de recuperação com espécies nativas em APPs e a adoção de plano de manejo adequado de defensivos agrícolas.

Além disso, a Resolução SMA 88/08 está bastante alinhada com o Protocolo Agroambiental, o que demonstra que grande parte das indústrias do setor no Estado já ansiavam a adoção das respectivas práticas de forma voluntária.