FERNANDO ALVES DOS SANTOS

Análise da Aplicação da Biomassa da Cana como Fonte de Energia Elétrica: Usina de Açúcar, Etanol e Bioeletricidade

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

São Paulo
2012

FERNANDO ALVES DOS SANTOS

Análise da Aplicação da Biomassa da Cana como Fonte de Energia Elétrica: Usina de Açúcar, Etanol e Bioeletricidade

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração:
Sistemas de Potência

Orientador:
Prof. Dr. Luiz Natal Rossi

São Paulo
2012

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de julho de 2012.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Santos, Fernando Alves dos
Análise da aplicação da biomassa da cana como fonte de energia elétrica: usina de açúcar, etanol e bioeletricidade / F.A. dos Santos. -- ed.rev. -- São Paulo, 2012.
115 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1. Indústria sucroalcooleira 2. Biomassa 3. Cana-de-açucar 4. Cogeração de energia elétrica 5. Energia renovável 6. Vapor I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II. t.

Dedicatória

Dedico este trabalho a Valdir Alves dos Santos e Maria Aparecida da Costa Santos, pais sem igual, e a Flávia da Costa Santos, minha amada irmã.

Agradecimentos

A Deus que está acima de todas as coisas e não cessa de me abençoar.

À minha família que investiu firme na formação do meu caráter.

A Ana Carolina dos Santos pelo apoio diário em todos os momentos.

Ao Prof. Dr. Luiz Natal Rossi pela troca de experiências e orientações claras e objetivas.

Aos colegas da Siemens que contribuem a cada dia para minha formação profissional e contribuíram muito para a conclusão deste trabalho.

Resumo

Apresenta-se neste trabalho a aplicação de turbogeradores instalados em usinas de açúcar e etanol como alternativa eficiente de complementaridade do sistema energético brasileiro e contribuição à utilização de recursos renováveis, além de fazer abordagem aos sistemas de cogeração para este tipo de aplicação.

A biomassa da cana-de-açúcar dispõe de um potencial energético significativo e o trabalho visa abordar os recursos para transformação da energia química contida neste combustível em energias térmica e elétrica, úteis para o processo industrial das usinas de açúcar e etanol. Também são explorados os métodos de dimensionamento das termelétricas a vapor que operam em conjunto com o processo fabril destas indústrias.

Adicionalmente são avaliados métodos para favorecer a eficiência energética dos projetos de cogeração nas indústrias sucroalcooleiras a fim de elevar o potencial de geração de bioeletricidade e contribuir com a rentabilidade global da usina por meio da comercialização desta energia.

Palavras-chave: Indústria Sucroalcooleira, Biomassa da Cana, Vapor, Bioeletricidade, Cogeração, Energia Renovável.

Abstract

This work presents the application of turbine generator sets installed in sugar and ethanol mills as an efficient alternative of complement of the Brazilian power system and contribution to the use of renewable resources, besides to cogeneration systems approach for this kind of application.

The sugar cane biomass has a great energetic potential and the work aims to mention the transformation of the chemical energy contained in this fuel into thermal and electrical energy, useful for the sugar and ethanol industrial process. The design criteria of steam power plant operating together with the process of these industries are also explored.

Additionally methods to improve the efficiency of the cogeneration projects in sugar and ethanol mills to increase the power generation potential are evaluated, contributing to the global profitability of the mill through the commercialization of this energy.

Keywords: Sugar and Ethanol Industry, Sugar Cane Biomass, Steam, Bioelectricity, Cogeneration, Renewable Energy.

Sumário

1. Introdução 1
1.1 Organização da dissertação 2
2. A Contribuição da Biomassa da Cana no Cenário Energético Brasileiro 3
2.1 Considerações iniciais 3
2.2 Aspectos demográficos 4
2.2.1 Crescimento populacional e número de residências 4
2.3 Aspectos Setoriais 6
2.3.1 Atividade industrial 6
2.3.2 Atividade do setor residencial 8
2.4 Autoprodução e cogeração 8
2.5 Projeção do consumo de energia elétrica 9
2.6 Suprimento da demanda 12
2.6.1 Termelétricas a biomassa de cana-de-açúcar como alternativa complementar da matriz energética brasileira 14
3. Geração de Energia a partir da Biomassa da Cana-de-Açúcar 16
3.1 Mercado sucroenergético 16
3.1.1 Histórico e perspectivas 16
3.1.2 Demada de açúcar e etanol 22
3.1.3 Energia elétrica como produto 23
3.2 A biomassa da cana 26
3.2.1 Produção da biomassa no processo industrial 27
3.2.2 Viabilidade de utilização da biomassa 30
3.3 Modelagem do sistema termelétrico 30
3.3.1 Demanda de vapor na usina 30
3.3.2 Geração termelétrica 32
3.4 Sistema de cogeração 35
3.4.1 Suprimento da carga térmica de maneira eficiente 35
3.4.2 Autoprodução e comercialização da energia elétrica excedente 37
3.5 Aspectos ambientais 38
4. Configuração da Usina Termelétrica na Indústria Sucroalcooleira 40
4.1 Caldeira 40
4.1.1 Configuração típica em usinas termelétricas a biomassa 42
4.2 Turbina a vapor 44
4.2.1 Turbina de contrapressão 48
4.2.2 Turbina de condensação 49
4.2.3 Sangria, extração e indução de vapor 50

4.2.4 Configuração típica em usinas sucroenergéticas modernas 51
4.3 Redutor de velocidades 53
4.4 Gerador 55
4.5 Sistema de condensação 57
5. Dimensionamento de uma Termelétrica a Vapor – Metodologia e Viabilidade Econômica 60
5.1 Levantamento da biomassa disponível 60
5.2 Levantamento do potencial de geração de vapor 61
5.3 Seleção das turbinas 64
5.3.1 Cálculo da potência 65
5.3.2 Seleção do tipo de turbina 66
5.4 Levantamento do consumo de energia elétrica e potencial para comercialização 68
5.5 Simulação de implantação de usina termelétrica 69
5.5.1 Premissas do projeto 70
5.5.2 Levantamento da biomassa 71
5.5.3 Demanda de vapor e sobra de biomassa 72
5.5.4 Seleção das turbinas e caldeira 75
5.5.5 Balanço de energia elétrica e retorno do investimento 82
5.5.6 Balanço termelétrico 83
6. Contribuição para o Projeto de Eficiência Energética e Aumento da Produção de Bioeletricidade 85
6.1 Possibilidades de melhoria da eficiência do sistema termelétrico 85
6.2 Aproveitamento da palha 86
6.2.1 Uso em caldeiras e incremento na geração de bioeletricidade 86
6.3 Eletrificação dos acionamentos 89
6.4 Caldeiras de alta pressão e temperatura 93
6.5 Redução do consumo específico de vapor 96
7. Conclusões 98
Referências Bibliográficas 100
ANEXO I 105

Lista de Figuras

Cases

2. 1: Evolução das taxas de natalidade e mortalidade no Brasil, 1970-2005..... 5
2. 2: Projeção da população total residente por região..... 5
2. 3: Projeção do número de domicílios por região..... 6
2. 4: Taxas de crescimento do PIB 7
2. 5: Autoprodução de eletricidade..... 9
2. 6: Projeção relativa ao PDE 2010-2019..... 10
2. 7: Projeção do consumo de eletricidade das grandes cargas industriais 11
2. 8: Projeção do consumo de energia elétrica do SIN 11
2. 9: Evolução do fator de participação das fontes de geração 13
2.10: Expansão das fontes alternativas 2011-2020..... 13
3. 1: Componentes da cana-de-açúcar 17
3. 2: Concentração da produção de cana-de-açúcar no Brasil 18
3. 3: Evolução do processamento de cana-de-açúcar no Brasil 19
3. 4: Evolução da produção de açúcar e etanol no Brasil..... 20
3. 5: Projeção da demanda total de cana-de-açúcar 20
3. 6: Perfil da frota de veículos leves por combustível no Brasil 22
3. 7: Projeção da demanda total de etanol 23
3. 8: Prazo para eliminação da queima da palha da cana no Estado de São Paulo 25
3.9: Processo de moagem da cana e retirada do bagaço..... 28
3.10: Pátio de manejo de bagaço em usina 28
3.11: Colheita mecanizada da cana-de-açúcar 29
3.12: Fluxograma básico de uma usina de açúcar e etanol moderna 31
3.13: Sequência de processos de conversão de energia durante a geração de eletricidade numa central termelétrica a vapor 33
3.14: Esquema simplificado de sistema de potência a vapor..... 34
3.15: Cogeração em turbinas a vapor..... 35
3.16: Circuito térmico na indústria sucroalcooleira antiga 36
3.17: Circuito térmico na indústria sucroenergética moderna..... 36
4. 1: Esquema simplificado de uma caldeira de vapor..... 41
4. 2: Esquema de uma caldeira aquotubular 43
4. 3: Rotor de uma turbina de simples estágio 45
4. 4: Porta-palhetas com palhetamento fixo 46
4. 5: Rotor da turbina multiestágios..... 47
4. 6: Corte de uma turbina a vapor de multiestágios..... 48

4. 7: Esquema simplificado de turbina de contrapressão 49
4. 8: Esquema simplificado de turbina de condensação 50
4. 9: Esquema simplificado de turbina de condensação com extração 52
4.10: Redutor de velocidades 54
4.11: Gerador síncrono 55
4.12: Condensador refrigerado a água tipo casco-tubo 58
4.13: Esquema de um ejetor a vapor 58
4.14: Esquema básico de um sistema de condensação para turbinas a vapor .. 59
5. 1: Produção de biomassa por tonelada de cana processada 60
5. 2: Diagrama de Mollier 62
5. 3: Propriedades do vapor de água superaquecido 63
5. 4: Diagrama de blocos para cálculo de geração de bioeletricidade em indústria sucroalcooleira 76
5. 5: Balanço termelétrico durante o período de safra 83
5. 6: Balanço termelétrico durante o período de entressafra 84
6. 1: Geração de vapor exclusivamente com bagaço de cana 88
6. 2: Geração de vapor com mistura de bagaço e palha cana 88
6. 3: Ganho com a inserção da palha como combustível 88
6. 4: Fluxograma de usina com acionamento mecânico e geração através de turbina com dupla extração 90
6. 5: Turbogerador operando na usina mecanizada 91
6. 6: Turbogerador operando na usina eletrificada 92
6. 7: Fluxo de vapor em usina com acionamento mecânico 93
6. 8: Fluxo de vapor em usina com acionamento elétrico e dedicada à cogeração 94
6. 9: Geração com caldeira de 21bar 94
6.10: Geração com caldeira de 42bar 95
6.11: Geração com caldeira de 65bar 95
6.12: Ganho de geração com substituição da caldeira 96

Lista de Abreviaturas

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CEISE	Centro Nacional das Indústrias do Setor Sucroenergético e Biocombustíveis
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
COGEN	Associação da Indústria de Cogeração de Energia
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IE	Instituto de Engenharia
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PCI	Poder Calorífico Inferior
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PIB	Produto Interno Bruto
PNE	Plano Nacional de Energia
SIN	Sistema Interligado Nacional
SMA	Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo
UNICA	União da Indústria da Cana-de-Açúcar
UHE	Usina Hidrelétrica
UTE	Usina Termelétrica

Capítulo 1

1. Introdução

Face ao crescimento acentuado do consumo de energia no Brasil nos últimos anos, e às previsões para os próximos anos, segundo estudos do Ministério de Minas e Energia (MME) por meio da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), torna-se cada vez mais necessária a busca por fontes alternativas de geração de energia elétrica. Apesar de outras possibilidades de geração, *"sendo o Brasil um país que dispõe de grande potencial de fontes renováveis, estas devem ser consideradas como candidatas prioritárias no plano de expansão"* (PDE 2010-2019). Dentre estas fontes, a energia provinda dos recursos hídricos, eólicos e da biomassa têm ganho destaque por contribuir diretamente para evitar o esgotamento dos recursos naturais e para a redução de emissões de gases de efeitos estufa.

É com esta visão que a biomassa da cana-de-açúcar tem se destacado como uma excelente alternativa de contribuição para a matriz energética brasileira. Devido ao crescimento do mercado sucroalcooleiro brasileiro e à produção cada vez maior de bagaço e palha da cana, as possibilidades de geração de bioeletricidade nestas indústrias e a participação desta biomassa na matriz energética nacional como fonte alternativa têm crescido de forma acentuada.

Por diversos motivos, principalmente aqueles relacionados à preservação do meio ambiente, ao custo de implantação e operação das fontes geradoras de energia e aos aspectos de eficiência energética com a cogeração, estas termelétricas a biomassa da cana já têm sido inseridas no Sistema Interligado Nacional (SIN) por meio de leilões realizados periodicamente para compra de energia elétrica.

Desta forma, o presente trabalho tem como propósito fazer uma análise do sistema termelétrico de geração de energia a partir da biomassa da cana-de-açúcar, seu potencial de cogeração como contribuição aos aspectos de eficiência energética e a capacidade das indústrias de açúcar e etanol de se tornarem autossuficientes energeticamente, além do aumento de ganho financeiro com a comercialização de energia elétrica excedente.

1.1 Organização da dissertação

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- O capítulo 2 apresenta as perspectivas de crescimento do consumo de energia elétrica no país para os próximos anos e as possibilidades de suprimento da demanda, dando destaque às fontes de energia renováveis, sobretudo, o bagaço da cana-de-açúcar. O capítulo apresenta alguns dos principais motivos que justificam a utilização desta biomassa na matriz energética brasileira.
- O capítulo 3 contém um histórico e as perspectivas de crescimento do setor sucroalcooleiro, bem como uma abordagem do sistema termelétrico a vapor neste tipo de indústria. Além disto, mostra a possibilidade de cogeração favorecendo a eficiência energética do processo e tornando a indústria autossuficiente energeticamente. Destaque também é dado aos aspectos de preservação do meio ambiente proporcionados por este tipo de termelétrica.
- O capítulo 4 descreve a configuração de uma usina termelétrica movida a biomassa de cana, detalhando cada um dos seus componentes principais dentre os quais se destacam a caldeira, a turbina, o redutor de velocidades, o gerador síncrono e o sistema de condensação.
- O capítulo 5 estabelece os critérios básicos para dimensionamento de uma usina termelétrica dentro de uma indústria sucroalcooleira. Aborda desde as questões de levantamento de biomassa útil e potencial de geração de vapor, até a capacidade total de geração de bioeletricidade e simulações de rentabilidade com a comercialização de excedentes.
- O capítulo 6 aponta algumas possibilidades de melhoria de eficiência energética nos projetos de cogeração a fim de aumentar o potencial de geração de bioeletricidade e, consequentemente, a rentabilidade da indústria.
- O capítulo 7 apresenta as conclusões obtidas do trabalho.

Capítulo 2

2. A Contribuição da Biomassa da Cana no Cenário Energético Brasileiro

O setor energético brasileiro tem passado por forte reestruturação nos últimos anos, face à crescente demanda por energia elétrica e à busca intensa por recursos alternativos que contribuam para a preservação do meio ambiente, levando em consideração as questões de aquecimento global e esgotamento de recursos naturais.

Este capítulo visa levantar os principais motivos que têm estimulado a demanda por energia elétrica, observar a projeção do consumo para os próximos anos e apresentar as possibilidades encontradas para suprimento desta demanda. Destaque é dado aos recursos renováveis, sobretudo ao bagaço da cana-de-açúcar que tem se mostrado uma excelente alternativa de complementaridade do sistema.

2.1 Considerações iniciais

O Brasil tem apresentado nos últimos anos um acentuado crescimento no consumo de energia elétrica. Os principais motivos que impulsionam a demanda estão relacionados, sobretudo, às questões de crescimento populacional e econômico. São as variações demográficas e macroeconômicas, assim como aquelas relativas à eficiência energética e à autoprodução, que impactam diretamente a dinâmica do consumo de energia. Estas variações podem ser elencadas da seguinte forma:

- Setor residencial – está associado às variáveis demográficas, como a população, o número de domicílios e o número de habitantes por domicílio, e às variáveis relativas à expansão da renda e do PIB. Essas mesmas variáveis também influenciam outros setores de consumo, como é o caso de comércio e serviços.
- Setor industrial – mantém uma relação não só com a economia nacional, mas também com a economia mundial, em função dos segmentos exportadores. A projeção do consumo de energia neste mercado está

associada aos estudos que se referem à expansão, rotas tecnológicas e características de consumo energético.

- Autoprodução – Ela ganha maior relevância na indústria e contribui com a redução do consumo final de energia do SIN, pois não compromete o investimento na expansão do parque de geração.
- Eficiência energética – Contribui de forma significativa para o suprimento da demanda de forma econômica, reduzindo investimentos em maquinários de geração, transmissão e distribuição, favorecendo o setor elétrico e o consumidor final.

Levando em consideração estas premissas, os principais desafios para os tempos atuais neste setor estão em fornecer serviços para o bem-estar de uma população crescente e facilitar o acesso a formas de energia que mitiguem as mudanças climáticas e seus efeitos.

2.2 Aspectos demográficos

Nas últimas décadas o Brasil tem passado por imensas transformações no seu perfil demográfico, não apenas em termos de crescimento populacional, mas também com relação à distribuição territorial, pirâmide etária, rápido processo de urbanização e outros aspectos. Todos estes aspectos de evolução demográfica, por conta dos seus efeitos sociais e econômicos, provocam uma mudança significativa no consumo de energia.

2.2.1 Crescimento populacional e número de residências

São diversos os motivos que ocasionam o crescimento populacional, dentre os quais vale ressaltar o balanço entre os índices de natalidade e mortalidade e a urbanização da população associada às características e cultura do país. A figura 2.1 ilustra as variações das taxas de natalidade e mortalidade desde a década de 70, evidenciando que as campanhas de saúde pública e de vacinação e o avanço da medicina reduziram de maneira significativa as doenças e a mortalidade infantil, o que contribuiu muito para o aumento da população, apesar de a taxa de natalidade permanecer em declínio.

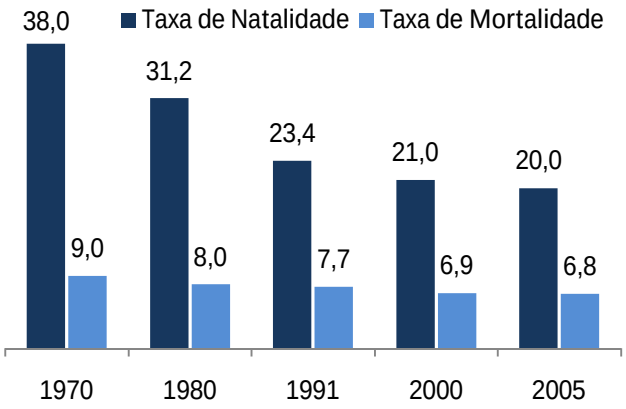


Figura 2. 1: Evolução das taxas de natalidade[1] e mortalidade[2] no Brasil, 1970-2005
Fonte: PNE 2030

Considerando este histórico e segundo pesquisas atuais do IBGE, a população brasileira tende a aumentar com taxa média de 0,7% a.a. até 2019, como se observa na figura 2.2:

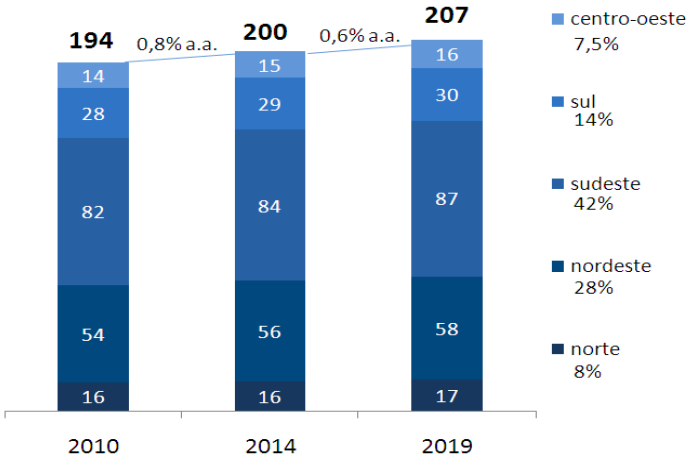


Figura 2. 2: Projeção da população total residente por região (milhões de habitantes)
Fonte: PDE 2010-2019

É evidente que o crescimento da população tende a provocar o aumento do número de residências. Contudo, este segundo valor não é diretamente proporcional ao primeiro. O número de domicílios é estimado pelo Ministério de Minas e Energia por meio da Empresa de Pesquisa Energética com base na relação habitante/domicílio. Segundo análises, espera-se que, no Brasil, este valor atinja 2,8 habitantes por domicílio até 2019, contra 3,2 de 2009. A partir

[1] Relação entre nascidos vivos e o total da população num determinado período (‰)

[2] Relação entre o número de mortos e o total de habitantes do país em determinado período (‰)

desta estimativa se obtém o número previsto de residências e esta informação é fundamental para a projeção do consumo residencial de energia elétrica no período estudado.

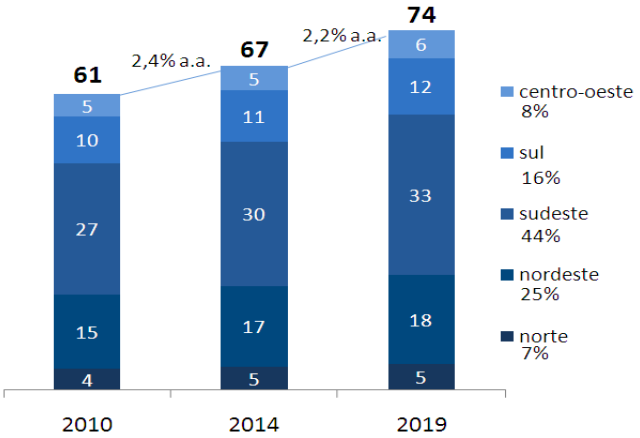


Figura 2. 3: Projeção do número de domicílios por região (milhões)
Fonte: PDE 2010-2019

Segundo apontamento do IBGE, o Brasil atingirá o chamado "crescimento zero" apenas por volta de 2062. A partir deste momento, as taxas de crescimento populacional seriam negativas como as apresentadas por países desenvolvidos que experimentam uma transição demográfica. Dessa forma, até 2062, o Brasil ainda apresentará um potencial de crescimento populacional, fruto do balanço entre os nascimentos e os óbitos ocorridos no país e com percentuais de crescimento anual acima da média mundial.

2.3 Aspectos Setoriais

2.3.1 Atividade industrial

Observando as tendências de crescimento econômico, é de se esperar que a população mundial venha gradativamente a ter melhor condição de vida, com melhores rendas per capita e conseqüente melhoria no poder aquisitivo com acesso a aparelhos e equipamentos que demandarão maior suprimento de energia elétrica. Entretanto, o grande fator impactante para o crescimento da demanda por energia elétrica é o crescimento da produção industrial.

Um dos principais fatores utilizados para aferir o crescimento econômico de um país é o incremento do PIB (Produto Interno Bruto). Ele é a soma de todos os bens e serviços finais produzidos no país, a ser estimado em um dado período de tempo. O aumento do PIB retrata intuitivamente um crescimento e/ou sustentabilidade da capacidade produtiva do país, com mais fábricas, mais empregos e, consequentemente, maior necessidade de geração de energia.

No Brasil, com a significativa expansão da atividade econômica já observada durante os últimos anos e com o sucesso de recuperação após a crise econômica que afetou o mundo inteiro em 2008, há uma percepção comum entre analistas de que um novo ciclo de crescimento forte e sustentado da economia esteja se consolidando para os anos vindouros. Esta expectativa de desempenho está em consonância com demais países emergentes mais dinâmicos, superando a média mundial para os próximos 10 anos.

Segundo estudos da EPE, esta trajetória de crescimento está baseada na expectativa de que alguns setores em que o Brasil possui vantagens competitivas serão afetados positivamente como é o caso da celulose, agropecuária, siderurgia e extração de minério. Setores estes que tem seu crescimento favorecido pelas demandas dos países emergentes mais dinâmicos. Adicionalmente, a manutenção e eventual expansão do investimento em infraestrutura e no setor habitacional contribuirão para um desempenho melhor no setor da construção civil, refletindo a melhoria nas condições de crédito de longo prazo e em programas governamentais de incentivos a estes segmentos.

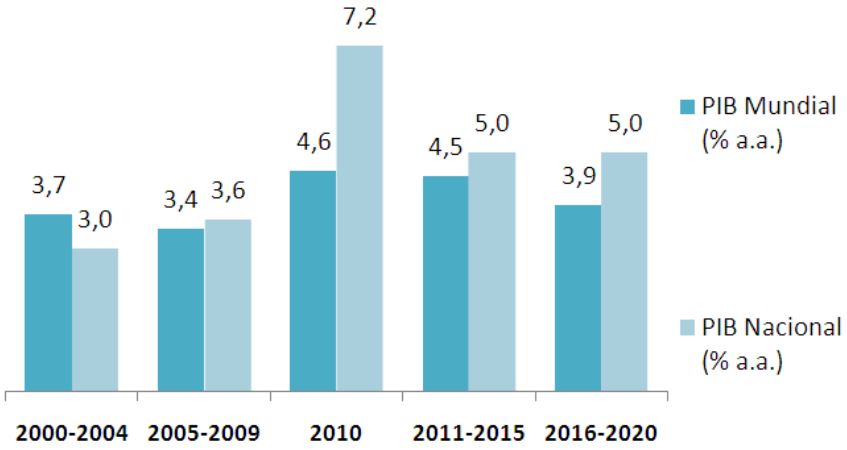


Figura 2. 4: Taxas de crescimento do PIB (média no período)
Fonte: PDE 2020

No entanto, apesar do crescimento apresentado, a economia brasileira ainda está sendo impulsionada pelo consumo. Isto não é positivo tendo em vista que o ideal é que o crescimento econômico seja motivado pelo investimento em infraestrutura para que o país esteja preparado para atender o aumento do consumo. Isto significa que o crescimento econômico brasileiro, apesar de ser expressivo, está ainda limitado pela infraestrutura incompatível com sua capacidade de expansão econômica. Cabe ressaltar que a energia elétrica é um dos itens mais importantes na infraestrutura de um país industrializado.

2.3.2 Atividade do setor residencial

A evolução do consumo no setor residencial está relacionada ao número de domicílios e à posse de equipamentos, que é induzida pelo aumento da renda per capita. Apesar de as estimativas apontarem para um maior número destes equipamentos nas residências brasileiras, tem-se em consideração também que, ao final de sua vida útil, estes equipamentos serão substituídos por outros mais eficientes. Ou seja, o volume se expande, mas de forma eficiente, com um consumo unitário inferior.

Por sua vez, a expansão do número de domicílios deve levar em consideração a projeção de crescimento ilustrada na figura 2.3.

2.4 Autoprodução e cogeração

Segundo a ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), apenas 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do país encontra-se fora do SIN (Sistema Interligado Nacional), em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica. Tendo em vista que quase todo o abastecimento de energia elétrica do país está conectado ao SIN, para projeção do consumo de eletricidade, além das análises das premissas demográficas e setoriais, também é de extrema importância a avaliação do potencial para autoprodução das indústrias, em especial os projetos de cogeração, cuja parcela do consumo total de eletricidade não compromete o investimento na expansão do parque de geração e de transmissão do sistema elétrico brasileiro.

Autoprodução é caracterizada pela produção de energia elétrica dentro das instalações de determinado consumidor, seja uma residência, uma indústria ou estabelecimento comercial, por exemplo. Em muitos casos, é possível obter a autossuficiência energética que contribui com a redução do consumo final de energia da rede, ou seja, do próprio SIN.

Cogeração é o processo de produção combinada de calor útil e energia mecânica ou elétrica a partir da energia química disponibilizada por determinado combustível como a biomassa da cana, cavacos de madeira, combustíveis líquidos, etc. É o caso, por exemplo, das indústrias de papel e celulose cuja expansão da capacidade fabril deverá ser integralmente suprida por cogeração segundo o PDE 2019. O mesmo ocorre com grandes consumidores industriais do setor petroquímico e siderúrgico. Já em algumas indústrias sucroalcooleiras e alimentícias as instalações são totalmente alimentadas por autoprodução, fruto da cogeração.

Estes projetos de cogeração, além de possibilitarem a autoprodução, tendem a favorecer a eficiência energética dos grandes consumidores, com

aproveitamento de resíduos industriais e esgotamento energético das fontes térmicas para geração de energia elétrica. O benefício favorece tanto ao sistema gerador, que poupa com investimentos em sistema de geração, transmissão e distribuição, quanto ao consumidor final que detém o controle da geração de energia e a obtém de forma mais econômica.

A figura a seguir ilustra a expectativa de crescimento da autoprodução no Brasil no período de 2010 a 2019.

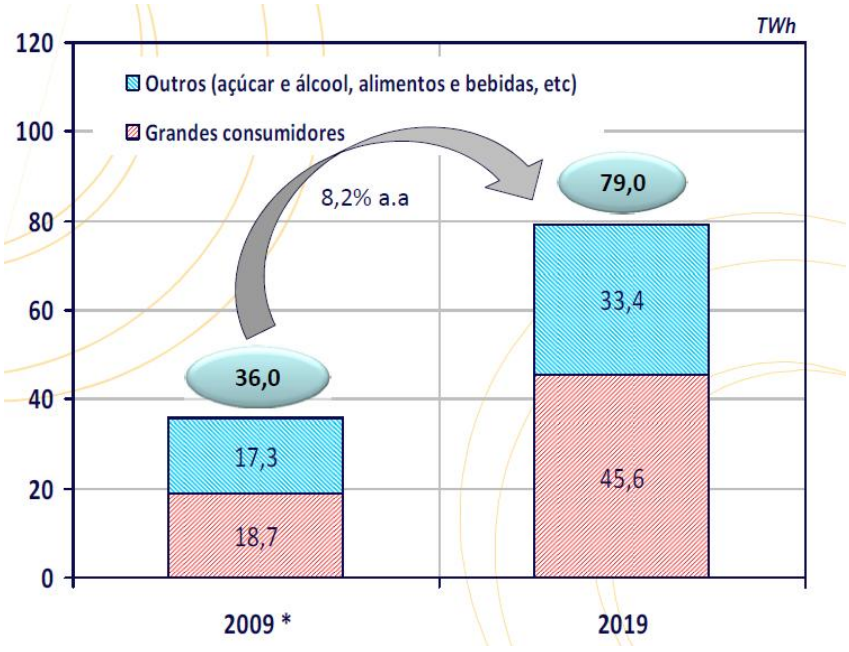


Figura 2. 5: Autoprodução de eletricidade (TWh – ano)
Fonte: PDE 2010-2019

2.5 Projeção do consumo de energia elétrica

Obviamente, tendo em vista os altos índices previstos de crescimento populacional e econômico, o consumo de energia elétrica também tende a crescer em taxas significativas. A energia elétrica ainda é o serviço básico de maior abrangência no país. Segundo o IBGE, 97% dos domicílios têm acesso a esse serviço. Quando se trata, por exemplo, de esgotamento sanitário, serviço de extrema importância, já que exerce influência direta sobre a saúde humana, a abrangência é de 70% da população. Historicamente, está comprovado que o consumo de energia no Brasil tem crescido significativamente, mas principalmente devido ao aumento do consumo do setor industrial.

Contudo, algumas previsões realizadas no início de 2008 foram revistas em função da desaceleração verificada nas economias nacional e internacional, reflexo da crise financeira. Isto afetou diretamente o mercado de energia elétrica devido à variação no nível de utilização da capacidade instalada e nas perspectivas de expansão da produção de alguns segmentos industriais

voltados para a exportação de *commodities*, como é o caso, por exemplo, dos setores siderúrgicos e de metalurgia. Conseqüentemente, projetos de expansão industrial, elaborados antes da crise, foram revistos e alguns postergados. Tal ocorrência provocou seus efeitos na projeção de consumo de energia elétrica no Brasil para os próximos anos, em relação aos valores previstos no PDE 2008-2017. Mas, embora os valores tenham sido revistos, a recuperação do mercado brasileiro foi tão intensa que as previsões anteriores não divergem muito das atuais, com uma diferença total de 1.815 $MW_{médio}$ em 2017.

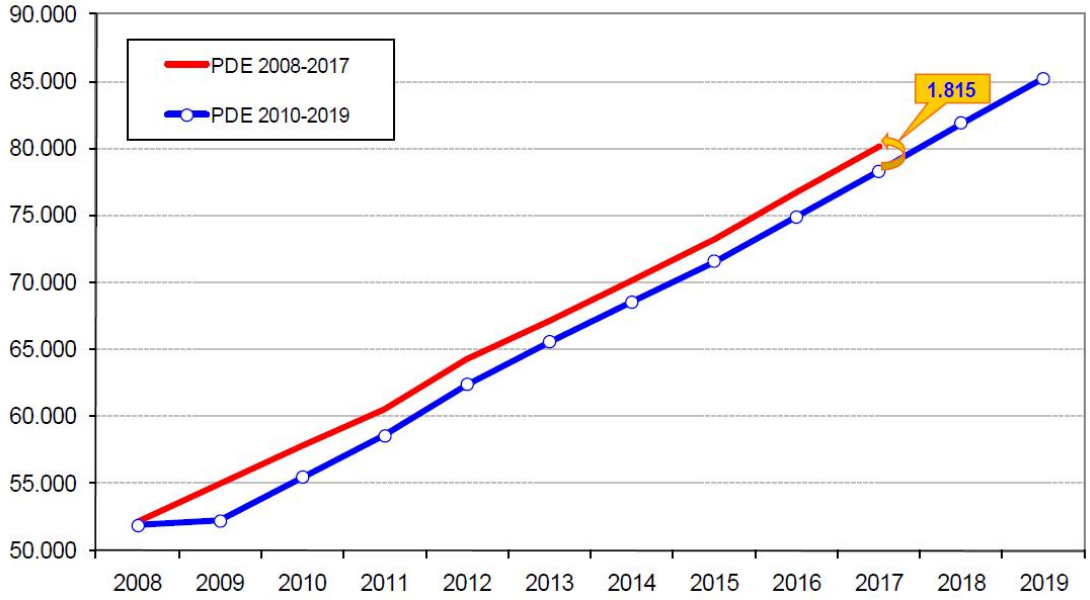


Figura 2. 6: Projeção relativa ao PDE 2010-2019 ($MW_{médio}$ – ano)
Fonte: PDE 2010-2019

A seguir são apresentadas as projeções dos consumos de energia elétrica dos grandes consumidores industriais e de todo SIN, respectivamente, segundo as projeções da EPE.

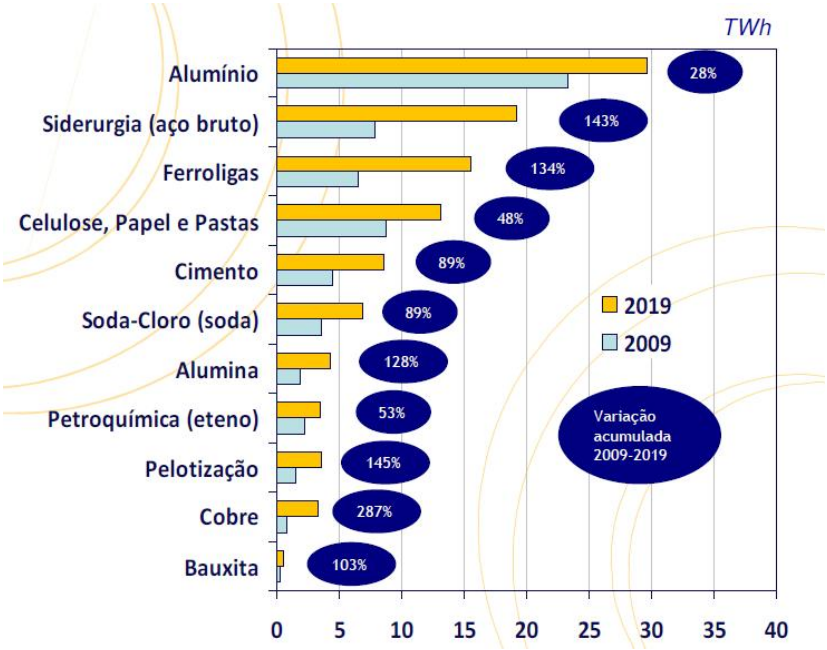


Figura 2. 7: Projeção do consumo de eletricidade das grandes cargas industriais (TWh)
Fonte: PDE 2010-2019

Classe	2009	2010	2019	Variação (% ao ano)	
				2009-2010	2010-2019
Residencial	100,3	105,5	156,5	5,3	4,5
Industrial	166,5	182,3	274,8	9,5	4,7
Comercial	65,0	69,2	118,4	6,6	6,1
Outras	56,3	58,8	83,3	4,4	4,0
Total	388,0	415,9	633,0	7,2	4,8

Figura 2. 8: Projeção do consumo de energia elétrica do SIN (total em TWh - ano)
Fonte: PDE 2010-2019

Esta projeção de consumo de energia elétrica é um indicador fundamental para o dimensionamento do parque nacional de geração e do sistema de transmissão associado. É a partir desta projeção que se iniciam os estudos de investimento na matriz energética e a análise dos recursos energéticos disponíveis.

2.6 Suprimento da demanda

De posse das projeções de consumo por regiões e subsistemas no território nacional, iniciam-se os estudos de incentivo de investimentos nos variados meios de geração a fim de se obter a expansão da oferta para suprimento da crescente demanda. Em síntese, espera-se um incremento anual de carga da ordem de 3,3 $GW_{médio}$ até 2019, já considerando os ganhos de eficiência energética e a participação da autoprodução.

No Brasil as possibilidades são diversas quanto aos recursos para geração de energia elétrica, sendo as principais:

- Hídrica;
- Nuclear;
- Térmica através dos combustíveis derivados de petróleo, gás natural, carvão mineral e outros;
- Térmica com fontes renováveis (biomassa da cana no processo de cogeração e outras biomassas como as agrícolas, industriais e urbanas);
- Eólica;
- Outras fontes (como energia solar e energia do mar, por exemplo).

Apesar das diversas possibilidades, *"sendo o Brasil um país que dispõe de grande potencial de fontes renováveis, estas devem ser consideradas como candidatas prioritárias no plano de expansão"* (PDE 2010-2019). A figura 2.9 mostra que as fontes de energia renováveis permanecerão predominantes durante a evolução da participação das fontes de geração segundo as projeções até 2019. Já a figura 2.10 ilustra a participação das fontes alternativas renováveis no suprimento da crescente demanda, além de evidenciar as perspectivas de investimentos nestas fontes para os próximos anos. Consideram-se fontes alternativas aquelas que complementam a fonte hídrica. São as termelétricas a biomassa, as usinas eólicas e as pequenas centrais hidrelétricas (PCH's). As PCH's, embora sejam fonte hídrica, são consideradas à parte em relação às grandes hidrelétricas (UHE's) pois produzem menor impacto ambiental. Segundo a Resolução n° 394 da ANEEL, as PCH's devem ter potência superior a 1MW e igual ou inferior a 30MW, com área total de reservatório igual ou inferior a $3km^2$.

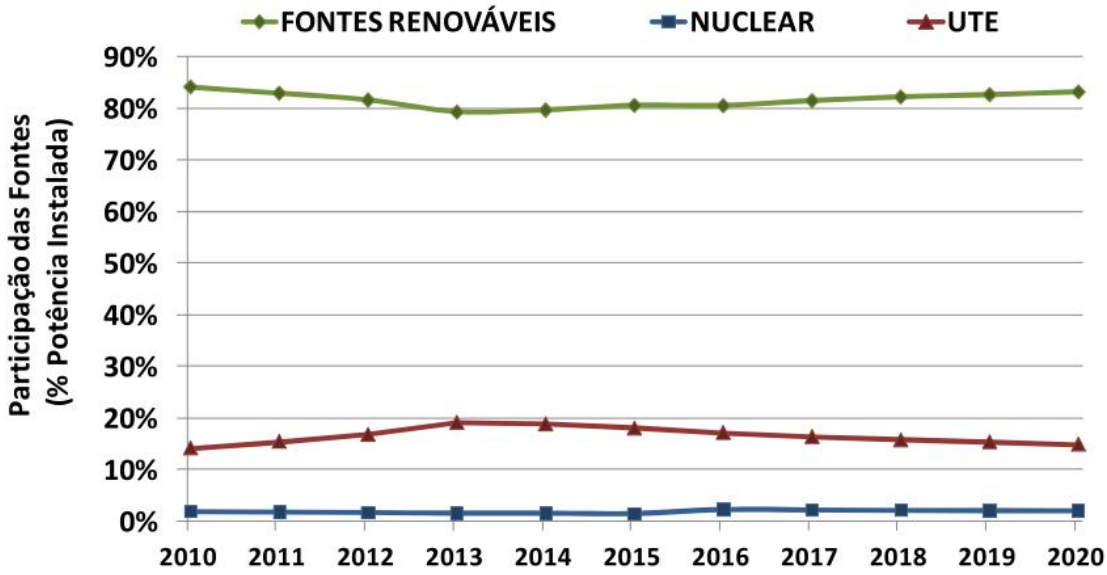
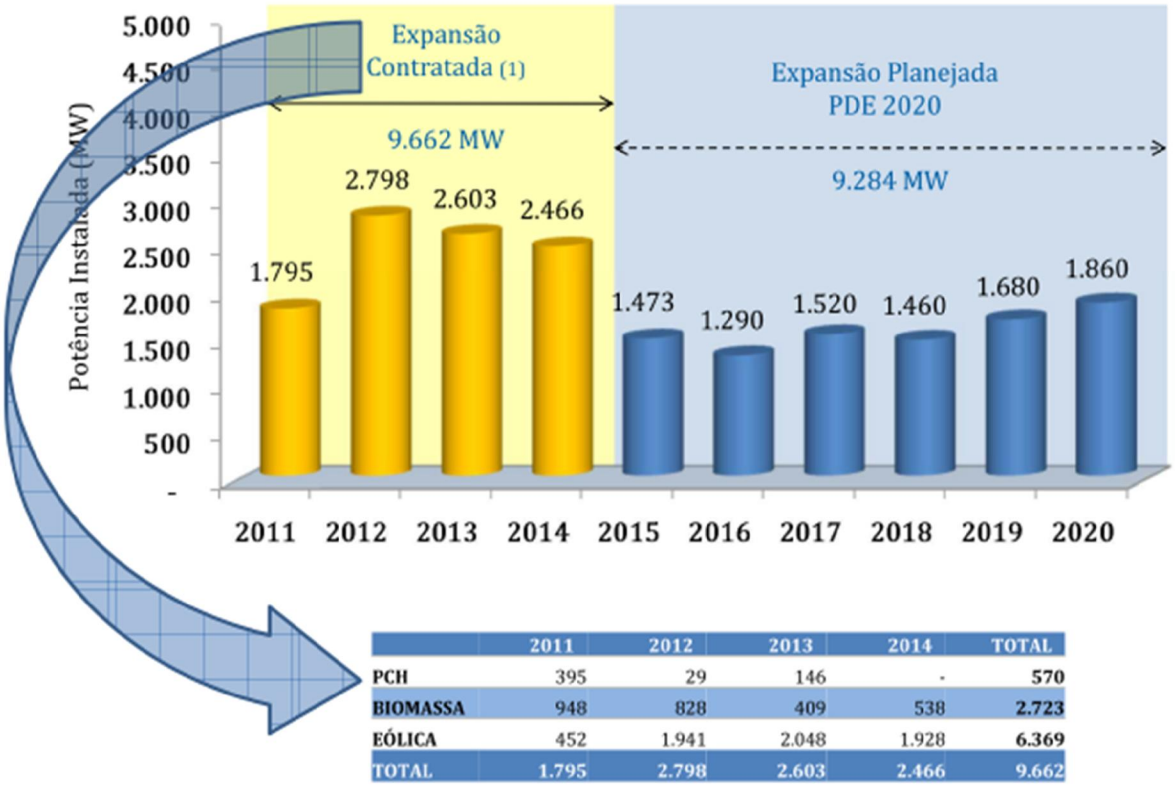


Figura 2. 9: Evolução do fator de participação das fontes de geração
Fonte: PDE 2020



	2011	2012	2013	2014	TOTAL
PCH	395	29	146	-	570
BIOMASSA	948	828	409	538	2.723
EÓLICA	452	1.941	2.048	1.928	6.369
TOTAL	1.795	2.798	2.603	2.466	9.662

Figura 2.10: Expansão das fontes alternativas 2011-2020 (acréscimo de potência instalada [MW])
Fonte: PDE 2020

Dentre os recursos renováveis cabe salientar que a participação das hidrelétricas na matriz nacional, apesar de predominante, tem diminuído em relação às outras fontes devido aos impactos ambientais de grande proporção

e às dificuldades para se obter uma licença para construção. Por exemplo, para participar dos leilões de energia, o concorrente deve obter uma licença ambiental prévia a fim de que não ocorra a contratação de uma usina que correrá o risco de não ser construída por não possuir a licença. Isto também tem proporcionado uma participação maior das termelétricas a biomassa na matriz já que as licenças ambientais são mais fáceis de se obter, tendo em vista que os impactos são menores, mesmo levando em consideração a emissão de poluentes. Maiores detalhes sobre os impactos ambientais das termelétricas a biomassa da cana-de-açúcar serão abordados no capítulo 3.

Além disso, apesar de se ter recursos hídricos abundantes, investimentos em outras fontes alternativas são extremamente necessários para mitigar a dependência e o risco de conseqüências similares às de 2001, onde a oferta foi ameaçada pela falta de chuva, causando queda no nível dos reservatórios e provocando o racionamento de energia em todo país.

Os recursos eólicos tem se mostrado atualmente como uma boa alternativa de complementaridade do sistema devido os recursos de vento observados em algumas regiões do país, sobretudo no Sul, Sudeste e Nordeste. O Nordeste apresenta as melhores condições para aproveitamento da energia eólica, não somente pelo regime dos ventos, mas também pela possibilidade de complemento do sistema hídrico, pois em períodos de menor vazão dos rios que atendem algumas regiões do Nordeste é quando ocorrem as melhores incidências de vento, segundo apontam estudo do MME no PNE 2030. Entretanto, há a constante necessidade de levantamento e atualização das informações sobre os ventos, de forma a favorecer os novos projetos. Dada a extensão territorial do país, estes estudos demandam tempo e investimentos consideráveis.

Entre as termelétricas a biomassa, por sua vez, o bagaço e palha da cana-de-açúcar têm sido alvos de exploração intensa no planejamento energético e pelos produtores de açúcar e etanol. Devido o crescimento do mercado sucroalcooleiro brasileiro e a produção cada vez maior de bagaço e palha da cana, as possibilidades de geração de bioeletricidade nestas indústrias e a participação desta biomassa na matriz energética nacional como fonte alternativa têm crescido de forma acentuada.

2.6.1 Termelétricas a biomassa de cana-de-açúcar como alternativa complementar da matriz energética brasileira

O destaque que vem ganhando a biomassa da cana-de-açúcar no planejamento de expansão do parque de geração é induzido por diversos motivos como os apontados a seguir:

- A cana-de-açúcar compõe a cultura agrícola do país.
- Poluição ambiental relativamente pequena;
- Aproveitamento dos resíduos do processo de fabricação de açúcar e etanol (bagaço e palha) como combustível, auxiliando no desempenho econômico destas indústrias, já que o combustível para geração de energia é gratuito;
- Aumento de eficiência energética das plantas com sistema de cogeração;
- Contribuição na autoprodução de energia elétrica nas usinas;
- Contribuição como gerador de energia para o sistema elétrico nacional, tendo em vista o excedente de energia gerada nestas plantas;
- Custos de implantação menores em comparação com outras fontes de energia;
- Conceito de geração distribuída, em que a produção de energia é realizada próximo ao centro de consumo, poupando investimentos em linhas de transmissão e distribuição;
- Grande parte das usinas do país está localizada próxima à região de maior consumo (Sudeste).

Por estes motivos o país não tem apenas considerado as usinas termelétricas a biomassa da cana no planejamento de expansão, mas já as tem inserido no sistema elétrico através dos leilões de energia que são realizados periodicamente para compra de energia elétrica. Isto promove a participação destas usinas no SIN e as tornam integrantes ativas e fundamentais na matriz energética nacional. O capítulo seguinte apresenta maiores detalhes do sistema de geração de bioeletricidade através da biomassa da cana-de-açúcar e também aborda os meios de comercialização desta energia.

Capítulo 3

3. Geração de Energia a partir da Biomassa da Cana-de-Açúcar

3.1 Mercado sucroenergético

O setor sucroalcooleiro do Brasil é um dos mais competitivos do mundo. A cana-de-açúcar apresenta, em termos energéticos, claras vantagens competitivas na comparação com outras culturas (beterraba e grãos, por exemplo), quando se trata de extrair açúcar e etanol. Devido aos elevados preços do petróleo e à preocupação com o meio ambiente, o álcool combustível tem se tornado cada vez mais importante e ponto de referência como energia renovável. O açúcar, por sua vez, a cada ano se posiciona melhor na balança das exportações brasileiras. Além disso, da biomassa da cana-de-açúcar pode-se produzir energia térmica e elétrica de forma ambientalmente sustentável e com baixos níveis de emissão de gases de efeito estufa. Devido a esta possibilidade de geração o setor tem adotado o termo *sucroenergético*, ao se referir às indústrias que, além da produção de açúcar e etanol, se dedicam à geração de bioeletricidade.

3.1.1 Histórico e perspectivas

A cana-de-açúcar é a cultura agrícola mais antiga do Brasil. Desde a época da colonização portuguesa as terras brasileiras são cultivadas para o plantio da cana. Naquela época, o açúcar tinha um valor imenso em relação a outros produtos, podendo ter seu valor comparado até mesmo ao ouro, pois na Europa, principalmente por questões climáticas, o cultivo da cana e a produção de açúcar eram muito limitados. Graças ao domínio da tecnologia naval, os portugueses se aventuraram nas grandes navegações em busca de terras. Um dos propósitos era plantar cana e foi no Brasil que Portugal começou o “Ciclo da Cana-de-Açúcar”, primeiro ciclo econômico brasileiro [UNICA, Ciclo Econômico da Cana-de-Açúcar, 2011].

Hoje, mais de 500 anos após o início do cultivo da cana no país, sua importância tem sido elevada a um alto patamar em todo o mundo devido ao

seu grande potencial energético. Atualmente o Brasil é o maior produtor de cana do planeta, seguido por Índia, Tailândia e Austrália.

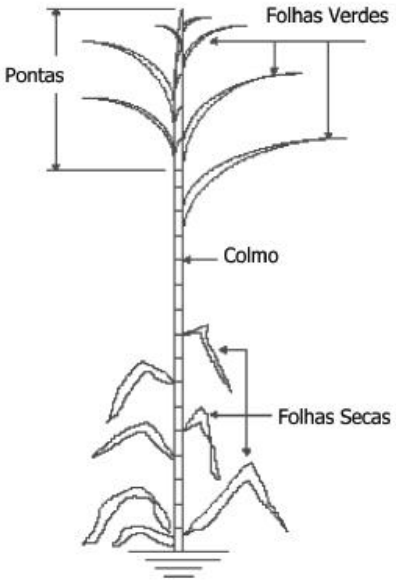


Figura 3. 1: Componentes da cana-de-açúcar
Fonte: PNE 2030

A cana-de-açúcar, durante o seu processamento no campo e indústria, pode ser dividida basicamente em três partes: caldo, bagaço e palha (pontas e folhas). Cada uma destas partes representa aproximadamente um terço do potencial energético da planta.

No processo de moagem o caldo é extraído do colmo em diversos módulos de moenda chamados ternos. Este caldo é coletado para fabricação de açúcar ou etanol e ao final da moagem sobra o bagaço que pode ser utilizado como combustível em caldeiras que geram vapor para o processo fabril (acionamentos mecânicos, cozimento, destilarias, evaporadores, etc.) e também para geração de energia elétrica. A palha da cana também pode ser aproveitada para queima nas caldeiras.

A planta pode ser cultivada em todo do território nacional. Contudo, as áreas de maior cultivo, sobretudo por questões climáticas, são as regiões Centro-Sul e Nordeste, sendo o primeiro detentor de 89% de toda produção nacional. O Estado de São Paulo é responsável por aproximadamente 60% deste montante, seguido de Paraná e Minas Gerais com participação em torno de 8% e 7%, respectivamente.

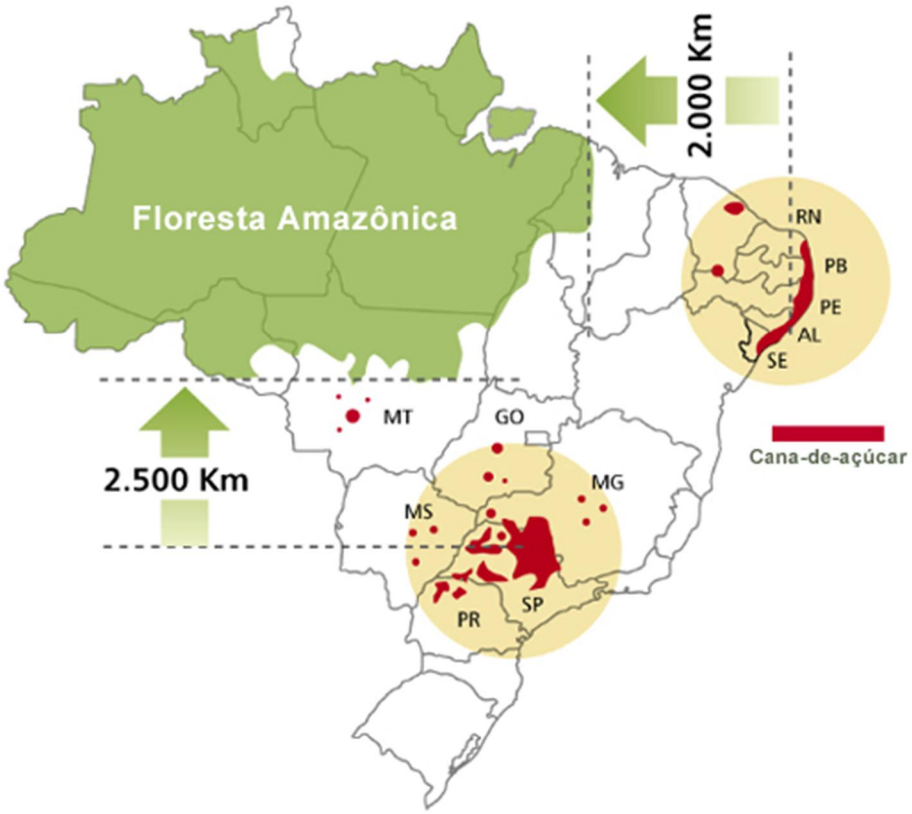


Figura 3. 2: Concentração da produção de cana-de-açúcar no Brasil
Fonte: UNICA

O fato de São Paulo concentrar a maioria das lavouras desta cultura apresenta duas vantagens imediatas:

- Proximidade com os maiores centros de consumo de açúcar, etanol e energia elétrica do país.
- Distante cerca de 2.500km da floresta amazônica, afastando a preocupação de muitos ambientalistas em relação ao desflorestamento daquela região.

Uma revolução deste mercado no país teve início nos anos 70 com a crise mundial do petróleo e a necessidade de produção do álcool combustível ou etanol. Nesta época, o governo brasileiro criou o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), que diversificou a atuação da indústria açucareira com grandes investimentos apoiados pelo Banco Mundial, possibilitando a ampliação da área plantada com cana-de-açúcar e a implantação de destilarias de etanol. Isto estimulou a produção de veículos movidos a etanol no país. Mas foi a partir de 2003, com o lançamento do carro “flex fuel” (tecnologia que possibilita a operação do motor com etanol, gasolina ou a mistura dos dois combustíveis em qualquer proporção), que se deu início a um novo e forte ciclo de

crescimento do setor. Além disso, o aumento da preocupação com o preço e disponibilidade dos combustíveis fósseis e, principalmente, as iniciativas de proteção ao meio ambiente têm tornado o etanol uma excelente alternativa para o Brasil e o mundo, sendo ele um combustível renovável, economicamente mais atrativo e com menores emissões de gases de efeito estufa em comparação com a gasolina.

Segundo a UNICA o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo responsável por aproximadamente 35% de toda produção.

Os gráficos a seguir ilustram o crescimento do processamento da cana e consequente produção de açúcar e etanol no Brasil nos últimos anos.

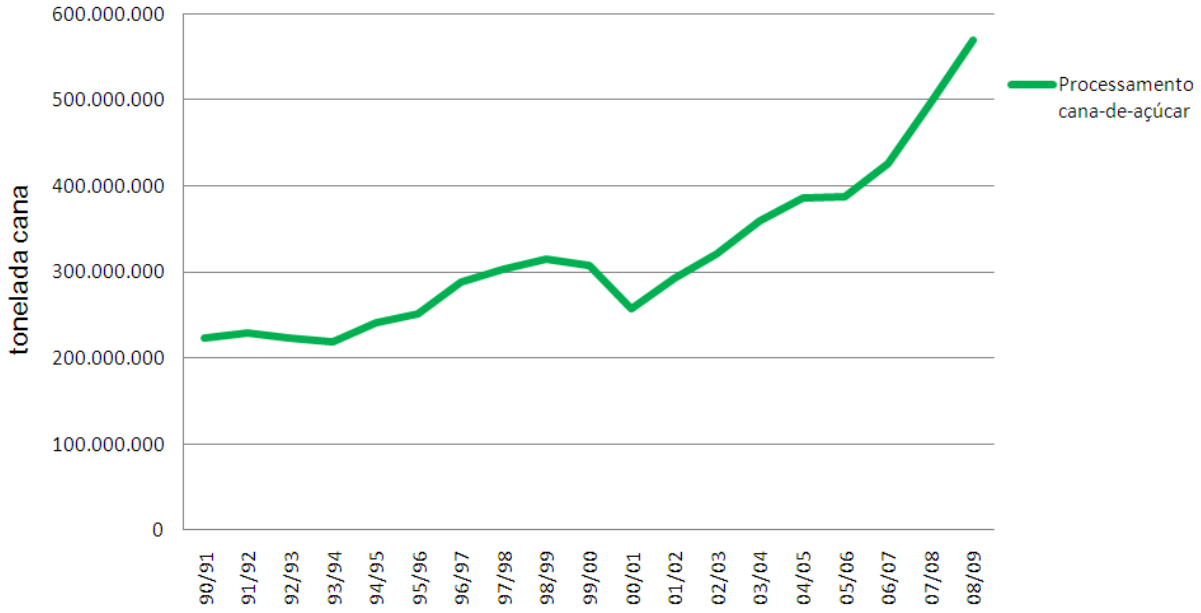


Figura 3. 3: Evolução do processamento de cana-de-açúcar no Brasil
Fonte: UNICA

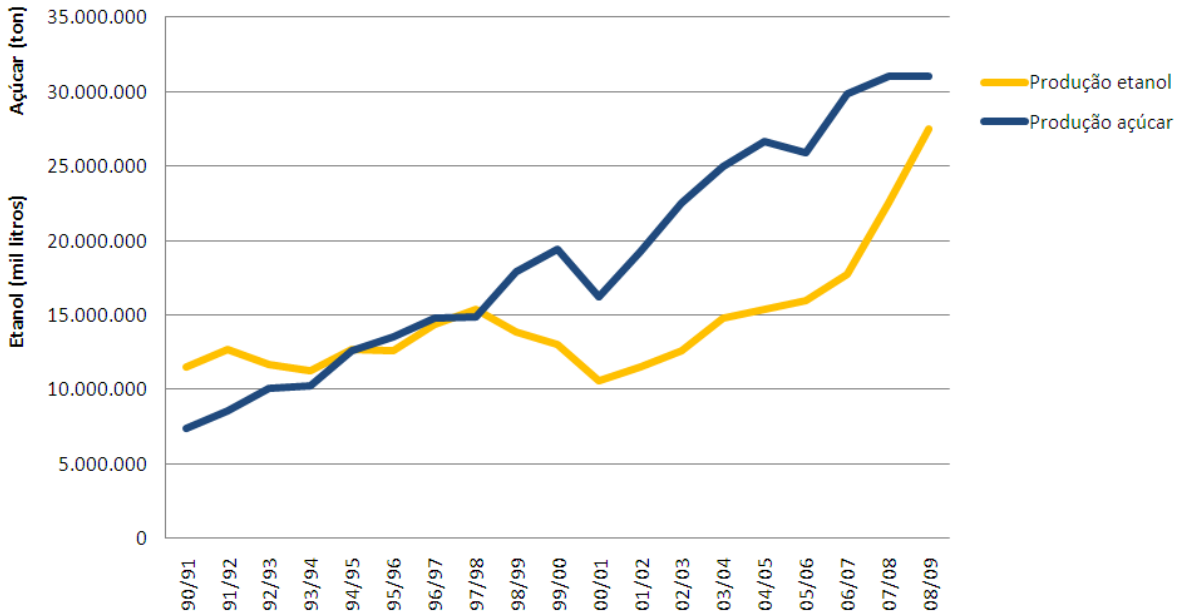


Figura 3. 4: Evolução da produção de açúcar e etanol no Brasil
Fonte: UNICA

Segundo as projeções da EPE [MME – PDE 2020; 2011], as perspectivas em relação ao crescimento da produção de cana-de-açúcar continuam ascendentes para os próximos anos. Sobretudo para produção do etanol onde suas vantagens frente à gasolina para abastecimento dos veículos automotores vêm cada vez mais se consolidando.

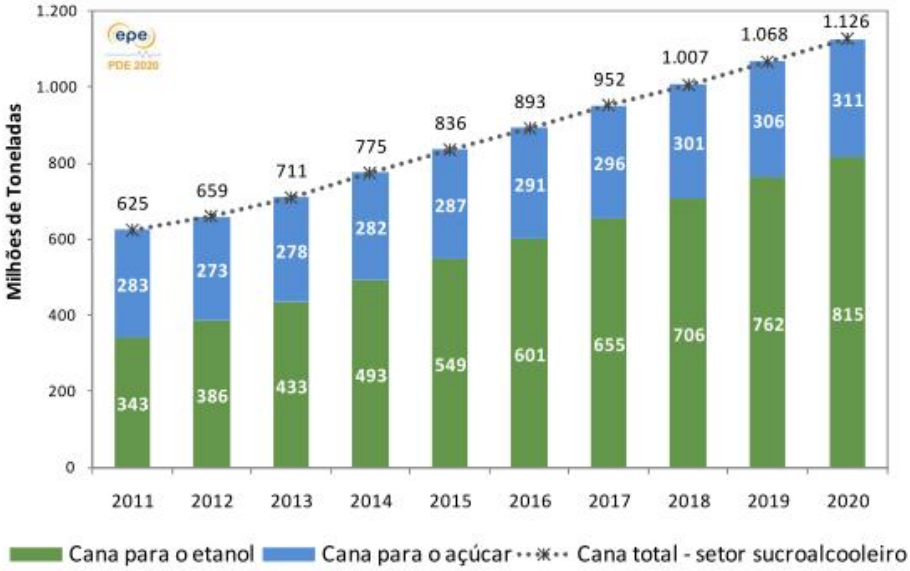


Figura 3. 5: Projeção da demanda total de cana-de-açúcar
Fonte: PDE 2020

Para ilustrar esta tendência, segundo dados do Etanol Verde (site mantido pela UNICA para apresentar os benefícios do etanol brasileiro –

www.etanolverde.com.br), quase 90% dos veículos novos fabricados no Brasil possuem tecnologia “flex fuel”.

Principais vantagens do etanol combustível em relação à gasolina:

- Preço mais atrativo quando limitado a aproximadamente 70% do valor da gasolina, mesmo com um conteúdo energético menor;
- O combustível é proveniente de uma fonte renovável;
- Durante o ciclo de produção e consumo do combustível, que se inicia com o plantio da cana e termina com os gases que saem do escapamento dos carros, são absorvidos cerca de 90% dos gases de efeito estufa correspondentes. A própria lavoura absorve grande parte dos gases emitidos como uma “esponja” natural.

O etanol brasileiro proveniente da cana-de-açúcar, também apresenta vantagens em comparação com a produção de etanol de milho nos Estados Unidos. Segundo Goldemberg (2008):

> [...] com o correr do tempo ficaram claras as vantagens do uso de cana para a produção de etanol em comparação com o uso do milho como matéria prima, o que é feito em grande escala nos Estados Unidos. Na produção de álcool do milho nos Estados Unidos as usinas ‘importam’ energia (quase toda ela produzida com carvão) para o processo industrial. No Brasil toda a energia necessária vem do bagaço, que até gera excedentes de eletricidade que são “exportados” para a rede elétrica. O que isso significa é que, ao usar milho para produzir etanol, o que se faz é converter carvão em etanol. Já no Brasil, o que ocorre é que a luz solar é capturada pela cana-de-açúcar e convertida em álcool. Em outras palavras, o etanol brasileiro é renovável, enquanto o etanol do milho não o é. O significado deste fato para a redução das emissões de gases do efeito estufa é muito grande.

Além disso, estudos contidos no livro “Etanol e Bioeletricidade: a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética” [SOUZA E MACEDO, 2010] mostram o impacto desta redução de emissão de gases de efeito estufa nas grandes metrópoles, sobretudo na saúde das pessoas com milhares de internações hospitalares e centenas de mortes evitadas por ano.

O consumo de açúcar, por sua vez, está diretamente associado ao crescimento da população, elevação do poder aquisitivo e aumento das exportações.

3.1.2 Demada de açúcar e etanol

As oportunidades de crescimento deste segmento da economia são enormes. O gigantesco mercado do álcool combustível tende a crescer cada vez mais com expansão da frota de veículo “flex fuel” e preocupação intensa com o meio ambiente no Brasil e no mundo.

A figura 3.6 ilustra o perfil da frota de veículos leves por combustível no Brasil onde, segundo projeções da Empresa de Pesquisa Energética, em 2019 os veículos “flex fuel” corresponderão a aproximadamente 78% de toda frota nacional contra 37% apresentado em 2009.

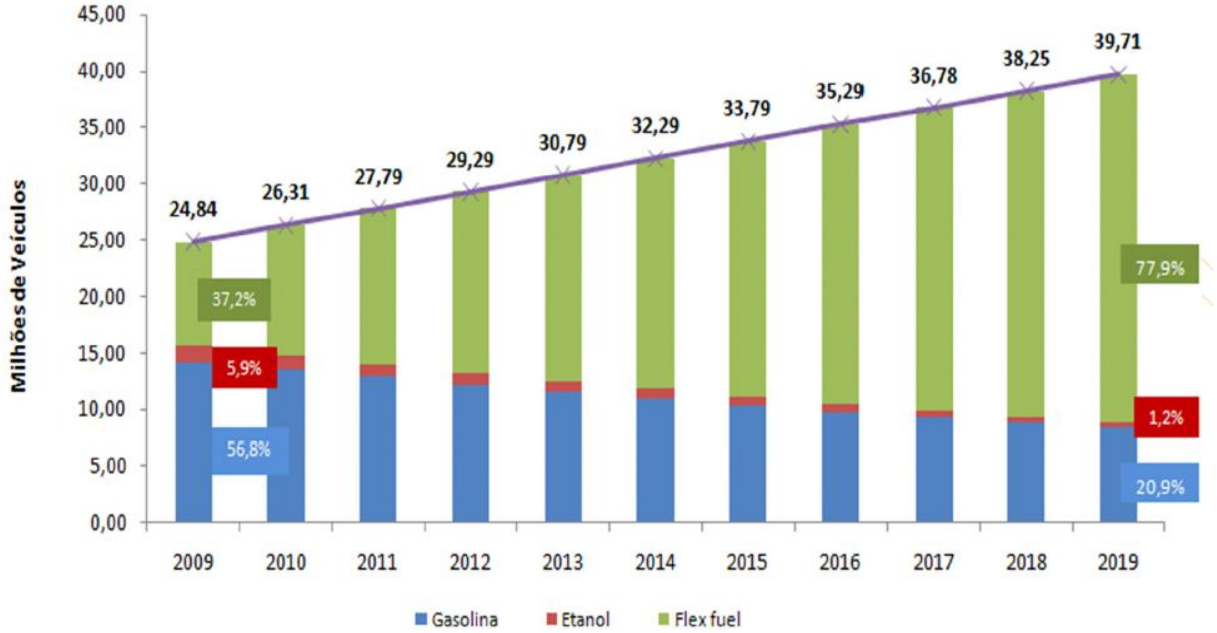


Figura 3. 6: Perfil da frota de veículos leves por combustível no Brasil
Fonte: PDE 2010-2019

Com mais de 30% da produção mundial, o Brasil é o segundo maior produtor de etanol do planeta, atrás somente dos Estados Unidos. Entretanto, o Brasil é o maior exportador de etanol do mundo, apesar do mercado interno consumir mais de 80% de produção, segundo dados da UNICA.

Naturalmente, para suprir esta demanda deverá haver uma correspondente oferta do combustível que, segundo as mesmas projeções, devem chegar a um crescimento de 130% em 2019 em relação aos valores obtidos em 2009. Isto demanda investimentos em todas as áreas do setor, desde a expansão das lavouras e de capacidade de processamento da cana até a busca por eficiência energética e produção de forma cada vez mais competitiva.

A figura 3.7 consolida a projeção das demandas nacional e de exportação de etanol para os próximos anos, utilizada para avaliação da capacidade de atendimento pelo setor produtivo brasileiro [MME – PDE 2020; 2010].

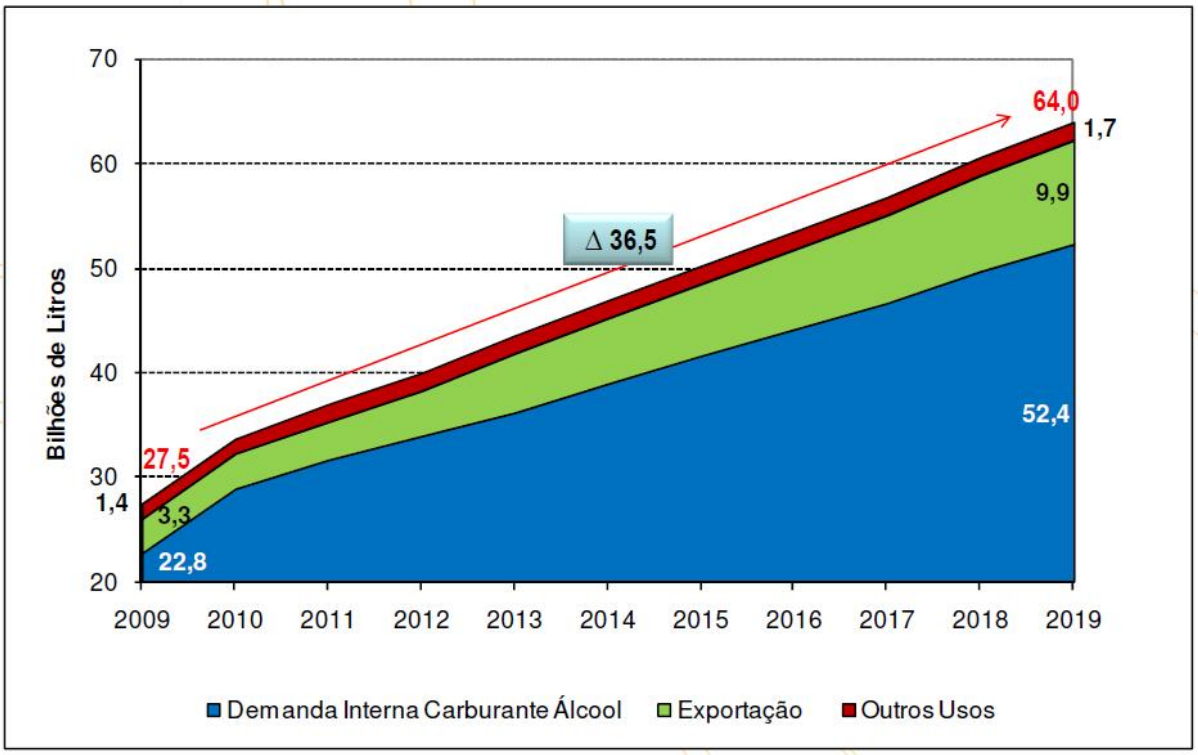


Figura 3. 7: Projeção da demanda total de etanol
Fonte: PDE 2010-2019

A figura 3.5 mostra a projeção da demanda da cana-de-açúcar para 2020 com as respectivas divisões para a produção de açúcar e etanol que geralmente são determinadas pela imediata necessidade do mercado e os preços de cada produto.

Segundo dados da UNICA, o Brasil é o maior produtor e exportador de açúcar do mundo, respondendo por 20% da produção mundial e 40% das vendas no mercado internacional.

As projeções demonstram que o mercado sucroalcooleiro está em contínua expansão e faz parte do planejamento energético brasileiro. A crescente demanda por açúcar e, sobretudo, por etanol tende a estimular investimentos neste setor, gerando renda, empregos e impulsionando a indústria brasileira de máquinas e equipamentos.

3.1.3 Energia elétrica como produto

Antigamente, as usinas dedicavam-se apenas à produção de açúcar e etanol e as centrais de geração eram, em geral, pouco eficientes, com capacidade de gerar apenas a energia necessária para o consumo interno da

indústria, sem geração de excedentes. Nestes casos a energia elétrica era considerada como um subproduto da usina. Em algumas usinas a quantidade de bagaço produzido durante a fabricação de açúcar e etanol era demasiada grande e estas centrais termelétricas não eram dotadas de capacidade suficiente para consumo de todo bagaço, que, portanto, era vendido para outras indústrias ou queimado sem aproveitamento energético algum.

Atualmente, com projetos de caldeiras e turbinas de alta eficiência operando em altos níveis de pressão e temperatura, o que corresponde a maior potencial energético e maior consumo da biomassa da cana, com as possibilidades de comercialização da energia no mercado regulado ou livre e também os recursos de investidores neste setor, a energia elétrica pode ser tornar um dos principais produtos das usinas sucroalcooleiras, chamadas hoje de sucroenergéticas devido a esta produção em larga escala de bioeletricidade. A biomassa da cana deixa de ser apenas um resíduo e passa a ser fonte de energia para as termelétricas a vapor, compondo o sistema de cogeração nas usinas. Entende-se por cogeração, no caso das usinas, o processo de produção combinada de calor útil e energia mecânica, geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia química disponibilizada pelo combustível.

A possibilidade de expansão da bioeletricidade é tamanha que hoje já ocupa 3% da matriz energética brasileira e projeções, a exemplo dos estudos realizados pelo Programa Bioeletricidade 2011-2020 da COGEN, apontam para uma participação de aproximadamente 14% na matriz até 2020 com produção de mais de 10GW.

Cabe ressaltar que o aumento da demanda por açúcar e etanol corresponde a um aumento proporcional de biomassa, o que possibilita um correspondente crescimento da oferta de bioeletricidade. Além disso, o Protocolo Agroambiental (ANEXO I) assinado por mais de 150 usinas no Estado de São Paulo promove a antecipação dos prazos para eliminação da queima da palha da cana-de-açúcar de 2021 para 2014 em áreas mecanizáveis e de 2031 para 2017 em outras áreas (vide figura 3.8). A queima da palha é uma antiga prática na lavoura para facilitar o corte manual. A eliminação desta queima aumentará a quantidade de biomassa disponível para geração de energia elétrica.

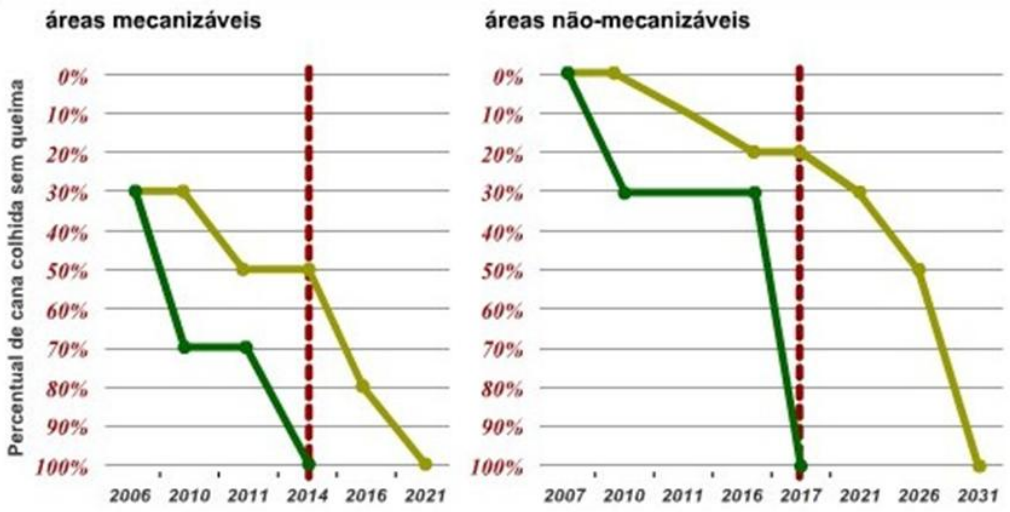


Figura 3. 8: Prazo para eliminação da queima da palha da cana no Estado de São Paulo
Fonte: UNICA

Outro fator que impulsionará este mercado é o fato de os acionamentos mecânicos estarem sendo substituídos por acionamentos elétricos em usinas modernas. Muitas usinas utilizam turbinas a vapor para acionamento dos picadores e desfibradores, que efetuam o preparo da cana antes da moagem, e também utilizam turbinas para acionamento dos rolos de moenda. Ou seja, a força motriz é proveniente de turbinas a vapor nestes casos. Com a tendência de substituição destas turbinas a vapor por motores elétricos mais eficientes, haverá maior disponibilidade de vapor para alimentação dos turbogeradores, aumentando o potencial de geração de energia elétrica.

A bioeletricidade possui diversas vantagens em relação aos demais métodos de geração de energia elétrica. Primeiramente, a bioeletricidade é produzida a partir de resíduos do processo de fabricação, sem custo algum de aquisição por parte do produtor. Apenas para o caso da palha, devem-se levar em consideração os custos com transporte do campo para a usina. Já o bagaço, após a cana passar pelo processo de moagem, é transportado diretamente por meio de esteiras para a caldeira ou montes de armazenagem para posterior queima. Além disso, o período de colheita da cana, durante o qual a biomassa é produzida, coincide com a estação seca no Centro-Sul do país (maio a novembro), quando as hidrelétricas tendem a diminuir sua produção devido à redução nos níveis dos reservatórios. Ou seja, a bioeletricidade a partir da biomassa da cana é uma excelente alternativa para complementaridade do sistema elétrico brasileiro, atuando em sinergia com as hidrelétricas.

Outras vantagens da bioeletricidade da cana também podem ser citadas:

- Tempo de implantação reduzido da termelétrica, entre 18 a 24 meses;
- Geração de renda, empregos e impulsão da indústria nacional de máquinas e equipamentos;
- Reduzido impacto ambiental, e contribuição para a redução de emissão de gases de efeito estufa;
- Proximidade aos grandes centros de consumo de energia elétrica;
- Em alguns casos pode ser classificada como “geração distribuída”.

Geração de energia distribuída é a geração de energia elétrica de forma descentralizada, no próprio local de uso ou próximo ao local. Isto proporciona uma solução energética e economicamente otimizada para cada caso. Na forma convencional de geração, a geração centralizada, onde é utilizada uma grande fonte geradora, são necessárias linhas de transmissão e distribuição para que a energia chegue até o consumidor final. Já na chamada geração distribuída essas linhas são menores ou até mesmo desnecessárias caso a fonte geradora encontre-se próxima ao consumidor final, evitando assim, todos os custos e impactos inerentes à geração centralizada.

Além dos custos de construção e manutenção das linhas de transmissão, devem ainda ser considerados, no caso da geração centralizada, os impactos ambientais produzidos pelo desmatamento no percurso das linhas e as perdas de energia inerentes ao processo de transmissão.

O aumento da demanda, a falta de licença ambiental para as hidrelétricas, o custo da energia elétrica com fontes fósseis, dentre outros fatores, levaram a bioeletricidade da biomassa da cana a ganhar foco na pauta de investimentos por parte das indústrias sucroalcooleiras e seus investidores e no planejamento energético no país, como retratam os dados da EPE.

3.2 A biomassa da cana

O termo biomassa engloba a matéria vegetal e os seus derivados tais como resíduos florestais e agrícolas, resíduos animais e a matéria orgânica contida nos resíduos industriais e domésticos. Estes materiais contêm energia química que pode ser liberada diretamente por combustão, ou convertida através de algum processo em outras fontes energéticas mais adequadas, para um fim qualquer desejado, tal como o álcool e o carvão vegetal.

No caso das usinas de açúcar e álcool a biomassa é o bagaço e a palha da cana. Estes podem ser queimados diretamente em caldeiras para geração de vapor para alimentar o processo térmico da usina e/ou para geração de energia mecânica e elétrica.

Interessante é que a utilização da biomassa da cana para fins energéticos produz uma energia renovável, ou seja, proveniente de fontes naturais que possuem capacidade de regeneração, pois não se esgotam desde que haja o plantio e o cultivo.

3.2.1 Produção da biomassa no processo industrial

Na análise da viabilidade da utilização de determinada biomassa para geração de bioeletricidade existem algumas limitações impostas por aspectos econômicos. Primeiramente, é necessário avaliar se a biomassa a ser explorada não encontra um uso mais interessante como matéria-prima industrial ou alimento que podem ser prioritários antes da questão energética. Em seguida, é necessário demonstrar que os custos de produção agrícola, colheita, transporte, armazenamento, processamento industrial, proteção ambiental e adaptação dos equipamentos para uso final são compatíveis com os benefícios energéticos e comparáveis com os demais combustíveis de uso corrente. No caso da biomassa da cana-de-açúcar, os custos mencionados já estão contemplados no processo de fabricação de açúcar e etanol. O capim elefante, por exemplo, é produzido exclusivamente para geração de energia elétrica, enquanto a biomassa da cana é residual e sua produção é inevitável durante a operação da usina.

Para a biomassa da cana, o balanço energético relacionando o consumo e a produção de energia no processo é totalmente viável sendo que o consumo de energia é característica da fabricação de açúcar e etanol que, necessariamente, produzirá bagaço. A não utilização da biomassa residual para fins energéticos implicará sua aplicação na lavoura como adubo ou na sua queima, sem aproveitamento algum, dependendo da quantidade produzida.

Para se ter uma visão geral de como o bagaço é extraído, cabe uma breve descrição do processamento da cana na usina. O primeiro passo da cana na usina é o preparo, no qual passa por picadores e desfibradores. Após este preparo a cana passa por diversos módulos de moenda para extração do caldo que servirá à fabricação de açúcar ou etanol. Ao final da moenda, do colmo da cana sobra apenas o bagaço, que é a biomassa em questão. O bagaço é transportado através de esteiras para o “pátio de bagaço” (figura 3.10), onde é armazenado, ou é direcionado diretamente para a caldeira para geração de vapor. A figura 3.9 ilustra o processo de moagem da cana e retirada do bagaço.

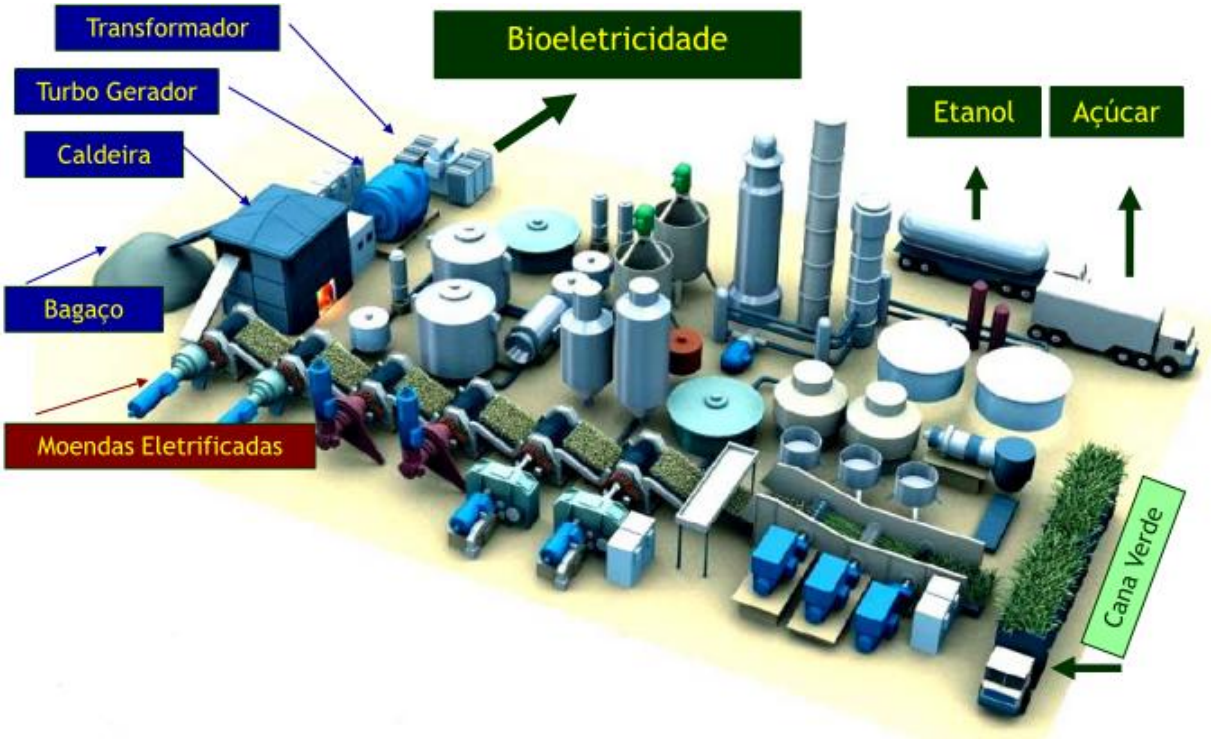


Figura 3.9: Processo de moagem da cana e retirada do bagaço
Fonte: COGEN

Figura 3.10: Pátio de manejo de bagaço em usina
Fonte: PNE 2030

A palha, por sua vez, durante a fase de colheita da cana, em geral não é transportada para a usina. No processo de corte manual, a palha deve ser queimada para facilitar o deslocamento dos cortadores e para prevenir a presença de animais peçonhentos. A queima ocorre ainda pois o "colchão" de palha que cobre o solo, além de dificultar o deslocamento das pessoas que

executam a colheita manual no campo, retarda a brotação da cana, o que impacta diretamente na produtividade e propicia o aumento das populações de pragas. Por outro lado, uma determinada quantidade de palha no campo previne a erosão do solo e reduz a amplitude de variação térmica. Contudo, no caso da colheita mecanizada, o efeito do deslocamento é superado facilmente pelas máquinas e, além disto, a palha pode ser retirada do campo para ser utilizada nas caldeiras geradoras de vapor, fazendo uso da energia contida nesta biomassa. A expectativa é positiva para os próximos anos no que tange à utilização do potencial energético da palha da cana visando o Protocolo Agroambiental assinado no Estado de São Paulo para mecanizar a colheita até 2014 em áreas mecanizáveis, pois esta operação vem a eliminar a queima da palha perdida durante a colheita manual. Os maiores benefícios serão o aumento da quantidade de biomassa disponível para geração de bioeletricidade e a contribuição para a redução de emissão de gases de efeito estufa.

A figura 3.11 ilustra o sistema de corte e colheita mecanizada da cana.

Figura 3.11: Colheita mecanizada da cana-de-açúcar
Fonte: PNE 2030

3.2.2 Viabilidade de utilização da biomassa

Na análise comparativa entre combustíveis úteis para geração termelétrica, dois pontos devem ser levados em consideração: custo e potencial energético dos combustíveis.

Para geração termelétrica a vapor podem ser utilizados diversos combustíveis como gás natural, carvão, cavaco de madeira, bagaço e palha da cana, óleo combustível, capim, entre outros. Diferente da condição das usinas de açúcar e etanol e demais indústrias que aproveitam resíduos industriais para cogeração, nas quais os custos associados ao combustível são relativamente pequenos, os investidores em usinas termelétricas devem sempre promover o balanço econômico para seleção do combustível a ser utilizado. Esta análise é feita em função de algumas premissas como a região a ser implantada a termelétrica, os custos do combustível, a disponibilidade do combustível durante o período previsto de operação da termelétrica, os recursos para transporte do combustível à termelétrica e seu potencial energético.

No caso da indústria sucroalcooleira, uma análise comparativa entre combustíveis é desnecessária devido às seguintes condições:

- O custo associado à produção do bagaço é desprezível. O bagaço é resíduo do processo e consequência da moagem da cana. Seu transporte para a caldeira é feito em todos os casos tendo em vista a necessidade de geração de vapor para alimentação do processo térmico. O controle deve ser feito apenas em alguns casos onde é conservado o excedente de bagaço, próximo à caldeira, e que deve retornar para a caldeira em período a ser determinado pela usina, dependendo da estratégia de operação.
- Igualmente, a produção da palha é consequência do cultivo da cana no campo. Sua produção não tem custo. Os custos do aproveitamento da palha estão associados ao seu transporte do campo para a usina.

Então, para as usinas de açúcar e etanol o aproveitamento da biomassa da cana para queima nas caldeiras, seja apenas para suprimento do processo ou para favorecer a cogeração, é economicamente atrativo, contando-se, ainda, com as facilidades associadas à logística e disponibilidade.

3.3 Modelagem do sistema termelétrico

3.3.1 Demanda de vapor na usina

Durante a produção de açúcar, etanol e bioeletricidade na usina, o processo requer a utilização de vapor de água sob determinadas condições de

pressão e temperatura. A 3.12 mostra um fluxograma básico do processo e os pontos que solicitam vapor.

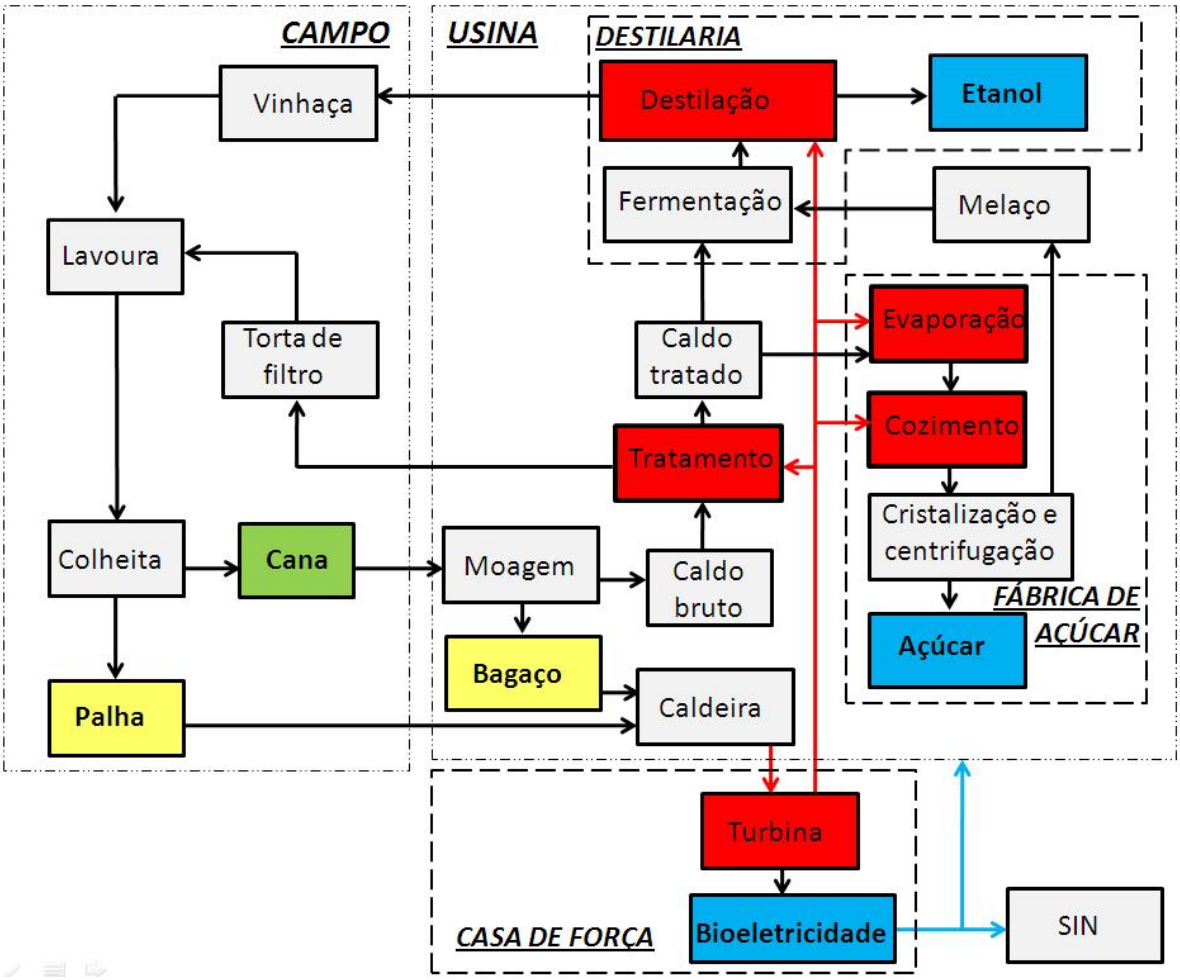


Figura 3.12: Fluxograma básico de uma usina de açúcar e etanol moderna
Fonte: UNICA

Os quadros em vermelho são os principais processos que demandam vapor de água. Ou seja, são os processos de tratamento do caldo, evaporação e cozimento para fabricação de açúcar, destilação para fabricação de etanol e alimentação da turbina para geração de bioeletricidade. Neste caso, todo o vapor necessário para operação da usina é fornecido pela caldeira e retirado da turbina. A figura também ilustra dois resíduos industriais que são utilizados como adubo na lavoura: a vinhaça, resíduo da produção de etanol, e a torta de filtro, que tem como maior componente o lodo coletado na base dos decantadores.

O consumo específico de vapor na usina (relativo à quantidade de cana processada) varia muito em cada caso, pois depende da modernidade dos equipamentos, seleção do produto (açúcar ou etanol), características dos acionamentos e outros fatores. O consumo específico de vapor da turbina

(relativo à potência gerada) depende muito do tipo de turbina e tecnologia adotada. Em muitas usinas antigas, ainda utiliza-se vapor para acionamentos mecânicos, principalmente para o preparo e moenda da cana. Contudo, estes acionamentos têm sido substituídos nas usinas modernas por motores elétricos a fim de aumentar a eficiência energética da indústria que está associada ao consumo de vapor e energia elétrica. Como os motores elétricos apresentam uma eficiência superior às turbinas de acionamento, este método é comumente empregado nas usinas modernas.

Para suprimento de vapor no processo fabril, todas as usinas requerem a utilização de caldeiras geradoras de vapor.

3.3.2 Geração termelétrica

Basicamente a planta termelétrica deve ser composta por um gerador de vapor e um turbogerador, responsável pela conversão de energia provinda do vapor em energia elétrica. Existem outros equipamentos importantes no processo de geração termelétrica que serão abordados em maiores detalhes no capítulo 4. A função principal deste sistema é converter a energia química do combustível, em conjunto com a água de alimentação da caldeira, em energia elétrica nos terminais do gerador. Este ciclo de conversão de energia e a participação da caldeira e do turbogerador estão ilustrados na figura 3.13.

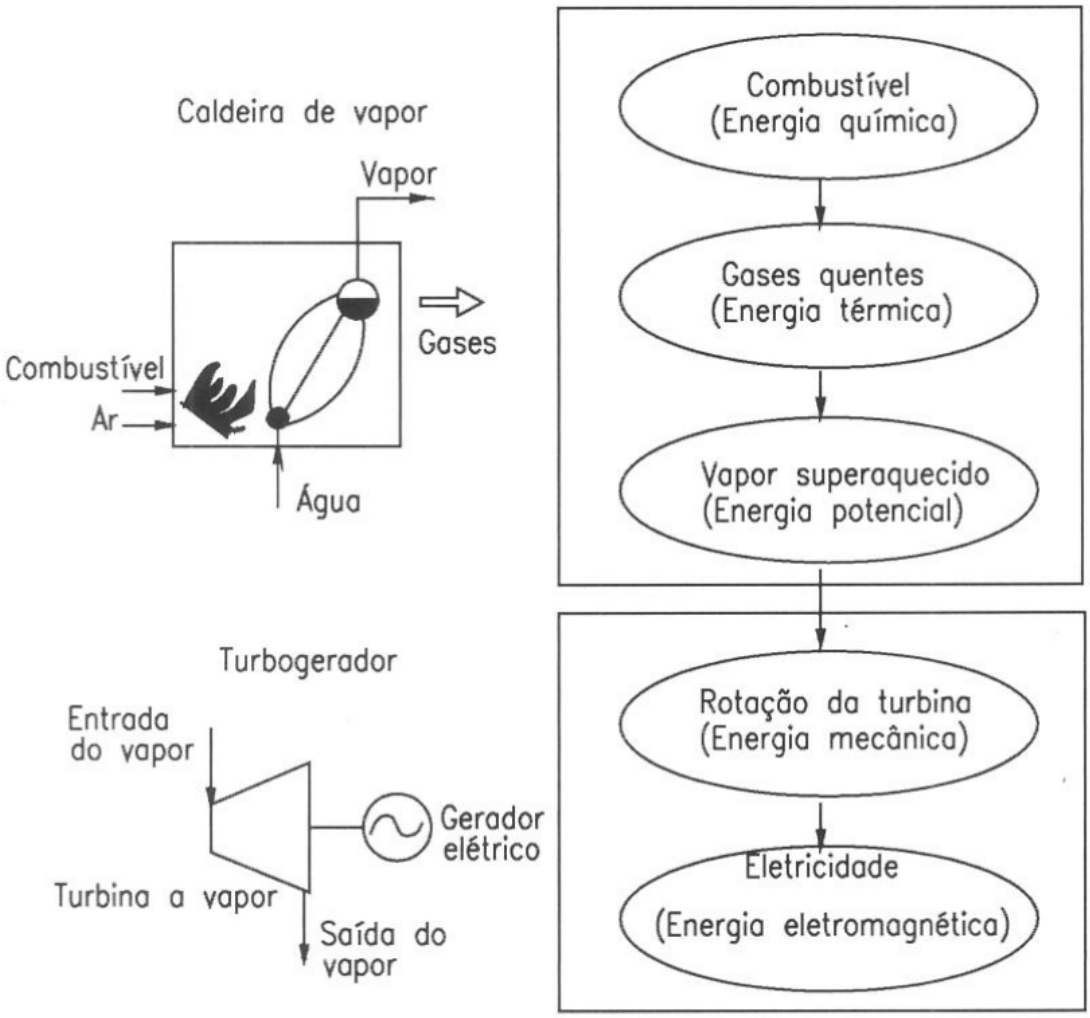


Figura 3.13: Sequência de processos de conversão de energia durante a geração de eletricidade numa central termelétrica a vapor
Fonte: LORA e NASCIMENTO

Os geradores de vapor, chamados de caldeiras, utilizam a energia química liberada durante a combustão da biomassa para promover a mudança de fase da água do estado líquido para vapor, a uma pressão várias vezes maior que a atmosférica. Não há contato entre a biomassa e a água neste processo. O vapor resultante pode ser utilizado para acionamento de máquinas térmicas, para geração de energia mecânica e elétrica, ou para fins de aquecimento no processo industrial. Os tipos de caldeiras e suas características construtivas variam em função do combustível a ser utilizado que podem ser de diversos tipos, como visto anteriormente.

As turbinas a vapor são máquinas rotativas que transformam a energia cinética do vapor em energia mecânica no seu eixo. Essa energia pode ser utilizada para acionamentos mecânicos de compressores, ventiladores e bombas e para geração de energia, acionando um gerador síncrono. Aspectos

construtivos e configurações das turbinas a vapor serão abordados no capítulo 4. A composição do conjunto turbina-gerador é chamada turbogerador.

Cabe ressaltar que, no ciclo típico de geração termelétrica a vapor, outros componentes essenciais também cooperam. Dividindo-os em blocos, podem ser citados os seguintes equipamentos:

I. Principais equipamentos do ciclo de geração de potência mecânica: caldeira, turbina a vapor, condensador e bomba de água de alimentação;
II. Equipamentos de manuseio do combustível e exaustão dos gases de escape à atmosfera;
III. Equipamentos do sistema de resfriamento de água do condensador e reposição de água ao ciclo;
IV. Gerador síncrono para conversão da energia mecânica em elétrica.

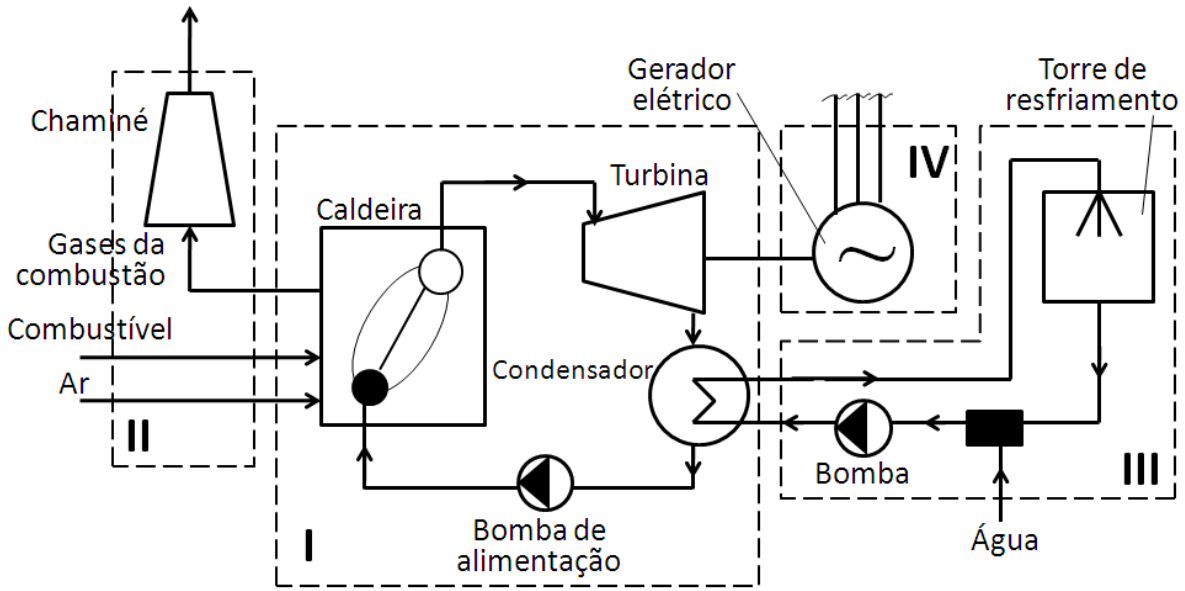


Figura 3.14: Esquema simplificado de sistema de potência a vapor
Fonte: LORA e NASCIMENTO

Do ponto de vista termodinâmico, este ciclo de geração de potência a vapor é conhecido com ciclo Rankine e ele está representado no quadro de número “I” da figura 3.14. No entanto, a configuração do ciclo pode variar em função do projeto da turbina e necessidade da planta térmica. Detalhes sobre ciclos termodinâmicos podem ser encontrados em LORA e NASCIMENTO.

3.4 Sistema de cogeração

Anteriormente se mencionou que o sistema de cogeração em usinas pode ser definido como sendo um processo de produção combinada de calor útil e energia mecânica a partir da energia química disponibilizada pela biomassa da cana. As turbinas a vapor possuem esta particularidade em relação a outras máquinas motrizes para acionamentos de geradores elétricos. Além da produção de energia mecânica no eixo, a turbina possibilita a extração de vapor sob determinadas condições de pressão e temperatura que são úteis para o processo fabril da indústria de açúcar e etanol. Ou seja, a turbina a vapor é capaz de produzir dois tipos de energias a partir de uma única fonte.

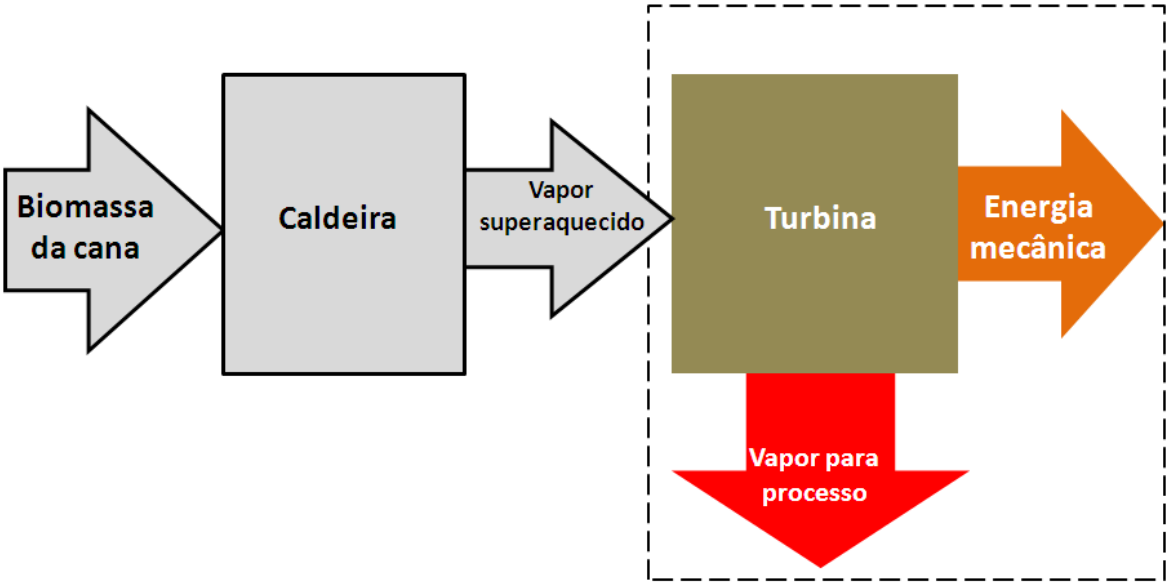


Figura 3.15: Cogeração em turbinas a vapor

O vapor ao passar por entre os estágios de palhetas da turbina sofre uma significativa queda de pressão e temperatura. Muitas turbinas são projetadas para que este novo estado físico do vapor esteja adequado para suprir a demanda térmica do processo fabril, viabilizando o sistema de cogeração.

3.4.1 Suprimento da carga térmica de maneira eficiente

Existem diversas configurações de circuitos térmicos para as usinas sucroalcooleiras. Com aplicação adequada destes circuitos, as usinas podem ampliar seu potencial de geração de bioeletricidade fazendo uso da energia contida no vapor gerado e, também, melhorar o consumo específico deste vapor na planta. As figuras seguintes mostram dois esquemas típicos em usinas antigas e modernas, respectivamente.

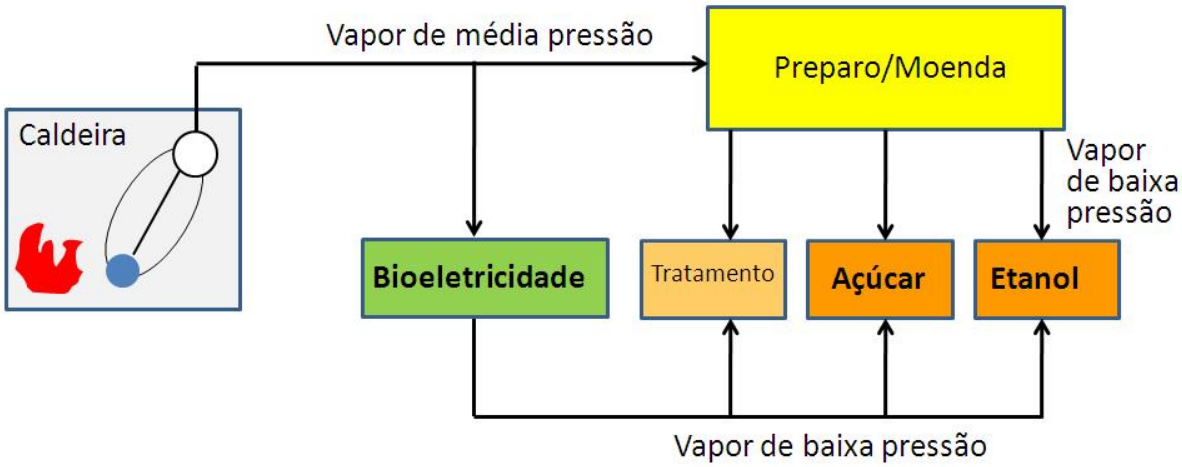


Figura 3.16: Circuito térmico na indústria sucroalcooleira antiga

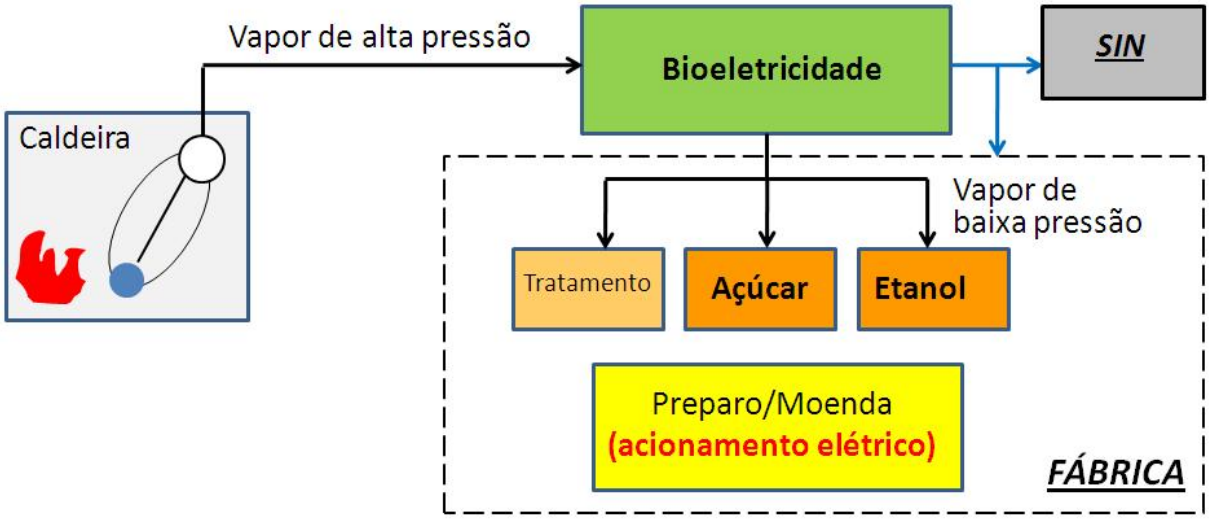


Figura 3.17: Circuito térmico na indústria sucroenergética moderna

Nas usinas antigas o vapor é utilizado no preparo e moenda para acionamentos mecânicos através de turbinas a vapor que operam a média pressão na entrada. Após a passagem do vapor por entre os estágios da turbina, este perde pressão e temperatura. Estas turbinas são, então, projetadas para que a condição de vapor no seu escape seja útil para alimentação do processo de fabricação de açúcar e etanol. Este é o vapor de baixa pressão. Considerando que as turbinas de acionamentos mecânicos não disponibilizam vapor suficiente para suprimento do processo fabril, também são utilizadas turbinas de geração de energia elétrica para aproveitar a energia do restante do vapor necessário para o processo industrial. Acontece que estas turbinas possuem baixa capacidade de geração de bioeletricidade, pois o fluxo de vapor é pequeno e o nível de pressão de vapor (média pressão) limita o potencial de geração, em comparação com linhas de vapor de alta pressão.

Neste caso, a energia elétrica produzida será utilizada apenas para consumo interno da indústria.

Por outro lado, nas usinas modernas, as caldeiras são geralmente de alta pressão para favorecer a geração de bioeletricidade. Todo vapor de processo pode passar pela turbina. Isto significa que, nesta nova condição, toda energia potencial contida no vapor é aproveitada para conversão em energia mecânica no eixo da turbina que, com a contribuição de um gerador síncrono, produzirá bioeletricidade. O preparo e a moenda não carecem mais de vapor, pois os acionamentos são feitos via motores elétricos. Ou seja, as usinas modernas que utilizam este esquema térmico cogeram produzindo volume significativo de bioeletricidade com baixo consumo de vapor tendo em vista o incremento de energia da caldeira (devido à elevação da pressão e temperatura) e o aproveitamento energético de todo vapor no turbogerador. Neste caso, as usinas produzem energia elétrica suficiente para suprimento de toda indústria e ainda são capazes de exportar excedentes de energia.

3.4.2 Autoprodução e comercialização da energia elétrica excedente

Esta configuração moderna apresentada na figura 3.17 permite à indústria não apenas ser autossuficiente em energia, mas também proporciona condições de gerar energia elétrica excedente em relação ao consumo industrial. A capacidade de geração de bioeletricidade desta configuração é potencializada pela alta pressão e temperatura da caldeira e pela substituição dos acionamentos mecânicos por acionamentos elétricos. Com a capacidade de produção de energia elevada a um nível superior ao necessário para alimentação da indústria, abre-se a oportunidade para as usinas participarem do mercado de comercialização de energia elétrica.

No Brasil, a bioeletricidade está regulamentada hoje para ser vendida no mercado regulado, através de leilões, ou em contratos no mercado livre.

- Mercado Regulado: No Ambiente de Contratação Regulado (ACR) a contratação é feita por meio de processo licitatório promovido pela ANEEL, observando as diretrizes fixadas pelo Ministério de Minas e Energia. Para os projetos de biomassa, geralmente são celebrados os leilões A-1 (energia existente) e A-3 (energia nova), com início de operação em um e três anos, respectivamente, após a contratação.
- Mercado Livre: No Ambiente de Contratação Livre (ACL) geradores e consumidores livres negociam contratos bilaterais.

No aspecto de geração de bioeletricidade na indústria sucroenergética, o propósito fundamental é elevar o potencial de geração a fim de proporcionar

uma maior rentabilidade com a venda de excedentes. A inserção da bioeletricidade oriunda da biomassa da cana no SIN está alinhada com as perspectivas do país quanto ao planejamento energético, conforme os Planos Decenais de Expansão de Energia.

3.5 Aspectos ambientais

No que tange aos aspectos ambientais, a bioeletricidade produzida da biomassa da cana-de-açúcar tem muitas vantagens em comparação com outras fontes: menor emissão de gases de efeito estufa, preservação dos recursos naturais e menores impactos na implantação e no transporte de energia.

Segundo CARDOSO, em comparação com a queima de combustíveis fósseis percebe-se que a queima da biomassa é mais limpa uma vez que praticamente não libera compostos com base de enxofre como SO_2 ou SO_3, além da pouca formação de óxido nitroso, pois queima lentamente e com uma baixa temperatura de chama. Com relação à emissão de CO_2, principal causador do Efeito Estufa (fenômeno responsável pelo aquecimento global), a geração a biomassa da cana apresenta uma grande vantagem, pois grande parte do volume de CO_2 equivalente ao emitido pela termelétrica na queima do combustível é absorvida pela plantação de cana-de-açúcar durante o processo de fotossíntese (Etanol Verde). Por isso, as usinas, pelos critérios do mecanismo de desenvolvimento limpo do Protocolo de Kyoto, são elegíveis à obtenção de créditos de carbono. Além disso, as iniciativas promovidas pelo Protocolo Agroambiental, já citadas anteriormente, preveem uma redução significativa de emissão de gases de efeito estufa com a eliminação da queima da palha da cana no campo.

No conceito da sustentabilidade, a biomassa da cana apresenta-se altamente competitiva já que se trata de uma fonte renovável e sua utilização promove a preservação dos recursos findáveis, como os combustíveis derivados de petróleo, gás natural e carvão mineral, por exemplo. Com relação ao uso de água, a cana-de-açúcar no Brasil praticamente não é irrigada. Nas principais regiões produtoras, as necessidades hídricas da plantação são supridas naturalmente pelas chuvas das regiões produtoras e complementadas pela aplicação da vinhaça, subproduto da fabricação de etanol.

A bioeletricidade provinda da biomassa da cana tem ainda características de geração distribuída, ou seja, a fonte geradora está próxima aos centros de consumo. Isto proporciona grandes economias em linhas para transporte da energia ao consumidor, reduzindo, consequentemente, impactos ambientais relacionados às instalações de torres de transmissão que exigem desmate nos pontos de fundação e em alguns trechos de percurso de cabos. Já os impactos

ambientais de implantação da termelétrica são desprezíveis pois, em geral, a área de instalação faz parte do parque industrial.

Capítulo 4

4. Configuração da Usina Termelétrica na Indústria Sucroalcooleira

A usina termelétrica típica de uma indústria de açúcar e etanol e bioeletricidade é basicamente constituída dos seguintes equipamentos: caldeira geradora de vapor, turbina, gerador síncrono e sistema de condensação. Este capítulo visa abordar uma síntese das características de cada um destes equipamentos.

4.1 Caldeira

O gerador de vapor, chamado caldeira, é um equipamento que utiliza a energia química liberada durante a combustão de um combustível para promover a mudança de fase da água do estado líquido para vapor, a uma pressão muitas vezes maior que a atmosférica. Nas usinas termelétricas, este vapor resultante é destinado primeiramente ao acionamento de turbinas na geração de energia elétrica. Adicionalmente, pode ser utilizado para fins de aquecimento no processo industrial, formando o processo de cogeração.

A figura 4.1 mostra de forma simplificada uma caldeira de vapor, enfatizando dois elementos principais: a fornalha, onde ocorre a queima do combustível, e as superfícies de aquecimento, onde ocorre a troca de calor dos gases quentes com o fluido de trabalho (no caso, a água).

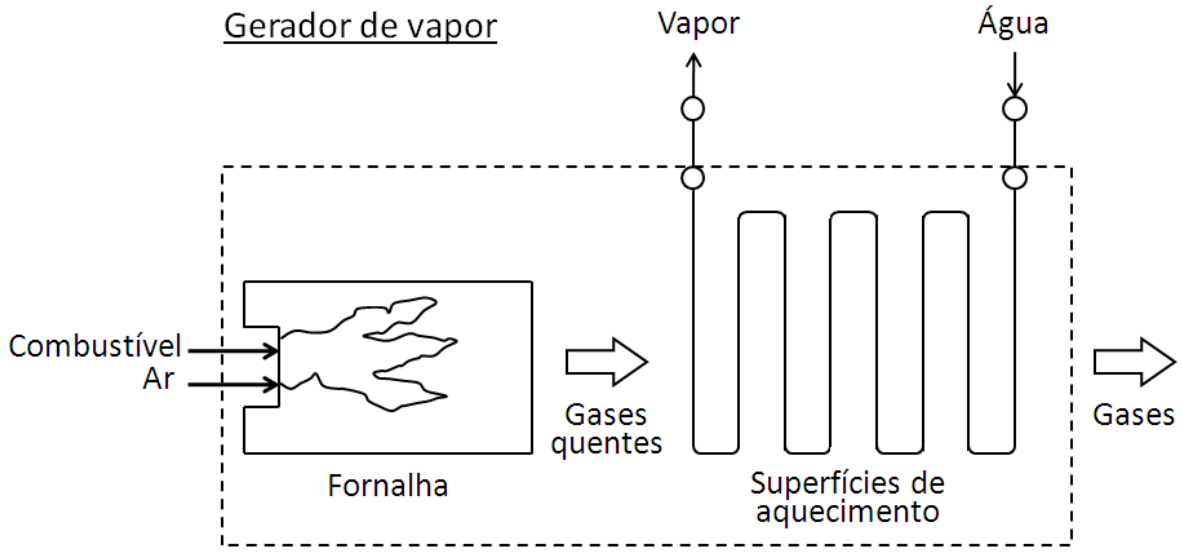


Figura 4. 1: Esquema simplificado de uma caldeira de vapor
Fonte: LORA e NASCIMENTO

As caldeiras de vapor são classificadas atendendo os seguintes critérios:

Aplicação principal:

- Centrais termelétricas, uso industrial ou propulsão naval.

Disposição relativa dos gases e do fluido de trabalho:

- Caldeiras flamotubulares ou pirotubulares – os gases fluem por dentro de tubos imersos em água;
- Caldeiras aquotubulares – a água circula pelo interior dos tubos e os gases trocam calor com a água através da parede dos mesmos.

Força motriz para a circulação do fluido de trabalho:

- Circulação natural – a circulação do fluido de trabalho pelo interior dos tubos ocorre devido à diferença de densidade da água líquida e a mistura água-vapor;
- Circulação forçada – são utilizadas bombas de recirculação;
- Passe único – a água é forçada por bomba de alimentação a passar uma única vez pela tubulação. Não há recirculação de água neste caso.

Nível de pressão de operação:

- Classificadas em baixa, média, alta, super alta e supercrítica.

Tipo de combustível ou fonte de calor:

- Sólidos, como biomassa, carvão mineral, resíduos urbanos, etc.;

- Líquidos, como óleos combustíveis;
- Gasosos, como gás natural, gás de processo e calor residual.

Processo de combustão:

- Grelha fixa ou rotativa – próprio para queima de biomassa ou resíduos agroindustriais;
- Queima em suspensão – para combustível sólido pulverizado, óleo combustível e gás natural;
- Leito fluidizado (borbulhante ou circulante) – para queima de combustíveis sólidos em geral.

Organização da tiragem de ar e gases de combustão:

- Tiragem natural – exercida exclusivamente pela chaminé. Típica de caldeiras antigas de pequeno porte;
- Tiragem forçada – exercida por sopradores que pressurizam o ar para combustão e facilitam a remoção dos gases pela chaminé;
- Tiragem induzida – realizada por ventiladores de exaustão, gerando uma pressão ligeiramente negativa no interior da fornalha;
- Tiragem balanceada – uma combinação da tiragem forçada com a tiragem induzida.

Disposição da fornalha e superfície de aquecimento:

- Pode ser de diversos tipos como, por exemplo, em forma de Π, forma de T, em forma de U ou em forma de torre.

4.1.1 Configuração típica em usinas termelétricas a biomassa

Nas centrais termelétricas as caldeiras são projetadas para gerar vapor superaquecido, em alta pressão e temperatura, a fim de que se obtenha um maior nível de energia térmica do vapor, medida pela entalpia, para geração de energia elétrica nos turbogeradores. O sistema requer vapor superaquecido por este possuir um maior conteúdo energético e estar isento de condensado (água no estado líquido), que pode provocar danos à turbina. Por este motivo, são selecionadas caldeiras aquotubulares, já que a capacidade de fluxo de vapor e a taxa de produção de calor por área são maiores que nas caldeiras flamotubulares.

O sistema de circulação adotado é o sistema forçado por bomba de recirculação. Isto resulta em caldeiras mais compactas já que o fluido de operação fica submetido à alta pressão, permitindo diâmetros menores dos

tubos de circulação. A tecnologia de combustão empregada, geralmente, é a de grelha fixa, basculante ou rotativa, própria para queima de biomassa.

A figura 4.2 ilustra uma caldeira aquotubular usualmente empregada para queima de biomassa:

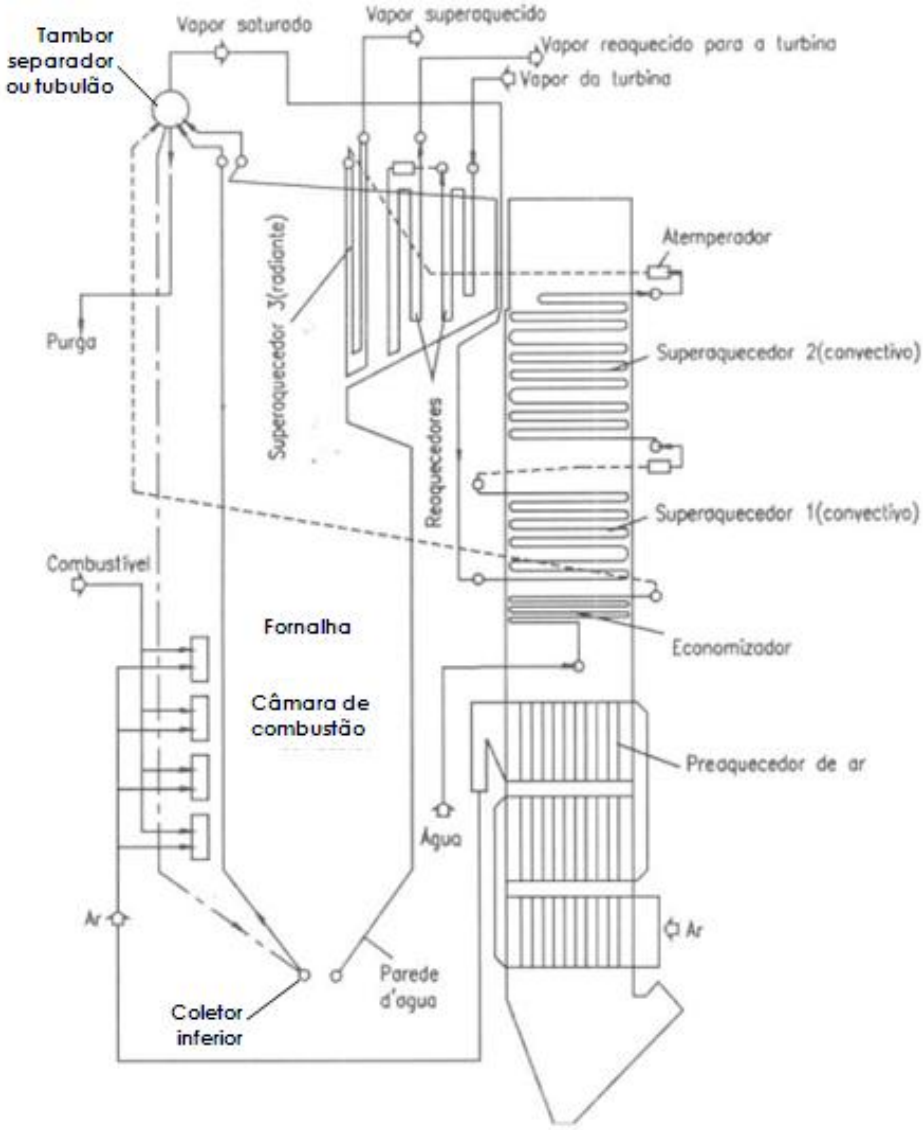


Figura 4. 2: Esquema de uma caldeira aquotubular
Fonte: LORA e NASCIMENTO

Os principais componentes deste tipo de caldeira são:

- <u>Tambor separador ou tubulão</u> – corpo cilíndrico de aço que recebe a água de alimentação. A água é distribuída para as paredes de água e feixe tubular e, durante seu retorno para o tambor, ocorre a mudança de fase de parte da água em vapor;

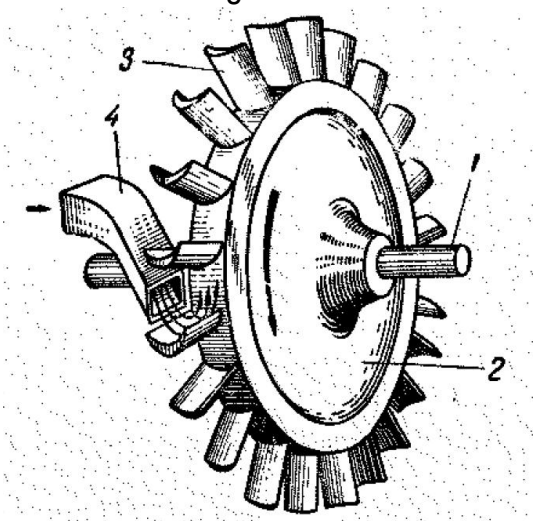
- Coletor inferior – corpo cilíndrico de aço similar ao tambor, porém, com diâmetro menor. Tem a função de distribuir a água pelos tubos da caldeira;
- Fornalha – local onde ocorre a queima do combustível;
- Paredes de água – tubos que interligam o tambor superior aos coletores inferiores, revestindo a parte interior das paredes da fornalha.
- Superaquecedor – trocador de calor localizado após a câmara de combustão, com a função de superaquecer o vapor saturado (aquele que se encontra no limiar entre a temperatura de condensação e evaporação) proveniente do tambor. É no superaquecedor radiante que se tem a maior temperatura do fluido de trabalho;
- Economizador – trocador de calor com a função de aquecer a água de alimentação antes de sua entrada no tambor. Utiliza a energia residual dos gases de combustão, resultando num aumento de eficiência da caldeira;
- Atemperador – trocador de calor necessário para controle da temperatura do vapor superaquecido. Pelo interior dos tubos circula uma parte da água fria de alimentação. Através desta vazão de água injetada no fluxo de vapor superaquecido é que se controla o nível de temperatura.
- Preaquecedor de ar – trocador de calor com a função de elevar a temperatura de ar empregado na combustão. Tal como o economizador, recupera uma parte da energia residual dos gases de combustão.

4.2 Turbina a vapor

A turbina a vapor é uma máquina térmica rotativa na qual a energia térmica do vapor é transformada em energia cinética devido à sua expansão através dos bocais. Esta energia cinética tende a provocar movimento no eixo da turbina gerando energia mecânica que pode ser utilizada para acionamentos de equipamentos como compressores, ventiladores e bombas e para geração de energia, acionando um gerador síncrono. Uma grande vantagem das turbinas a vapor é a possibilidade da utilização da energia térmica do vapor em processos industriais através de extrações reguláveis na sua seção de fluxo após o aproveitamento de parte deste potencial térmico do vapor para geração de energia mecânica no eixo. Ou seja, a turbina a vapor pode ser utilizada como geradora de energia térmica e mecânica (ou elétrica quando do

acionamento de gerador síncrono) simultaneamente, caracterizando o processo de cogeração.

O princípio de funcionamento de uma turbina a vapor basea-se na atuação do vapor através de um injetor sobre as palhetas móveis fixadas ao eixo da turbina como se observa na figura 4.3.



1 – Eixo; 2 – Disco; 3 – Palheta; 4 – Injetor

Figura 4. 3: Rotor de uma turbina de simples estágio
Fonte: Shlyakhin

O injetor direciona o vapor para as palhetas móveis que são responsáveis pela conversão da energia cinética em trabalho mecânico gerando movimento no eixo.

Similar à construção de um gerador elétrico, a turbina a vapor é constituída basicamente de um estator e um rotor. O estator é a parte fixa da máquina, enquanto o rotor é a parte móvel e responsável pela transmissão da energia mecânica gerada. O estator é composto pela carcaça que suporta o palhetamento fixo, responsável pelo direcionamento e injeção do vapor no palhetamento móvel do rotor. As palhetas fixas podem ser encaixadas diretamente na carcaça principal ou montadas em anéis-suportes presos à carcaça. Estes anéis-suportes chamam-se porta-palhetas. A figura a seguir ilustra os porta-palhetas.

Figura 4. 4: Porta-palhetas com palhetamento fixo
Fonte: Siemens

As palhetas móveis podem ser fixadas diretamente no eixo ou sobre rodas fixas ao eixo. Estas peças têm a finalidade de receber o impacto ou a expansão do vapor provenientes do palhetamento fixo (que atuam como injetores) para movimentação do rotor. O projeto de uma palheta deve considerar o ângulo de ataque do vapor, perfil dedicado ao aproveitamento da energia do vapor, resistência mecânica e comportamento em relação às vibrações e também resistência à erosão.

As turbinas a vapor podem ser classificadas como turbinas de simples estágio ou turbinas multiestágios. Nas turbinas de simples estágios existe somente um único estágio de palhetas composto por um anel de palhetas fixas e um anel de palhetas móveis. As turbinas de multiestágios possuem duas ou mais fileiras de estágios, dependendo das condições de vapor na entrada e saída da turbina e da requisição de potência no eixo. Um rotor de múltiplos estágios com palhetas móveis fixadas ao eixo é apresentado na figura 4.5.

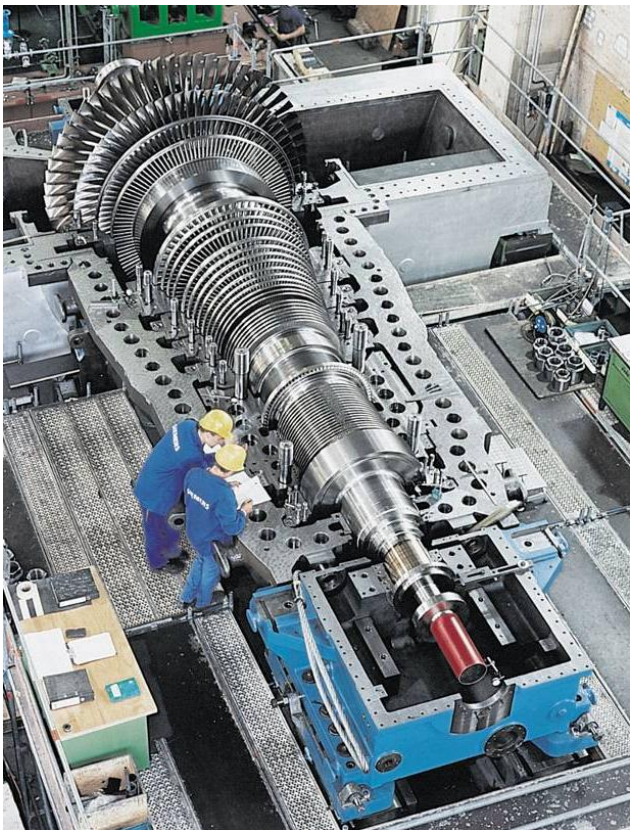


Figura 4. 5: Rotor da turbina multiestágios
Fonte: Siemens

Levando em consideração a expansão do vapor dentro da turbina de multiestágios, é evidente que as palhetas dos primeiros estágios venham a possuir dimensões menores em relação às dos últimos estágios já que na entrada da turbina o vapor está em altas condições de pressão e temperatura e volume específico reduzido, ou seja, volume por unidade de massa (geralmente, m^3/kg de vapor). À medida que o vapor passa por entre os estágios, convertendo sua energia térmica em energia cinética, existe uma perda de pressão e temperatura o que eleva o volume específico do vapor e, por esse motivo, as palhetas dos últimos estágios são maiores que as da entrada da turbina. Uma turbina multiestágios pode possuir milhares de palhetas.

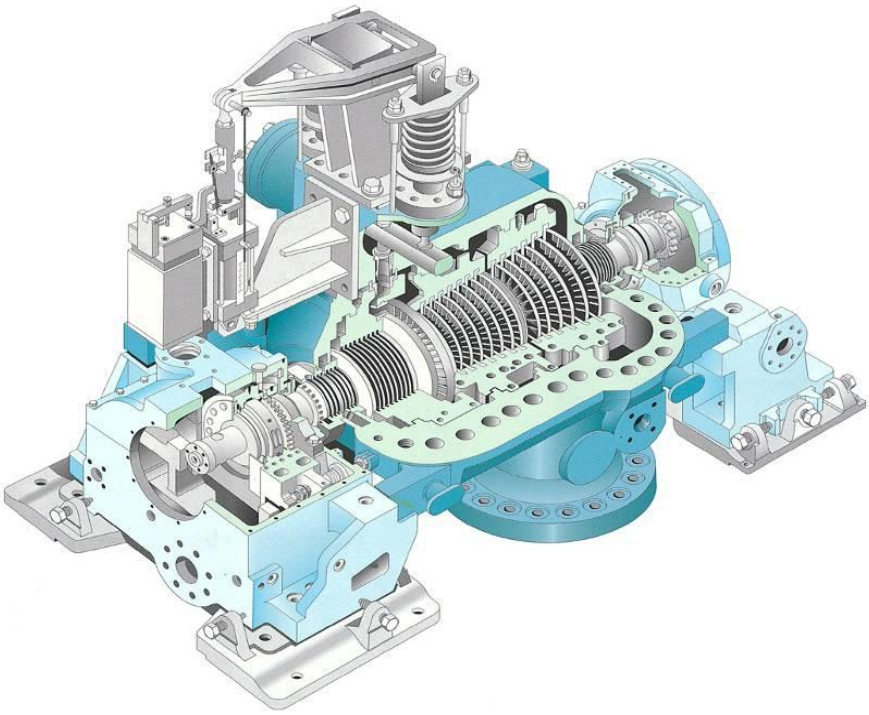


Figura 4. 6: Corte de uma turbina a vapor de multiestágios
Fonte: Siemens

Ainda quanto ao tipo de turbinas, elas podem também ser classificadas, quanto à descarga de vapor, em dois tipos: contrapressão e condensação.

4.2.1 Turbina de contrapressão

O termo contrapressão se utiliza para indicar que o vapor na saída da turbina está a uma pressão igual ou superior à atmosférica. Neste tipo de turbina o nível de pressão do vapor de descarga (também chamado escape) é dimensionado de acordo com a necessidade do processo industrial no qual o vapor será utilizado.

Tendo em vista que o escape da turbina de contrapressão é conectado à linha de suprimento de vapor para o processo industrial, o balanço de operação deste tipo de turbina dependerá da demanda de vapor na fábrica. Ou seja, a geração de energia elétrica, que está diretamente associada ao fluxo de vapor na entrada da turbina (igual ao fluxo na saída), será imposta pela demanda de energia térmica da indústria.

As falhas durante a operação da turbina, apesar de comprometer a geração de energia elétrica, não devem comprometer o suprimento de vapor para processo já que se pode construir uma linha paralela de vapor com uma válvula redutora de pressão para garantir a continuidade do processo industrial, como ilustra a figura 4.7.

Neste caso, a demanda de energia elétrica na planta deverá ser alimentada pela rede da concessionária local.

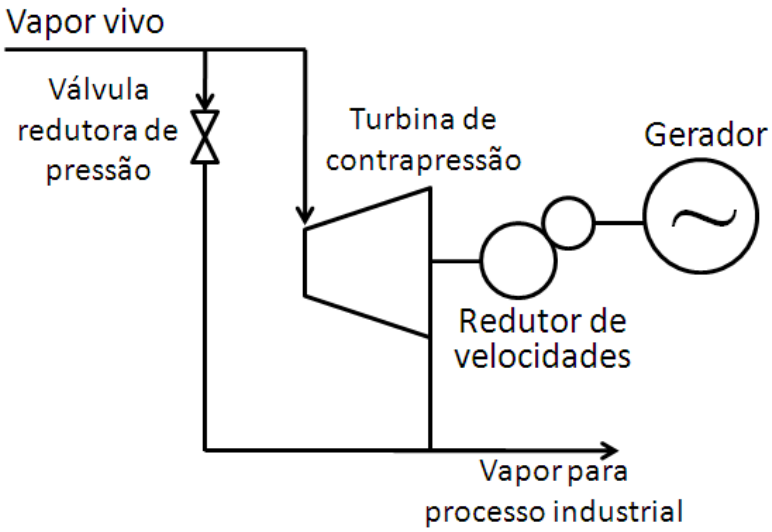


Figura 4. 7: Esquema simplificado de turbina de contrapressão

4.2.2 Turbina de condensação

Em aplicações exclusivas para geração de energia, sem conexão de vapor com um processo industrial, são utilizadas turbinas de condensação. Este tipo de turbina descarrega o vapor para um condensador a uma pressão inferior à atmosférica (normalmente alto vácuo), a fim de aumentar a absorção da energia térmica do vapor mediante o aumento máximo da queda de pressão. A turbina de condensação possui características construtivas similares à turbina de contrapressão, no entanto, ela é fisicamente maior que uma de contrapressão equivalente, tendo em vista que há uma extensão do número de estágios da máquina para maior esgotamento da energia entálpica contida no vapor.

O vapor saturado, ou seja, aquele que se encontra no limiar entre a temperatura de condensação e evaporação, quando submetido a níveis de pressão muito baixos no escape da turbina, promove uma grande dissipação de energia devido à expansão do vapor dentro da máquina. Quanto maior a queda de pressão, maior a expansão e o aproveitamento energético. Este é o conceito da aplicação de turbinas de condensação, considerando que este vapor não é aproveitado para suprimento de processos industriais. O escape da turbina é diretamente interligado a um condensador de vapor a fim de que o vapor saturado retorne ao estado líquido.

O nível de pressão no escape da turbina é definido em função do projeto da turbina em conjunto com o sistema de condensação de vapor. Após passar pelo processo de condensação e remoção dos gases não condensáveis, o

condensado retorna para a caldeira através de bombas, formando um ciclo fechado denominado de ciclo Rankine.

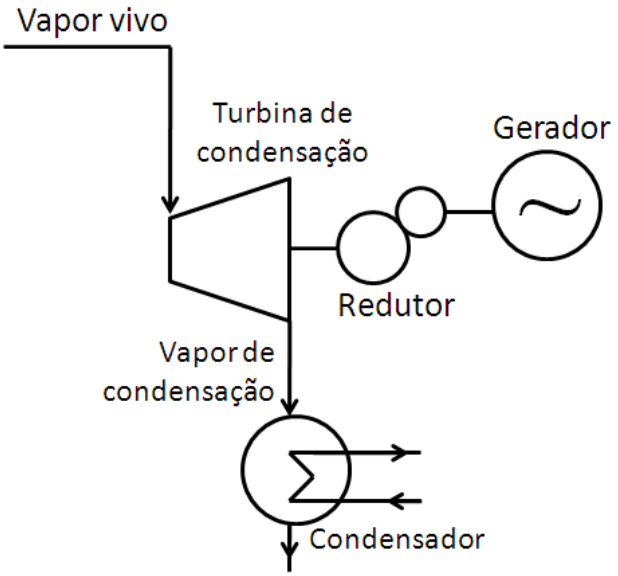


Figura 4. 8: Esquema simplificado de turbina de condensação

Ao contrário do projeto com turbina de contrapressão, em um turbogerador composto por turbina de condensação a geração de energia elétrica não estará associada à demanda de energia térmica do processo industrial tendo em vista que esta turbina não abastece o processo com vapor. Ou seja, neste projeto o fluxo de vapor na entrada da turbina deverá variar em função da demanda de energia elétrica. Em muitos casos onde a demanda de energia elétrica da indústria é inferior à capacidade de geração do turbogerador, o excedente de energia elétrica é exportado para a rede local e comercializado através de leilões regulados ou no mercado livre.

4.2.3 Sangria, extração e indução de vapor

As turbinas de contrapressão e condensação anteriormente apresentadas são turbinas sem sangrias ou extrações reguláveis de vapor. Portanto, são chamadas de turbinas puras (contrapressão pura e condensação pura) onde a quantidade de vapor na entrada é igual à quantidade no escape. A turbina de contrapressão pura alimenta o processo industrial com vapor que sai pelo seu escape e, adicionalmente, gera energia elétrica aproveitando a energia mecânica disponível no eixo da turbina. Já a turbina de condensação pura é dedicada exclusivamente à geração de energia elétrica e o vapor de escape retorna para a caldeira após o processo de condensação.

Entretanto, as turbinas a vapor podem ser dotadas de extrações de vapor em regiões intermediárias da máquina para suprir um processo que requer vapor em condições diferentes do vapor de saída. Além disso, as turbinas a vapor podem possuir uma nova admissão de vapor em um ponto intermediário, que é chamada de indução. A seguir são elencadas estas configurações:

- Sangria ou tomada: Geralmente utilizada em ciclos regenerativos, alimentando aquecedores de água da caldeira, ou em processos industriais com poucas variações de fluxo e que não carecem de uma regulação rigorosa do nível de pressão do vapor;
- Extração controlada: Similar à tomada, porém, com controle do nível de pressão. Comumente utilizada em processos industriais que exigem vapor em patamares constantes de pressão. Para efetuar a regulação da pressão são instaladas válvulas de controle no canal de extração da turbina. A temperatura não é controlada.
- Indução: Trata-se de uma ou mais admissões de vapor em regiões intermediárias da turbina, adicional à admissão principal. Geralmente aplicada em ciclo de reaquecimento ou em instalações onde existe mais de uma caldeira alimentando a turbina, mas as caldeiras operam com pressões e temperaturas de vapor diferentes.

Demais informações sobre ciclos regenerativos e de reaquecimento podem ser vistos em LORA e NASCIMENTO.

4.2.4 Configuração típica em usinas sucroenergéticas modernas

Atualmente percebe-se, por diversos fatores, uma tendência para o emprego de turbinas de condensação com extração controlada de vapor nas usinas modernas. A indústria de açúcar e etanol requer vapor para o processo fabril a uma pressão constante. Para que o suprimento seja feito de forma eficiente e com aproveitamento energético do vapor de forma adequada (como foi abordado no capítulo 3), faz-se necessário o emprego de turbinas de contrapressão pura ou condensação com extração. Contudo, visando a geração de bioeletricidade, a turbina de condensação com extração apresenta algumas vantagens em relação à de contrapressão pura.

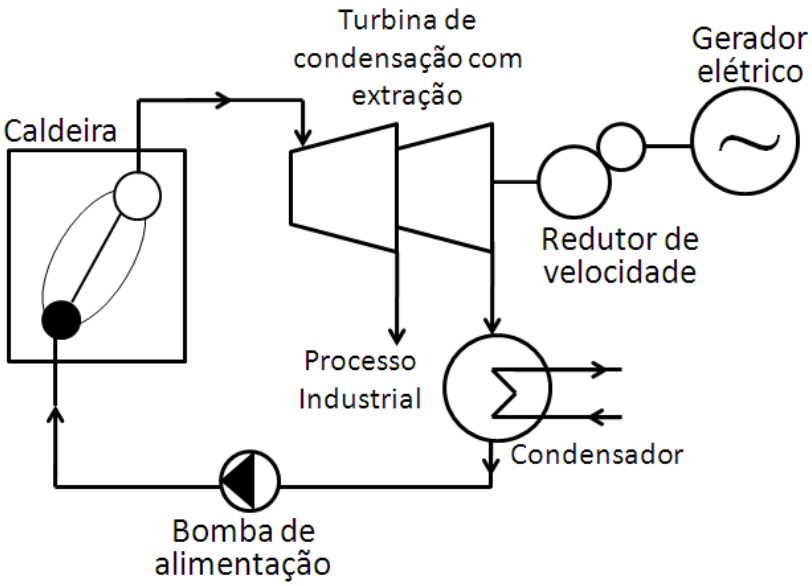


Figura 4. 9: Esquema simplificado de turbina de condensação com extração

Primeiramente, a turbina de condensação com extração é considerada uma turbina mista, ou seja, é uma turbina de condensação integrada a uma de contrapressão, em um único equipamento. Com isto pode-se reduzir investimentos em múltiplas máquinas.

Uma situação convencional em uma usina de açúcar e etanol que possui sobra de biomassa (ou seja, toda biomassa é suficiente para gerar o vapor necessário para o processo e ainda há sobra), demandaria a seguinte configuração de termelétrica: turbina de contrapressão para suprimento do vapor de processo e turbina de condensação para geração exclusiva de energia elétrica com a queima da biomassa excedente.

Com a turbina de condensação com extração é possível realizar as duas tarefas em apenas uma máquina. Por isto ela é chamada de turbina mista.

Outra grande vantagem é a absorção das oscilações de consumo de energias elétrica e térmica neste tipo de turbina, sem que uma interfira na outra. Quando da redução da carga térmica a geração de energia elétrica não é afetada e pode se manter constante elevando a quantidade de vapor que vai para o condensador para compensar a queda de vapor que vai para o processo. Quando do aumento da carga térmica, reduz-se a quantidade de vapor que vai para a parte de baixa pressão da turbina (após a válvula de extração de vapor) e a energia elétrica mantêm-se estável. Da mesma forma acontece quando das oscilações de carga elétrica ao mesmo tempo em que o vapor de processo se mantém estável. Estes controles de vapor são feitos pelas válvulas de admissão e válvulas de extração de vapor na turbina, onde, na admissão é regulado fluxo de vapor e na extração é regulado o nível de pressão para o processo, já que o fluxo é imposto pela fábrica.

Estas variações de cargas térmica e elétrica são comuns nas usinas durante o período de produção (safra). Durante a safra as variações de cargas são provocadas principalmente pela quantidade de cana que entra na usina, seleção da produção para açúcar ou etanol e eventuais paradas. Durante a entressafra não há requisição de carga térmica da indústria. Ou seja, o sistema atuará exclusivamente para geração de energia elétrica como uma máquina de condensação pura, ou com um consumo mínimo na extração para contribuir com a remoção dos gases não condensáveis da linha de água que retorna para a caldeira.

Este período de safra e entressafra da cana-de-açúcar dura um ano. Isto quer dizer que o despacho de energia elétrica para o SIN pode ser realizado durante o ano todo, dependendo do balanço de biomassa da usina.

4.3 Redutor de velocidades

Em grande parte das aplicações a rotação do eixo da turbina é superior à rotação do eixo do gerador. A rotação do gerador está associada à frequência da rede elétrica e ao número de polos da máquina. A rotação da turbina é determinada por parâmetros que envolvem o projeto construtivo da máquina como diâmetro do rotor, altura das palhetas móveis, potência requerida, resistência mecânica dos componentes e outros fatores. Para a transmissão de torque do eixo da turbina para acionamento do gerador, em situações onde as duas máquinas possuem rotações diferentes, utiliza-se o redutor de velocidades.

O redutor é uma caixa de engrenagens de eixos paralelos (normalmente um par coroa-pinhão). Estes eixos são apoiados sobre mancais de deslizamento lubrificados e refrigerados por óleo e com pontas de eixo flangeadas, na maioria dos casos, para acoplamento com a máquina motriz (turbina) e com a máquina acionada (gerador).

Figura 4.10: Redutor de velocidades
Fonte: RENK

Para as máquinas empregadas em indústrias sucroalcooleiras as turbinas podem atingir a rotação de 12.000 rpm [SIEMENS, SST-300 Steam Turbine for Economical Production of Heat and Power, 2005]. A rotação de entrada do redutor é igual à rotação da turbina e a rotação de saída igual à do gerador. Cabe salientar que as turbinas a vapor destinada à geração operam com velocidade de rotação constante.

A relação de transmissão de um redutor é calculador por:

$$i = \frac{\eta_1}{\eta_2} \tag{4.1}$$

Onde:
i = relação de transmissão
n_1 = rotação de entrada
n_2 = rotação de saída

Considerando que os geradores para este tipo de aplicação no Brasil operam com rotação de 1.800 rpm, ou seja, geradores de 4 polos, os respectivos redutores de velocidade podem atingir uma relação de transmissão de 6,67.

Também existem projetos de máquinas de grande porte onde a rotação da máquina motriz e da máquina acionada são as mesmas. Neste caso, não há necessidade de aplicação de redutores de velocidades.

4.4 Gerador

O alternador ou gerador é a máquina responsável pela conversão da energia mecânica, fornecida pela turbina, em energia elétrica. Esta conversão se dá através da interação eletromagnética entre as bobinas do rotor e do estator do gerador, componentes principais da máquina.

O rotor é o elemento girante, acoplado mecanicamente ao eixo da turbina através do redutor. O estator ou armadura é o componente fixo, montado na carcaça do gerador. No estator é induzida a tensão elétrica por meio de um campo criado no rotor.

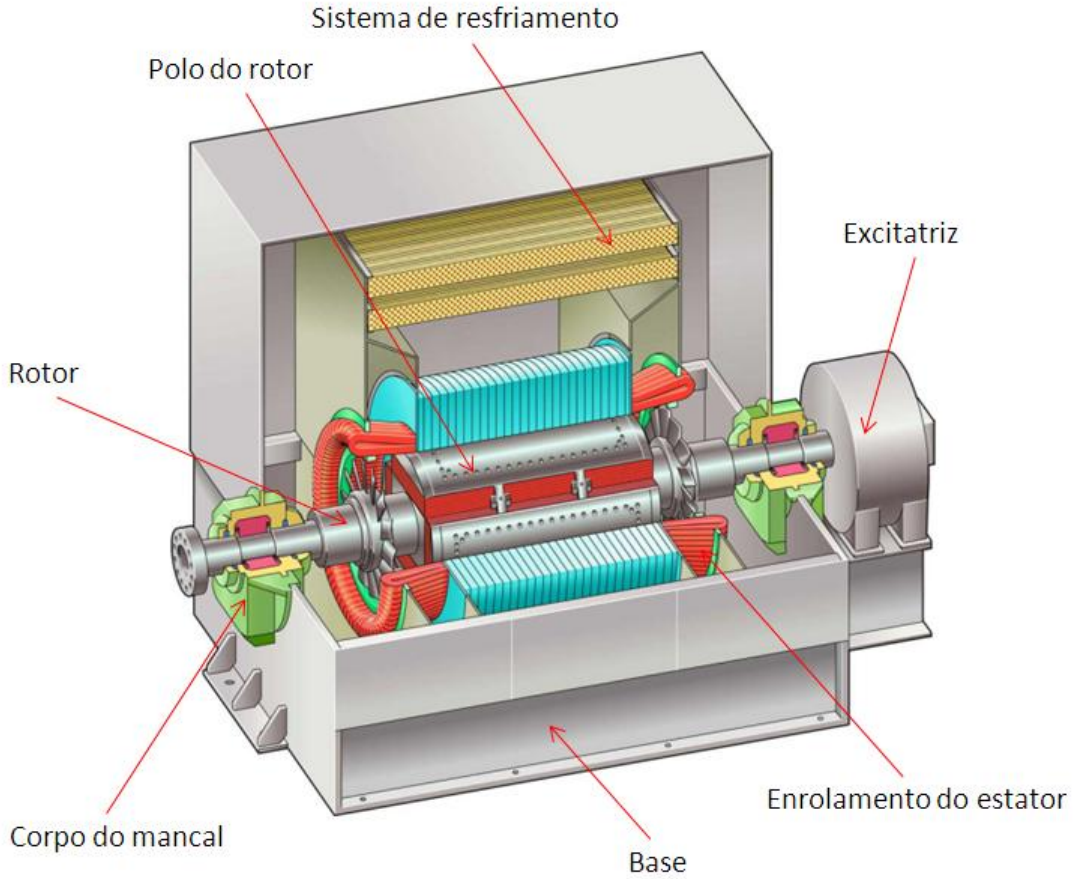


Figura 4.11: Gerador síncrono
Fonte: SIEMENS

Os principais componentes do gerador são:

- Estator ou armadura – parte fixa presa à carcaça do gerador e que aloja os enrolamentos que são submetidos à indução e produzem a força eletromotriz. Este é o induzido da máquina;
- Rotor – parte girante que aloja as bobinas de campo. Estas bobinas são responsáveis pela indução eletromagnética nas bobinas da armadura. Este é o indutor da máquina;

- Mancais – peças que promovem a sustentação do rotor. Estas são continuamente lubrificadas por óleo durante a operação a fim de facilitar o movimento de rotação do eixo e refrigerar o ponto de contato entre os componentes;
- Excitatriz – fonte de corrente contínua responsável pela alimentação das bobinas do indutor a fim de controlar o nível de tensão do gerador;
- Sistema de refrigeração – podem ser o tipo ar-ar ou ar-água. Responsável por manter a temperatura do gerador sob determinados limites operacionais.

Os geradores empregados em termelétrica a biomassa da cana são de eixo horizontal, de pequeno diâmetro e longo comprimento. E são do tipo síncrono trifásico, isto é, cuja rotação de operação está diretamente relacionada ao número de polos magnéticos e a frequência, como mostra a equação a seguir.

$$\eta = \frac{f}{p} \tag{4.2}$$

Onde:
η = rotação do eixo [rps]
f = frequência [Hz]
p = par de polos magnéticos

Na composição do turbogerador, o gerador é a parte do conjunto que está conectada mecanicamente à máquina motriz e eletricamente à carga. Através do seu sistema de controle e assegurado por dispositivos de proteção nas instalações elétricas, o gerador pode suprir de energia tanto as cargas internas da indústria quanto a rede elétrica local, simultânea ou individualmente. Também podem operar em paralelo com outros geradores.

Na indústria sucroalcooleira, os geradores típicos podem atingir a potência de 50MW. Estes geradores são constituídos de quatro polos magnéticos. Geradores com potências superiores a esta, geralmente possuem dois polos magnéticos e as turbinas são construídas para operarem na mesma rotação do gerador, dispensando o uso de redutor de velocidades.

4.5 Sistema de condensação

Obviamente, este sistema se faz necessário somente quando da utilização de turbinas de condensação. Turbinas de contrapressão não requerem este sistema.

O condensador é um trocador de calor no qual se realiza a conversão do vapor de exaustão da turbina ao estado líquido, a fim de reutilizar a água no ciclo térmico para alimentação da caldeira. A maioria dos projetos utiliza água como fluido de resfriamento, no entanto, existem projetos que utilizam refrigeração a ar, geralmente em locais com poucos recursos hídricos.

Para manter um nível adequado de vácuo no condensador é necessário remover constantemente os gases não condensáveis. Para isto são utilizados ejetores que operam com vapor. Também existem projetos com bombas de vácuo.

O vapor de exaustão da turbina entra no condensador e a condensação ocorre quando o vapor entra em contato com a superfície dos tubos, os quais são constantemente resfriados pela água que circula no interior dos mesmos com o auxílio de uma bomba. Esta água é proveniente de uma torre de resfriamento. Não há contato algum do vapor com a água de resfriamento. Os tubos no interior do condensador são dotados de alta resistência à erosão e corrosão, já que sua parede externa permanece em constante contato com vapor e gases incondensáveis que são arrastados com o vapor e apresentam características corrosivas. O ejetor a vapor remove os gases não condensáveis do interior do condensador e mantém um nível de vácuo ótimo para operação da turbina, levando em consideração que, quanto melhor for o vácuo produzido, melhor será o aproveitamento energético do vapor no interior da turbina. O conceito é garantir que o vapor, ao sair da turbina, tenha esgotado ao máximo seu potencial energético, transformando a energia térmica do vapor em energia mecânica no eixo da máquina. Ou seja, a potência mecânica produzida pela turbina de condensação está diretamente associada à atuação dos ejetores no sistema de condensação. Uma elevação do nível de pressão do vapor de exaustão da turbina tende a comprometer a performance do conjunto.

Diferentemente das turbinas de contrapressão, a pressão no escape da turbina de condensação não está associada ao processo industrial. O dimensionamento desta pressão é livre, restringindo-se apenas às limitações mecânicas de projeto da turbina e do condensador.

O condensado é coletado em um poço montado na parte inferior do feixe tubular e possui volume suficiente para garantir a operação adequada das bombas de condensado.

As figuras a seguir apresentam um condensador de vapor, um esquema de ejetor a vapor e um fluxograma de um sistema de condensação.

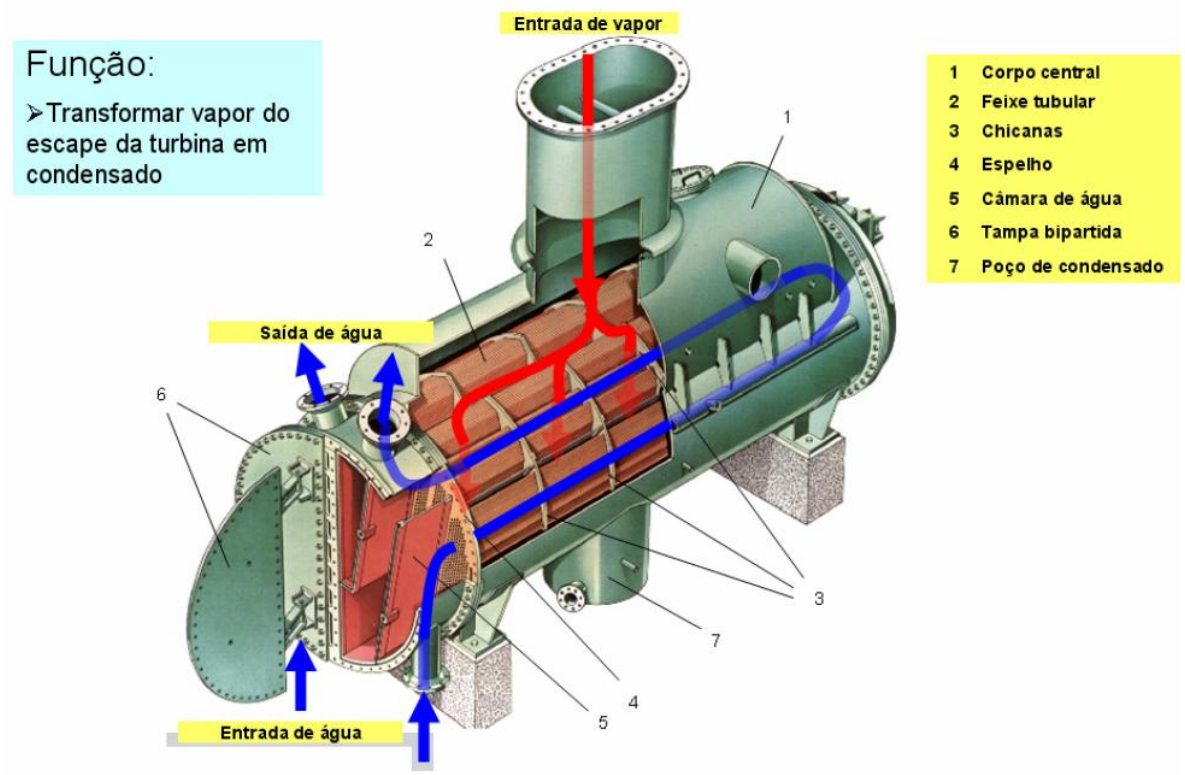


Figura 4.12: Condensador refrigerado a água tipo casco-tubo
Fonte: BRESSAN

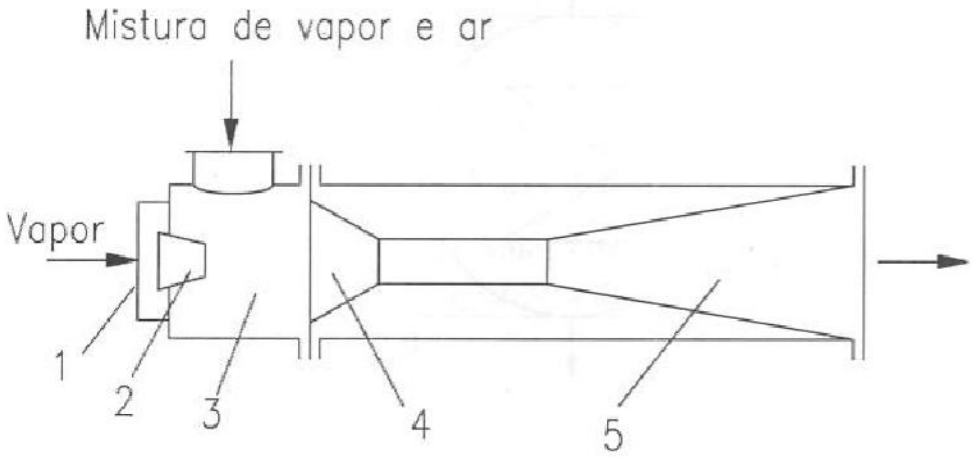


Figura 4.13: Esquema de um ejetor a vapor . 1. Câmara recebedora; 2. Bocal; 3. Câmara de mistura; 4. Seção do canal com redução da seção transversal; 5. Difusor.
Fonte: LORA e NASCIMENTO

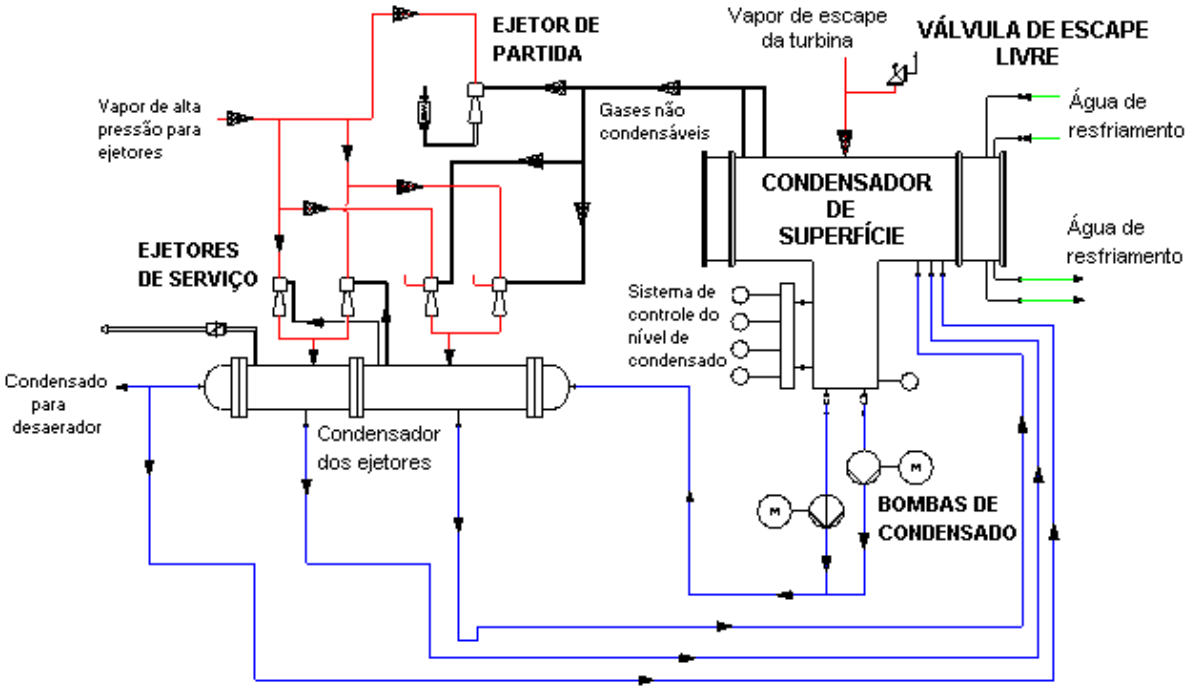


Figura 4.14: Esquema básico de um sistema de condensação para turbinas a vapor
Fonte: BARROS

Capítulo 5

5. Dimensionamento de uma Termelétrica a Vapor – Metodologia e Viabilidade Econômica

Este capítulo tem como objetivo avaliar os conceitos básicos para dimensionamento de uma usina termelétrica para geração de bioeletricidade numa indústria sucroalcooleira e avaliar a possibilidade de cogeração por meio da disponibilidade de energia térmica das turbinas. Serão abordados os critérios para seleção das caldeiras e turbinas, além da análise do balanço termelétrico da planta após implementação do sistema de geração e o potencial de geração de energia elétrica excedente para comercialização.

5.1 Levantamento da biomassa disponível

Vale recordar que, de acordo com a ilustração da figura 3.14 (esquema simplificado de sistema de potência a vapor), a usina termelétrica é basicamente constituída de caldeira, turbina, gerador e, em alguns casos, condensador de vapor. Para determinação do potencial de geração de energia e dimensionamento dos equipamentos da usina, faz-se necessário o levantamento da quantidade de biomassa disponível na indústria e a forma como ela será utilizada.

A produção da biomassa (bagaço e palha da cana) está diretamente relacionada com a quantidade de cana processada na usina. Segundo dados da UNICA as equivalências típicas para a produção de bagaço e palha para cada tonelada de cana processada, são as seguintes:

Cana processada	Biomassa correspondente
1 t cana	250 kg bagaço
1 t cana	200 kg palha

Figura 5. 1: Produção de biomassa por tonelada de cana processada
Fonte: UNICA

Estes valores podem variar em função da época e da região da colheita. Entretanto, o que se observa entre as usinas é uma pequena variação, o que leva a crer que estes dados podem ser considerados de forma confiável para estimativa da quantidade de biomassa produzida durante uma safra, a partir da quantidade de cana-de-açúcar processada durante o período.

Cabe salientar que a colheita da cana-de-açúcar tem seu período de safra e entressafra. No estado de São Paulo, o período de safra geralmente é entre os meses de abril a novembro de cada ano. Portanto, para levantamento da biomassa produzida deve ser considerada a produção durante este período, onde a cana é processada.

5.2 Levantamento do potencial de geração de vapor

O potencial de geração de vapor numa usina está diretamente associado à quantidade de biomassa disponível para utilização como combustível e as características e performance das caldeiras.

O primeiro passo é a determinação dos parâmetros de pressão e temperatura de vapor que, juntamente com a vazão mássica, regem o dimensionamento da caldeira geradora de vapor.

Atualmente, levando em consideração que as grandes e mais modernas usinas do setor estão optando pela maior produção de bioeletricidade em conjunto com a produção de açúcar e etanol, os parâmetros de pressão e temperatura típicos selecionados para geração de vapor são aqueles que favorecem a eficiência na geração de energia elétrica. Estes valores típicos combinados são aproximadamente 65 bar[1] e 510°C [HPB Engenharia e Equipamentos, 2011], podendo variar para valores ligeiramente superiores. Porém, também existem usinas que operam com condições de vapor de 100 bar e 540°C, como é o caso da Usina São Fernando em Dourados-MS[HPB Engenharia e Equipamentos, 2011].

O processo de fabricação de açúcar e etanol, que requer vapor com pressão em torno de 2,5 bar, não sofre impacto pela escolha de parâmetros mais altos de vapor na saída das caldeiras, tendo em vista que a própria turbina, responsável pela geração de bioeletricidade, deve disponibilizar o vapor nas condições úteis para o processo, seja através do seu escape ou por meio de uma sangria na parte intermediária de sua carcaça. Durante a operação, caso ocorra alguma falha na turbina, válvulas redutoras de pressão juntamente com dessuperaquecedores (que são resfriadores de vapor por meio de jatos d'água) são utilizados para garantir continuidade do processo.

[1] Todas as pressões mencionadas na unidade [bar] são pressões absolutas.

Portanto, a determinação destes parâmetros de vapor se dará por questões de aumento do potencial de geração de energia elétrica e custo do investimento das caldeiras, tendo em vista que o par pressão-temperatura impacta diretamente na espessura dos tubos e no material a ser utilizado nas caldeiras, além de outros periféricos como dimensionamento de bombas, tubulações de linha, válvulas, etc.

A análise da energia contida no vapor é feita através do diagrama de Mollier (figura 5.2). O vapor em alta temperatura e pressão é dotado de uma energia, estando esta em forma de vibrações intermoleculares. Esta energia é denominada entalpia.

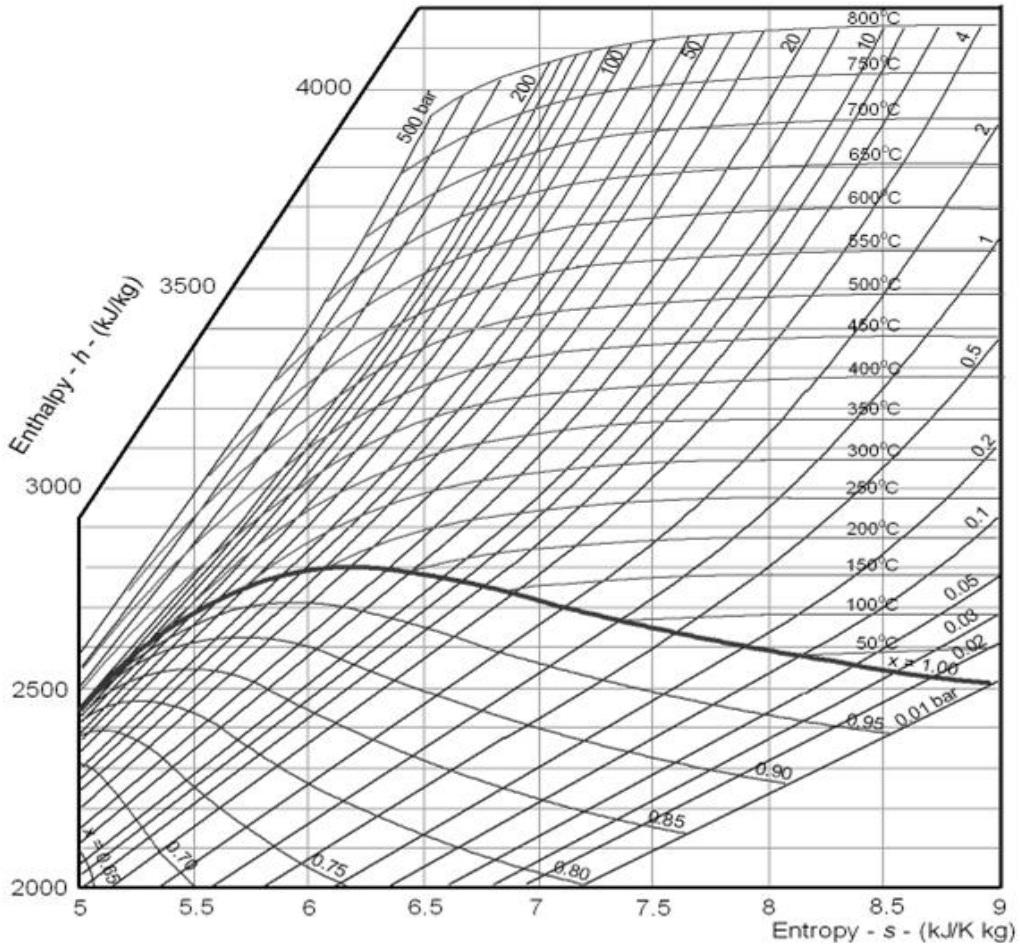


Figura 5. 2: Diagrama de Mollier
Fonte: Engineering Tollbox

Através do diagrama de Mollier é que se obtém o valor correspondente de entalpia para cada par pressão-temperatura. A seguir um exemplo de valores de entalpia obtidos do diagrama de Mollier para uma pressão de 30 bar e temperatura variável.

Pressão - p = 30,0 bar	
Temperatura - T (°C)	Entalpia - H (kJ/kg)
240	2824,3
280	2941,3
320	3043,4
360	3138,7
400	3230,9
440	3321,5
500	3456,5

Figura 5. 3: Propriedades do vapor de água superaquecido
Fonte: LORA e NASCIMENTO

Quanto maior for a queda de energia entálpica contida no vapor, maior será o potencial de geração de energia elétrica. Maiores detalhes desta análise serão abordados no tópico seguinte, quando da avaliação dos critérios para dimensionamento das turbinas.

Adicionalmente, para dimensionamento das caldeiras, deve-se ter posse da vazão de combustível durante o regime de operação. A quantidade de vapor gerado por uma caldeira pode ser calculado da seguinte forma:

$$m = \frac{PCI \cdot Q}{H_2 - H_1} \cdot \eta \tag{5.1}$$

Onde:
m = Vazão mássica de vapor (t/h)
PCI = Poder Calorífico Inferior do combustível (kJ/kg)
Q = Vazão de combustível (t/h)
H_1 = Entalpia da água de alimentação da caldeira (kJ/kg)
H_2 = Entalpia do vapor que sai da caldeira (kJ/kg)
η = Rendimento

Como mencionado anteriormente, a entalpia do vapor e do condensado pode ser obtida através do diagrama de Mollier após determinação do par pressão-temperatura do vapor e da temperatura do condensado que entra na caldeira. O PCI é característico do combustível, seja ele bagaço, palha ou combinação de ambos. O rendimento da máquina sofre influência da variação destes parâmetros e dos métodos construtivos adotados pelo fabricante.

Certamente, devido às variações de processo, a usina não opera durante todo o tempo requerendo a mesma quantidade de vapor das caldeiras. Esta quantidade irá variar em função da produtividade da indústria durante a fabricação de açúcar, etanol, bioeletricidade e outros subprodutos da usina como a levedura seca e a vinhaça. Durante a entressafra, as caldeiras também geram pouca quantidade de vapor, ou até mesmo não operam, tendo em vista que os equipamentos que mais demandam vapor na indústria como os evaporadores, cozedores, destilarias e trocadores de calor ficam inativos para inspeção, manutenção e testes.

Na maioria dos casos, o vapor necessário para suprimento do processo, não requer a utilização de toda biomassa produzida. Esta biomassa excedente pode ser utilizada exclusivamente para geração de energia em turbinas de condensação. Este é o método mais recomendado visando o aproveitamento do combustível disponível na indústria para geração de bioeletricidade e aumento da receita com a comercialização desta energia. Em casos onde a biomassa excedente não é utilizada para fins de geração, ela pode ser vendida para outras indústrias.

5.3 Seleção das turbinas

O dimensionamento e seleção do modelo das turbinas estão diretamente associados ao balanço energético da planta que compreende consumo de energia térmica e elétrica. Diferentemente de uma usina exclusiva para geração de energia elétrica, a maioria das turbinas a vapor instaladas nas indústrias de açúcar e etanol são turbinas de cogeração, ou seja, disponibilizam energia elétrica e térmica simultaneamente para o processo industrial.

Alguns aspectos, além dos já mencionados neste capítulo, devem ser avaliados para seleção adequada das turbinas, como:

- Consumo de vapor na fábrica;
- Sobra de biomassa;
- Consumo de energia elétrica da fábrica.

O consumo de vapor da fábrica está relacionado à produtividade e desempenho dos equipamentos que demandam vapor. Este desempenho provoca impacto direto na quantidade de biomassa que sobra na usina e pode ser utilizada exclusivamente para produção de bioeletricidade. Ou seja, quanto menor o consumo específico de vapor por unidade de cana processada (geralmente medido em quilogramas de vapor por tonelada de cana), menor será o consumo de combustível e maior será a disponibilidade de biomassa para geração de energia elétrica.

O balanço entre energia elétrica produzida e o consumo na planta é que determinará a quantidade de energia a ser importada ou exportada para a rede concessionária.

5.3.1 Cálculo da potência

Os turbogeradores a vapor, responsáveis pela geração de bioeletricidade, atuam como válvulas redutoras de pressão, disponibilizando o vapor para o processo industrial nas condições pré-estabelecidas para a operação. A grande vantagem em relação às válvulas redutoras é que a turbina aproveita a energia contida no vapor para efetuar trabalho mecânico útil para geração de energia. Este aproveitamento energético para geração de energia elétrica pode ser calculado da seguinte forma:

$$P_e = m \cdot \Delta H \cdot \eta \tag{5.2}$$

Onde:
P_e = Potência elétrica nos terminais do gerador (kW)
m = Vazão mássica de vapor (kg/s)
ΔH = Queda de energia entálpica (kJ/kg)
η = Rendimento do conjunto

Entende-se queda de energia entálpica como a diferença de entalpia entre os canais da turbina (entrada e saída de vapor). O rendimento do conjunto será o produto dos rendimentos de cada componente (turbina, redutor – quando aplicável – e gerador).

Para melhor compreensão da aplicação da equação exposta, a seguir mostra-se uma simulação de cálculo de potência de turbogerador.

Dados de vapor:

Vapor de entrada	
Pressão (bar)	65
Temperatura (°C)	510
Vazão (kg/s)	55,6
Vapor de saída	
Pressão (bar)	2,5
Temperatura (°C)	127
Vazão (kg/s)	55,6

Seguindo a orientação do diagrama de Mollier são obtidos os valores correspondentes de entalpia (H) para os conjuntos de pressão e temperatura na entrada e saída da turbina, como segue:

Entalpias	
Entrada (kJ/kg)	3440,1
Saída (kJ/kg)	2643,4
ΔH (kJ/kg)	796,7

Rendimentos	
Turbina	88,0%
Redutor	98,5%
Gerador	98,1%
Conjunto turbogerador	85,0%

Fazendo uso da equação 5.2, tem-se:

55,6 kg/s · 796,7 kJ/kg · 85% = 37.652 kW

O exemplo da aplicação da equação 5.2 e a observação do diagrama de Mollier mostram que quanto maior for a entalpia do vapor na entrada da turbina ou menor a entalpia na saída, maior será a geração de energia elétrica. O par pressão-temperatura na saída da turbina geralmente é imposto pelas condições de processo (turbinas de contrapressão) ou por limitações físicas das máquinas (turbinas de condensação). Porém, para a entrada, estes dados podem ser determinados em conjunto com o projeto da caldeira. Por isto, a seleção do par pressão-temperatura na entrada da turbina está diretamente associada à demanda de bioeletricidade, além, obviamente, das questões econômicas e de investimentos em caldeiras e turbogeradores maiores.

Os critérios construtivos de comprimento e diâmetro do eixo, número de estágios, dimensão de flanges, válvulas, dispositivos de controles, etc., devem ser avaliados caso a caso dependendo da potência da turbina e das condições de vapor de entrada e saída.

5.3.2 Seleção do tipo de turbina

Como apresentado no capítulo 4, as turbinas a vapor podem ser de dois tipos: contrapressão e condensação. A primeira tem seu escape de vapor conectado ao processo industrial que requer vapor em pressão superior à atmosférica. A segunda não alimenta processo industrial (no caso de turbinas sem sangrias ou extrações controladas de vapor) e seu escape de vapor é

conectado a um condensador de vapor, que opera sob vácuo, para recuperação do fluido num sistema fechado.

A seleção do tipo de turbina no dimensionamento da usina termelétrica dentro da indústria sucroalcooleira dependerá da demanda de vapor para o processo fabril e a quantidade de biomassa excedente para geração de energia.

A turbina de contrapressão é totalmente dedicada ao processo fabril. Como seu escape de vapor está conectado à linha de suprimento para o processo, todo o vapor que passa pela turbina alimenta a fábrica. A flutuação de potência elétrica nos terminais do gerador é consequência direta da variação de fluxo de vapor para a fábrica. Portanto, neste caso, a energia elétrica estará disponível à medida que o processo solicitar vapor da turbina, já que a geração está diretamente associada ao fluxo de vapor na máquina. Neste caso, não haverá geração de energia elétrica se não houver produção industrial.

A turbina de condensação pura é dedicada exclusivamente para geração de energia elétrica e não há suprimento de vapor de processo. Neste caso, há controle de geração já que o fluxo de vapor é determinado pela necessidade de energia elétrica e não pela demanda de vapor para a fábrica. A turbina de condensação pode ser selecionada nos casos em que há biomassa excedente e o vapor, que é possível gerar, não será utilizado para a fabricação de açúcar e etanol. Sua viabilidade está relacionada ao consumo específico de vapor da indústria, que propicia a biomassa excedente.

Ainda pode-se selecionar uma turbina de condensação com extração controlada de vapor. Esta turbina também é selecionada nos casos em que há biomassa excedente. Este tipo de turbina é capaz de suprir a fábrica com vapor através de um dispositivo de controle que retira vapor numa parte intermediária da máquina. Ou seja, a quantidade de vapor na entrada da máquina é superior à necessidade fabril. Uma parcela do vapor que entra na máquina sai de um flange intermediário para o processo e o restante (excedente devido à sobra de biomassa) permanece exercendo trabalho na extensão da turbina até o escape para esgotamento máximo da energia do vapor e potencialização da capacidade de geração de energia da turbina, já que quanto menor for a pressão de escape (operação sob vácuo), maior será a queda entálpica e, consequentemente, a potência gerada. Por essa característica, a turbina de condensação com extração controlada de vapor é a mais versátil, indicada em aplicações diversas, já que atua com uma máquina integrada que compõe os dois tipos de turbinas em uma só.

A turbina de condensação com extração apresenta outras vantagens como o balanceamento da carga da caldeira para melhor aproveitamento de sua eficiência. Quando da utilização da turbina de contrapressão pura, a variação

de fluxo de vapor da caldeira e turbina fica submetida à necessidade da fábrica. Na turbina de condensação com extração, toda variação de fluxo de vapor pode ser absorvida no condensador, sem tirar a caldeira de seu regime de operação. Caso o processo fabril solicite menos vapor, a caldeira pode continuar fornecendo vapor para a turbina e a quantidade que não é utilizada na fábrica segue para a parte de baixa pressão da turbina (após as válvulas de controle de extração) para geração e alimentação do condensador. Este é o chamado vapor de condensação. Caso a fábrica solicite mais vapor, diminui-se a condensação, porém, mantendo a caldeira em regime. Ou seja, este tipo de turbina funciona como um "pulmão" que absorve as variações de carga térmica sem transmiti-las à caldeira, produzindo melhor balanceamento da planta.

A limitação de seleção de turbina de condensação com extração ao invés de uma turbina de contrapressão e outra de condensação, em casos em que há biomassa excedente, está geralmente no tamanho das máquinas. Turbogeradores muito grandes e que excedem a potência de 50MW ainda não possuem fabricação totalmente nacional. Alguns componentes, incluindo o gerador, são importados e podem submeter a operação a um risco quando da reposição imediata de peças, necessidade de técnicos especializados no país para pronto atendimento de assistência técnica, além das questões econômicas como variação cambial e taxas de importação.

Cabe salientar que o balanço energético deve ser concebido para os períodos de safra e entressafra. Durante a entressafra, como não há solicitação de processo devido à parada de máquinas, a turbina de contrapressão não opera. Já a turbina de condensação tem sua operação flexível. Como ela não está associada ao processo térmico, pode operar sempre que há biomassa excedente, seja na safra ou entressafra. É comum que a turbina de condensação opere durante a entressafra para contribuir com o esgotamento da biomassa excedente produzida durante a moagem na safra. A turbina de condensação com extração deve necessariamente operar na safra, devido à demanda de carga térmica, e tem sua operação flexível na entressafra, pois ficará em função da biomassa disponível na usina.

5.4 Levantamento do consumo de energia elétrica e potencial para comercialização

Análogo ao consumo de vapor na fábrica, o consumo de energia elétrica em cada indústria depende da quantidade de cana processada, modernidade dos equipamentos, desempenho, variações de processo e outros fatores. O levantamento do consumo de energia elétrica dentro da indústria é

fundamental para determinação do potencial da quantidade de energia a ser comercializada, seja no mercado regulado, via leilões, ou no mercado livre.

Atualmente, das 438 usinas brasileiras, mais de 300 ainda não exportam energia, segundo dados da UNICA. Há um potencial muito grande de geração de bioeletricidade neste segmento.

A análise do consumo de energia elétrica destas indústrias não é uma tarefa complexa, tendo em vista que o histórico de consumo retrata a realidade da indústria. No entanto, sabe-se que a usina termelétrica é dotada de equipamentos que consomem energia elétrica como motores elétricos, painéis, dispositivos de controle e outros. Portanto, para atualização dos dados de consumo da indústria, durante a concepção do projeto deve ser feito o levantamento da demanda de energia elétrica a ser adicionada quando da implementação da usina termelétrica. Este será o consumo projetado para a indústria durante a operação da termelétrica.

O cálculo da energia útil para exportação é feito através da simples diferença entre a energia gerada e o consumo da indústria durante o período de análise, comumente adotado um ano.

5.5 Simulação de implantação de usina termelétrica

Este tópico apresenta uma simulação de dimensionamento de uma termelétrica durante a concepção da indústria, ou seja, em projetos denominados *greenfields*. Entende-se *greenfield* como as áreas úteis para construção de uma usina de açúcar e etanol ou mesmo a própria indústria a ser construída.

Durante a fase de concepção são analisados diversos dados agrícolas e de processo industrial. Mas é com base nas informações de potencial de geração e consumo de vapor na fábrica, que se inicia o estudo para dimensionamento do sistema de geração de energia elétrica. Toda indústria sucroalcooleira, pela sua característica de contínuo fluxo de vapor, tem potencial para geração de energia elétrica. O balanço deve ser feito sempre com foco no aproveitamento máximo da energia do vapor dentro das turbinas, sem comprometer o suprimento de vapor para o processo. Neste caso, as turbinas serão responsáveis pela alimentação de vapor processual simultaneamente à produção de bioeletricidade, formando o ciclo de cogeração.

Com base nos dados da UNICA para o ranking das maiores produtoras do setor no Estado de São Paulo na safra 2008/2009, obtêm-se um valor médio anual em torno de 2.000.000 de toneladas de cana processada por usina, entre 169 usinas produtoras de açúcar e etanol avaliadas.

A seguir são apresentadas as simulações de cálculos de uma indústria *greenfield* com moagem anual prevista de 2.000.000 de toneladas de cana, segundo a média anual apresentada pela UNICA, levando em consideração que esta seria uma usina de médio porte. As demais informações como tempo de safra, aproveitamento do tempo, percentual de bagaço e palha e outros, foram obtidos em entrevistas com grandes usinas do setor e informações coletadas da UNICA. As fórmulas aplicadas correspondem às equações 5.1 e 5.2 e os valores de entalpia foram obtidos através do diagrama de Mollier (figura 5.2). O foco da simulação está direcionado para a determinação da caldeira e turbogerador, equipamentos que estabelecem os parâmetros para que se dimensionem os demais componentes como torre de refrigeração, painéis elétricos, transformadores e subestação. A definição da estratégia de operação será feita juntamente com a análise das alternativas de dimensionamento. É a estratégia de operação que vai determinar qual solução será adotada para o maquinário.

Embora a simulação trate de um *greenfield*, o conceito de cálculo pode ser adotado para indústrias existentes que pretendam promover projetos de modernização a fim de favorecer o ganho energético na geração elétrica.

5.5.1 Premissas do projeto

A. Dados agrícolas e industriais

Moagem anual em toneladas de cana	2.000.000 t
Tempo de safra	240 dias
Aproveitamento de tempo	85%
Relação bagaço/cana	25%
Utilização da palha	Não
Consumo específico de vapor por tonelada de cana	450 kg/t
Consumo específico médio de eletricidade por tonelada de cana	30 kWh/t
PCI do bagaço	7.536 kJ/kg
PCI da palha	12.811 kJ/kg
Reserva de bagaço para partidas da caldeira	4% do total produzido

B. Dados da caldeira

Pressão do vapor de saída	65 bar
Temperatura do vapor de saída	510°C
Entalpia do vapor	3.440 kJ/kg
Pressão da bomba de alimentação	85 bar
Temperatura de água de alimentação	116°C
Entalpia da água de alimentação	493 kJ/kg
Eficiência da caldeira	86%

C. Dados dos turbogeradores

Pressão do vapor de entrada	63 bar
Temperatura do vapor de entrada	505°C
Pressão do vapor de escape (processo fabril)	2,5 bar
Queda entálpica @ 2,5 bar	787 kJ/kg
Pressão do vapor de condensação	0,1 bar
Queda entálpica @ 0,1 bar	1.254 kJ/kg
Eficiência do turbogerador de contrapressão	83%
Eficiência do turbogerador de condensação	81%
Eficiência do turbogerador de condensação com extração	82%

5.5.2 Levantamento da biomassa

Na determinação da biomassa residual total para cogeração se faz necessário obter o tempo efetivo de moagem de cana na usina, como segue:

D. Tempo de safra

O período efetivo de operação da usina durante a safra leva em consideração o tempo de parada por motivos de chuva, manutenção e/ou paradas emergenciais.

Tempo de safra	240 dias
Aproveitamento do tempo	85%
Tempo efetivo de safra (dias)	204 dias
Tempo efetivo da safra (h)	4.896 h

E. Moagem

O propósito é levantar a moagem horária média, valor que pode ser obtido com a moagem total durante a safra dividido pelo tempo efetivo de operação da safra.

Moagem total na safra	2.000.000 t
Moagem diária	9.804 t/dia
Moagem horária	408,5 t/h

F. Biomassa total produzida

A biomassa da cana é composta pela palha e pelo bagaço que juntos representam aproximadamente 2/3 do potencial energético da cana. Levando em consideração que para esta simulação a palha não está sendo aproveitada para queima na caldeira e é descartada e/ou queimada no campo, o cálculo será direcionado para o aproveitamento apenas do bagaço. De posse da relação bagaço/cana, a quantidade média horária de bagaço produzido durante a safra pode ser facilmente obtida.

Relação bagaço/cana	25%
Moagem horária	408,5 t/h
Produção de bagaço	102,1 t/h

5.5.3 Demanda de vapor e sobra de biomassa

Pensando na possibilidade de seleção da turbina de condensação (com ou sem extração), se faz necessário o levantamento da sobra de biomassa que será destinada exclusivamente para geração de energia. Este levantamento carece de alguns dados como a quantidade total de vapor que será destinado à fabricação de açúcar e etanol, a relação vapor/bagaço da caldeira e a quantidade de bagaço que deve ser reservada para as eventuais partidas da caldeira.

G. Relação vapor/bagaço da caldeira

Para o cálculo da caldeira é considerada a aplicação da equação 5.1. Percebe-se pela equação que há uma relação direta entre a vazão de combustível e a vazão de vapor gerado. Esta relação é definida por:

$$\frac{m}{Q} = \frac{PCI \cdot \eta}{H_2 - H_1} \tag{5.3}$$

Com base nas premissas da caldeira no item 5.5.1 e na equação 5.3, obtém-se o seguinte valor para m/Q:

$$\frac{m}{Q} = \frac{7.536\,\frac{kJ}{kg} \cdot 86\%}{3.440\,\frac{kJ}{kg} - 493\,\frac{kJ}{kg}} = 2{,}2\ (adimensional)$$

O dimensionamento da vazão da caldeira ainda não é feito nesta etapa. Este parâmetro, que definirá o tamanho da caldeira, só será avaliado após determinação do tipo de turbina(s) e em que período será a operação (safra e/ou entressafra) para o consumo da sobra de bagaço. A determinação correta destes dados é fundamental para o dimensionamento da termelétrica, tendo em vista o tamanho, principalmente, da caldeira e da(s) turbina(s), itens de maior expressão no cálculo do investimento para implantação da planta de geração.

H. Consumo de vapor da usina e sobra de bagaço

Aqui são analisados em conjunto as informações de consumo de vapor da indústria, reserva de bagaço para partida da caldeira e o resultado de sobra de bagaço que será destinado exclusivamente para geração de bioeletricidade.

Considerando que o consumo específico de vapor de processo por tonelada de cana da indústria é 450 kg/t, o consumo horário pode ser facilmente obtido da seguinte forma:

$$v_h = \frac{v_e \cdot c_h}{1.000} \tag{5.4}$$

Onde:
v_h : consumo horário de vapor (t/h)
v_e : consumo específico de vapor (kg/t)
c_h : moagem horária de cana (t)

Sendo a moagem horária igual a 408 t/h o consumo horário de vapor será de:

$$v_h = \frac{450\,\frac{kg}{t} \cdot 408{,}5\,\frac{t}{h}}{1.000} = 183{,}8\,\frac{t}{h}$$

Já o consumo horário de combustível pode ser obtido da seguinte forma:

$$b_h = \frac{v_h}{m/Q} \tag{5.5}$$

Onde:
b_h : consumo horário de bagaço (t/h)

Com v_h = 183,8 t/h e m/Q = 2,2, obtém-se b_h igual a 83,6 t/h.

Considerando que a produção horária de bagaço é de 102,1 t/h, o cálculo anterior comprova que o bagaço resultante da moagem da cana nesta usina é suficiente para suprimento de vapor para o processo industrial e ainda há uma quantidade que pode ser destinada apenas para geração de bioeletricidade. Cabe ressaltar que durante a alimentação do processo fabril, já há geração de bioeletricidade através da turbina de contrapressão ou através da extração de turbina composta (condensação com extração).

Retomando os cálculos, a sobra horária de bagaço será de 18,5 t/h, diferença entre a produção e o consumo horários.

A sobra total de biomassa disponível para utilização exclusiva na geração de energia elétrica é calculada da seguinte forma:

$$b_b = (s_b \cdot t) - b_r \tag{5.6}$$

Onde:
b_b : quantidade de bagaço para uso exclusivo na geração de bioeletricidade (t)
s_b : sobra horária de bagaço (t/h)
t : tempo efetivo de moagem (h)
b_r : reserva de bagaço para partidas da caldeira (t)

A reserva de bagaço para partidas da caldeira representa 4% de todo bagaço produzido conforme estabelecido nas premissas. Este é um valor comumente adotado pelas usinas para ser utilizado nas partidas da caldeira em eventuais paradas emergenciais ou por motivos de chuva, onde não há entrada de cana na indústria. Neste caso, a reserva de bagaço será de 20.000 t (4% de 500.000 t de bagaço produzidos). Sendo assim, têm-se os seguintes parâmetros:

Sobra horária de bagaço (s_b)	18,5 t/h
Tempo efetivo de moagem (t)	4.896 h
Reserva de bagaço para partidas da caldeira (b_r)	20.000 t

Com (s_b·t) = 90.697 t e b_r = 20.000 t, obtém-se pela diferença, conforme equação 5.6, que o bagaço total útil para geração exclusiva de energia elétrica é 70.697 t por safra.

5.5.4 Seleção das turbinas e caldeira

De posse dos dados de vapor da indústria e do balanço de biomassa, os turbogeradores podem ser calculados. No entanto, existem diversas configurações para as turbinas dependendo da estratégia de operação de indústria. A decisão, em geral, é tomada adotando os critérios de segurança operacional associada ao investimento na solução.

Para o dimensionamento da caldeira, tendo em vista que todo o vapor necessário para alimentação do processo industrial passa pela(s) turbina(s), a vazão de admissão de vapor na turbina em seu pico de operação corresponde à vazão máxima de vapor da caldeira.

Os cálculos a seguir são realizados com base na equação 5.2 e as premissas contidas no item 5.5.1. A simulação apresenta algumas configurações de turbinas que poderiam atender a operação desta usina. As alternativas são selecionadas considerando estratégias diferentes de operação: operação apenas na safra, operação na safra e entressafra, seleção de apenas uma turbina e seleção de duas turbinas de diferentes tipos.

O propósito fundamental desta etapa de cálculo é atingir o maior potencial de geração com o menor investimento possível. Por este motivo são calculados diferentes cenários ordenados da seguinte forma:

1. Duas turbinas, sendo uma de contrapressão e uma de condensação pura para operação apenas na safra;
2. Duas turbinas, sendo uma de contrapressão e uma de condensação com extração operando apenas na safra com as potências equalizadas;
3. Apenas uma turbina de condensação com extração operando somente na safra;
4. Apenas turbina de condensação com extração operando na safra e entressafra

Todas estas alternativas são funcionais, entretanto há diferenças significativas de investimentos entre elas. Ao final dos cálculos das turbinas é feita uma comparação entre as alternativas apresentando suas vantagens e desvantagens e qual é o melhor cenário a ser adotado para a usina, objeto da simulação.

A dinâmica do cálculo do potencial de geração de bioeletricidade pode ser representada da seguinte forma:

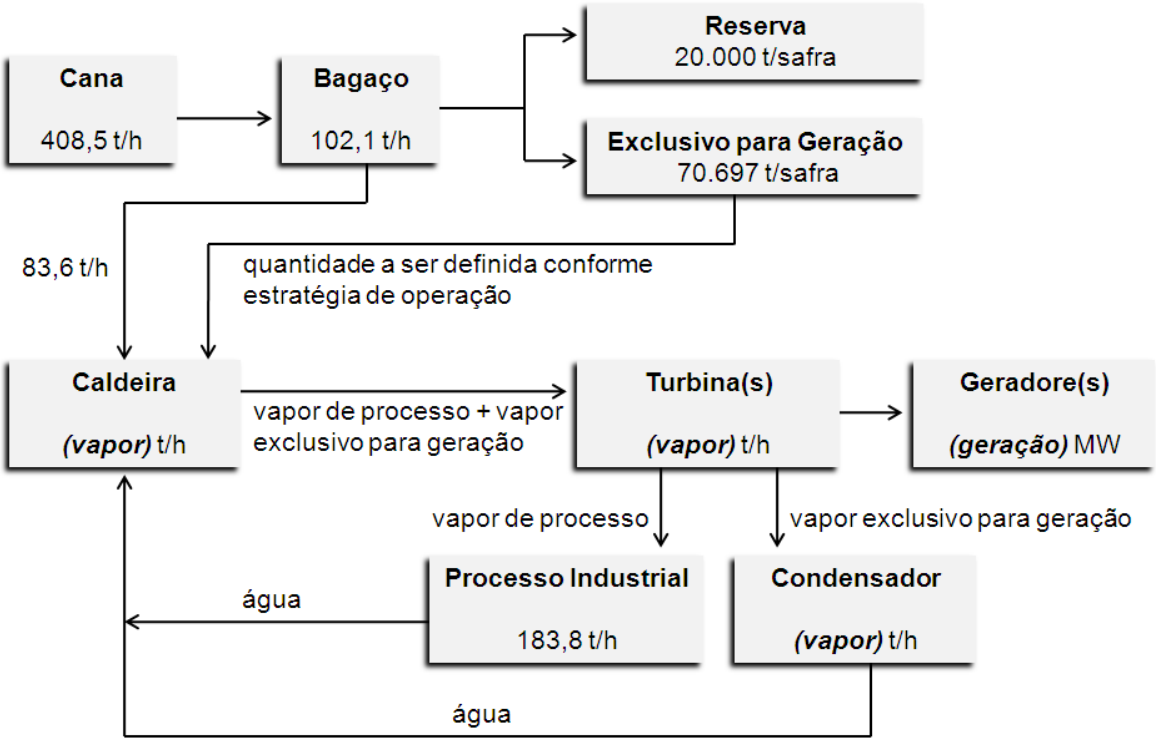


Figura 5. 4: Diagrama de blocos para cálculo de geração de bioeletricidade em indústria sucroalcooleira

I. Dimensionamento das turbinas

Alternativa 1 – Duas turbinas, sendo uma de contrapressão e uma de condensação pura para operação apenas na safra

A turbina de contrapressão é responsável pela alimentação do processo industrial com vapor de escape. Portanto, seu dimensionamento está em função do consumo horário de vapor da indústria. Já a turbina de condensação consumirá o vapor resultante da sobra de bagaço destinada exclusivamente para geração de energia elétrica. As 70.697 t de bagaço, gerando vapor durante 4.896 h da safra com uma relação vapor/bagaço da caldeira de 2,2, produzem 31,8 t/h de vapor para suprimento da turbina de condensação.

Com base na equação 5.2 e premissas mencionadas, as turbinas apresentam os seguintes resultados de geração:

Turbina de contrapressão: (183,8 t/h /3,6) · 787 kJ/kg · 83% = 33,3 MW

Turbina de condensação: (31,8 t/h /3,6)· 1254 kJ/kg · 81% = 9,0 MW

A divisão da vazão de vapor por 3,6 é para promover a conversão de t/h para kg/s.

A planilha a seguir ilustra um resumo do desempenho das turbinas em vazão de vapor de admissão (igual vazão de escape), potência elétrica e energia total possível de ser gerada durante o período de operação:

Turbina de contrapressão	
Vazão de vapor	183,8 t/h
Potência	33,3 MW
Turbina de condensação	
Vazão de vapor	31,8 t/h
Potência	9,0 MW
Potência instalada de geração	
Potência instalada	42,3 MW
Energia elétrica total na safra (possível de ser gerada)	
Energia total	207.086 MWh

Alternativa 2 – Duas turbinas, sendo uma de contrapressão e uma de condensação com extração operando apenas na safra com equilíbrio de cargas

O propósito é manter geradores de mesma potência e dividir a carga de vapor de processo entre as turbinas. Isto é possível por meio do canal de extração controlada de vapor da turbina de condensação. O critério de cálculo é idêntico ao da alternativa 1 e os resultados para esta solução são os seguintes:

Turbina de contrapressão	
Vazão de vapor	116,5 t/h
Potência	21,1 MW
Turbina de condensação com extração	
Vazão de vapor de entrada	99,1 t/h
Vazão de vapor de extração	67,3 t/h
Vazão de vapor de escape	31,8 t/h
Potência	21,1 MW
Potência instalada de geração	
Potência instalada	42,3 MW
Energia elétrica total na safra (possível de ser gerada)	
Energia total	206.907 MWh

Há uma diferença de geração em relação à alternativa 1 devido à diferença de eficiência de cada tipo de turbina.

Alternativa 3 – Uma turbina de condensação com extração operando apenas na safra

Nesta solução toda carga de processo fabril e condensação passam por uma única turbina.

Vazão de vapor de entrada	215,6 t/h
Vazão de vapor de extração	183,8 t/h
Vazão de vapor de escape	31,8 t/h
Potência	42,0 MW
Potência instalada de geração	
Potência instalada	42,0 MW
Energia elétrica total na safra (possível de ser gerada)	
Energia total	205.661 MWh

Alternativa 4 – Uma turbina de condensação com extração operando na safra e entressafra

Nesta solução há uma divisão da carga da turbina entre os períodos de safra e entressafra. Durante a safra é promovida uma pequena condensação, necessária para manter a refrigeração da turbina, e durante a entressafra queima-se toda biomassa residual. O intuito é dimensionar uma turbina com baixa capacidade nominal em relação às demais soluções, mas que opere o maior tempo possível. Para isto será necessário promover o consumo do bagaço destinado à geração de energia durante a entressafra.

No entanto, não é possível para uma turbina de condensação com extração operar sem vapor na parte de baixa pressão (após a válvula de extração) durante a safra. É necessário que haja uma condensação mínima na safra, necessária para manter a refrigeração das últimas palhetas da turbina. Esta condensação mínima é em torno de 10 t/h. Para determinação precisa deste valor se faz necessário alguns cálculos detalhados para avaliação dos limites de temperaturas das palhetas. Contudo, estas 10 t/h de vapor é um valor médio que pode ser adotado para estimativas. O consumo horário da sobra de bagaço na safra para gerar as 10 t/h de vapor será de 4,55 t/h ou 22.266 t totais durante as 4.896 h de operação. Considerando que há uma disponibilidade de 70.697 t de bagaço para geração exclusiva de energia elétrica e 22.266 t serão consumidas na safra, sobrarão 48.431 t para entressafra.

Para determinação da geração de vapor na entressafra, três pontos devem ser levados em consideração: O período de operação da turbina na

entressafra, as questões de eficiência da turbina e o limite de carga parcial da caldeira.

Com relação ao período de operação, sabe-se que a safra desta usina é de 240 dias, ou 8 meses. Isto implica que nos outros 4 meses não há colheita de cana. Este é o período de entressafra e é o tempo limite para operação da turbina nestas condições, considerando que imediatamente após este período inicia-se uma nova safra.

A turbina que opera no período de safra e entressafra tem uma variação em sua eficiência, tendo em vista que a máquina opera em pontos de carga distintos em cada período. A responsável por esta variação é a diferença de fluxo de vapor na turbina entre os períodos, considerando que na safra há vapor para processo industrial e a condensação é mínima e na entressafra não há processo industrial. Sendo assim a vazão de vapor de condensação na entressafra deve ser a máxima possível para que o turbogerador opere dentro da potência de projeto, onde a eficiência é máxima.

Além disto, também há a questão de vazão mínima de vapor da caldeira que não deve ser menor de 50% da vazão de projeto, a fim de sustentar os níveis de pressão e temperatura nominais do vapor em caldeiras aquotubulares de grelha, comumente utilizadas neste segmento de mercado.

Com base nestas condições, a simulação estabelece um tempo de operação durante a entressafra de 35 dias. Isto corresponde a um consumo horário de bagaço de 57, 7 t/h para esgotar as 48.431 t que sobraram, o que implica numa geração de vapor de 126,8 t/h. Este será o vapor útil para condensação contínua na turbina durante a entressafra. Considera-se a perda de 1% de eficiência devido às variações de carga.

Os cálculos para determinação das potências em cada período de operação são efetuados da seguinte forma:

Operação na safra:
Vazão mínima de vapor de condensação = 10 t/h
Vazão de vapor de processo = 183,8 t/h
Vazão de vapor de entrada na turbina = 10 t/h + 183,8 t/h = 193,8 t/h
Potência gerada =
= [(193,8 t/h /3,6)· 787 kJ/kg + (10 t/h /3,6)· (1254 kJ/kg – 787 kJ/kg)]· 81% = 35,4 MW

Operação na entresssafra:
Vazão de vapor de condensação = 126,8 t/h
Vazão de vapor de processo = 0 t/h
Vazão de vapor de entrada na turbina = 0 t/h + 126,8 t/h = 126,8 t/h

Potência gerada = (126,8 t/h /3,6)· 1254 kJ/kg · 81% = 35,8 MW

A planilha a seguir apresenta o resumo das informações seguindo o modelo das demais alternativas.

Operação na safra	
Vazão de vapor de entrada	193,8 t/h
Vazão de vapor de extração	183,8 t/h
Vazão de vapor de escape	10 t/h
Potência	35,4 MW
Operação na entressafra	
Vazão de vapor de entrada	126,8 t/h
Vazão de vapor de extração	0 t/h
Vazão de vapor de escape	126,8 t/h
Potência	35,8 MW
Potência instalada de geração	
Potência instalada	35,8 MW
Energia elétrica total (possível de ser gerada)	
Energia total	203.153 MWh

Comparativo entre as alternativas

Dentre as alternativas apresentadas, todas são funcionais e apresentam praticamente a mesma capacidade de geração, fundamental para levantamento do faturamento com a comercialização de energia. No entanto algumas possuem maiores vantagens em relação a outras.

Alternativa 1: Esta solução apresenta uma boa flexibilidade de operação visando continuidade do processo fabril com geração de energia no caso de falha de uma das turbinas. No caso de falha da turbina de condensação, a turbina de contrapressão continua suprindo o processo térmico e gerando energia simultaneamente. No caso de falha da turbina de contrapressão, o processo térmico seria alimentado por uma válvula redutora de pressão e a turbina de condensação continua com a geração de energia, mas numa proporção menor que a turbina de contrapressão.

Alternativa 2: A configuração de tipo e quantidade de turbinas neste caso equivale à alternativa 1. No entanto, há um equilíbrio de cargas entre as turbinas devido à inserção de uma extração controlada de vapor na turbina de condensação, o que permite uma maior entrada de vapor nesta turbina para alimentar o processo térmico através da extração e, consequentemente, aumentar o potencial de geração de energia elétrica deste turbogerador. A

principal vantagem desta alternativa em relação à primeira é a configuração de máquinas de mesmo porte em termos de potência, o que favorece a reposição de peças e equipamentos e estoque de sobressalentes.

Alternativa 3: Uma das principais vantagens desta solução é o investimento inicial tendo em vista que a implantação de apenas uma turbina suprime diversos custos adicionais em relação a instalação de dois turbogeradores considerando o tamanho da casa de força, fundações, tubulações, cabeamentos, painéis elétricos, mão-de-obra para instalação e outros. Apesar da desvantagem da dependência de apenas uma máquina para geração, há a vantagem da facilidade de operação e manutenção de apenas uma máquina integrada que realiza a função de duas independentes. A avaliação do balanço financeiro também deve ser levada em consideração neste caso já que um menor custo para implantação desta solução em comparação com as demais, com o mesmo potencial de geração, favorece o retorno de investimento com a venda de energia.

Alternativa 4: A configuração da máquina é idêntica à alternativa 3, entretanto, há um balanço de cargas para que a turbina opere com condensação mínima durante a safra e consuma toda a biomassa restante durante a entressafra. Isto proporciona o dimensionamento de um turbogerador de menor porte sem, contudo, prejudicar o potencial de geração de energia durante o ano de comercialização. A energia gerada durante o ano é ligeiramente inferior em comparação com as demais alternativas (<2%), mas a diferença é insignificante em relação à poupança no investimento do maquinário já que há uma redução de aproximadamente 16% na potência da turbina e 10% na vazão da caldeira. Isto impacta numa redução significativa no investimento de toda termelétrica, mantendo praticamente o mesmo potencial de geração das demais soluções. Portanto, esta alternativa se mostra mais atrativa.

J. Dimensionamento da caldeira

Está comprovado que, segundo os métodos anteriormente apresentados, a determinação da vazão de vapor da caldeira, um dos parâmetros fundamentais para seu dimensionamento, é feita após a definição da estratégia de operação e configuração da(s) turbina(s). Adotando a solução da alternativa 4, a admissão total máxima de vapor da turbina (suficiente para suprimento do processo industrial, através das válvulas de extração, e do vapor de condensação fazendo uso do bagaço excedente) é de 193,8 t/h. Esta é a capacidade para qual a caldeira deve estar dimensionada.

Isto reforça o conceito da adoção da alternativa 4 como a melhor solução, já que para as soluções 1, 2 e 3 a caldeira deveria ser dimensionada para uma vazão de vapor de 215,6 t/h.

5.5.5 Balanço de energia elétrica e retorno do investimento

O propósito fundamental para o investimento nos projetos de modernização das usinas e aumento do potencial de geração de bioeletricidade é a melhoria da segurança operacional da planta na produção de açúcar e etanol e a remuneração com a comercialização de energia elétrica.

Os cálculos a seguir apresentam uma síntese de faturamento anual com a venda de energia elétrica adotando a solução da alternativa 4, considerando o valor de venda de energia igual a R$ 130,00/MWh. No mercado regulado este valor é determinado pela competição nos leilões de energia como mencionado no capítulo 3. Já no mercado livre este valor é definido através de negociação direta entre consumidor e gerador.

Considera-se a quantidade de energia a ser exportada como a diferença entre o total de geração e o consumo da indústria. Este valor de consumo é calculado com base no consumo específico de energia elétrica definido nas premissas do projeto no item 5.5.1. Como na entressafra não há processo industrial, o consumo de energia será apenas o suficiente para manter a operação da termelétrica. Este consumo é em torno de 8% da potência instalada da termelétrica, ou seja, 2,9 MW.

Período	Safra	Entressafra
Balanço de potência		
Consumo específico médio por tonelada de cana	30 kWh/t	-
Geração	35,4 MW	35,8 MW
Demanda	12,3 MW	2,9 MW
Exportação	23,1 MW	32,9 MW
Balanço de energia		
Tempo operação	4.896 h	840 h
Energia exportada	113.104 MWh	27.645 MWh
Faturamento		
Total energia exportada	140.749 MWh	
Valor venda da energia	R$ 130,00/MWh	
Faturamento	R$ 18.297.361,65	

Supondo um investimento de aproximadamente R$ 120.000.000,00 para implantação da termelétrica, este projeto apresentaria um retorno em seis anos e meio de operação, sem considerar os custos financeiros envolvidos.

Cabe mencionar que, de acordo com o comparativo das alternativas de configuração da termelétrica, a alternativa 4 apresenta uma economia aproximada de R$ 8.000.000,00 no investimento total em comparação com a alternativa 1, apesar de perder faturamento em torno de R$ 400.000,00/ano pela diminuição da capacidade de exportação de energia. Caso a opção de investimento seja a alternativa 1, com a receita adicional de R$ 400.000,00/ano, seria necessário vinte anos de operação para recuperar R$ 8.000.000,00 que podem ser economizados na alternativa 4. Com base nestas considerações a alternativa 4 tem se mostrado mais vantajosa, sem considerar os ganhos de operação e manutenção de apenas um turbogerador.

5.5.6 Balanço termelétrico

O balanço termelétrico a seguir ilustra o regime de operação da usina durante os períodos de safra e entressafra, apontando os valores obtidos nos cálculos efetuados neste tópico.

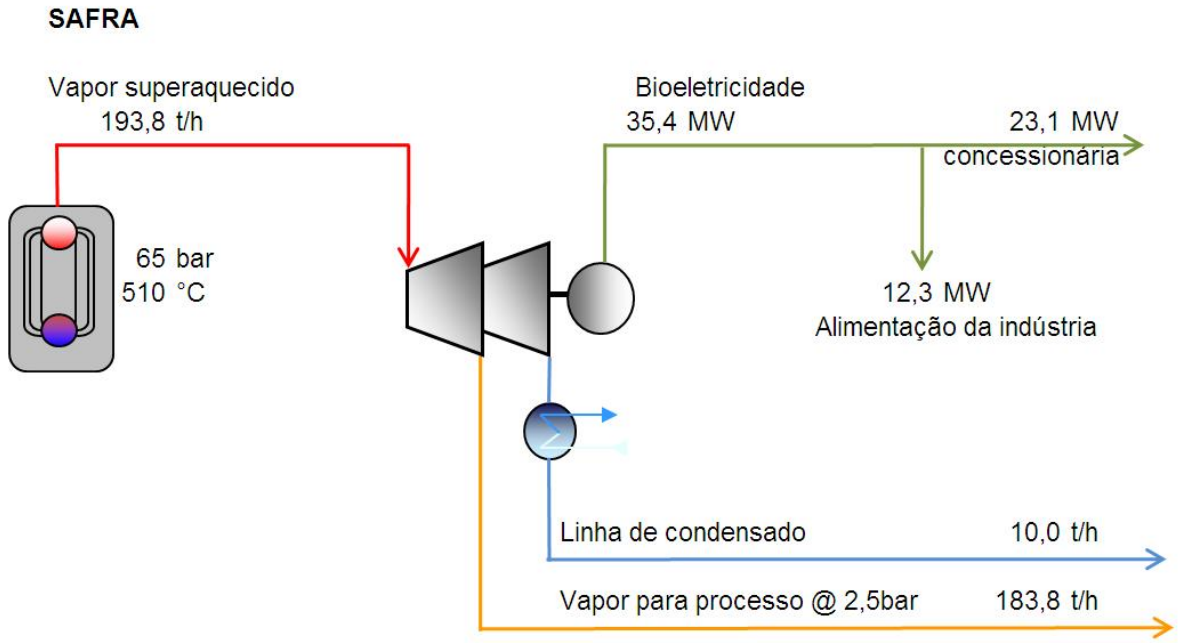


Figura 5. 5: Balanço termelétrico durante o período de safra

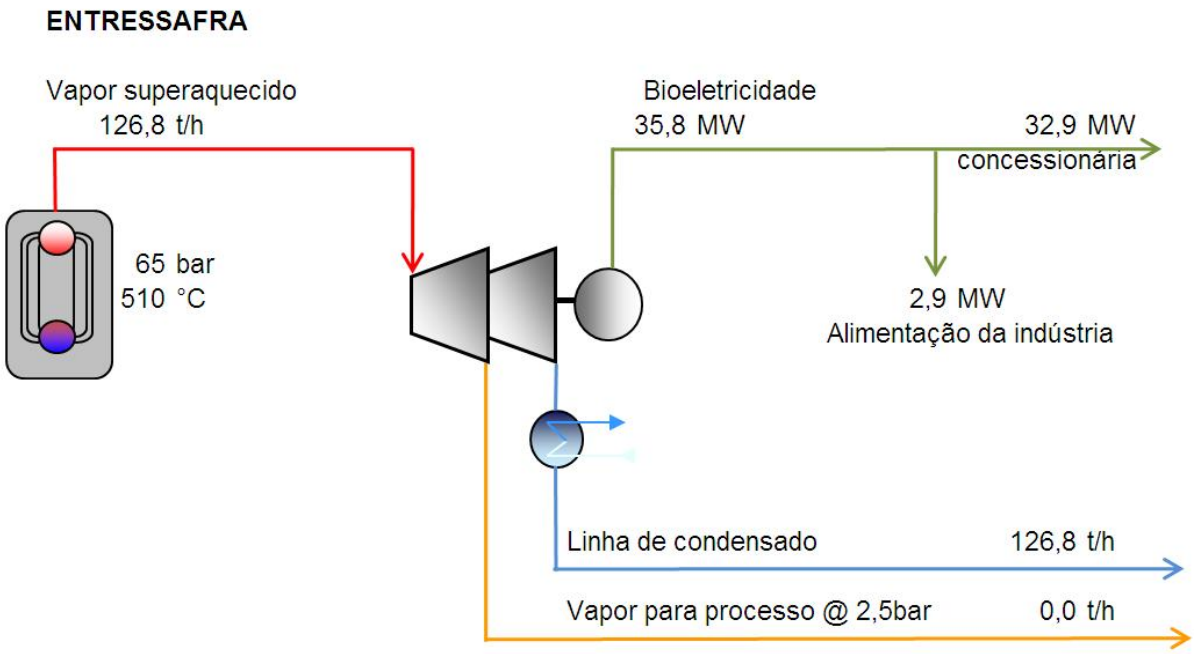


Figura 5. 6: Balanço termelétrico durante o período de entressafra

A metodologia de cálculo apresentada neste capítulo também pode ser utilizada para usinas existentes que promovem projetos de melhoria de eficiência energética a fim de aumentar o potencial de geração de bioeletricidade e melhorar a flexibilidade de operação da(s) turbina(s) na indústria. O capítulo 6 apresenta alguns dos recursos que podem ser utilizados para promover tal melhoria.

Capítulo 6

6. Contribuição para o Projeto de Eficiência Energética e Aumento da Produção de Bioeletricidade

Até o início do século atual as usinas não tinham muito acesso ao mercado de eletricidade. Sendo elas autoprodutoras e sem o foco de exportação de energia, o propósito era gerar o necessário para garantir a autossuficiência. Neste sentido, eram poucos os projetos que promoviam a melhoria de eficiência energética a fim de gerar excedentes. Caldeiras de média pressão, acionamentos mecânicos e alto consumo de vapor eram comuns nas usinas e ainda se observa esta condição em muitas indústrias em operação.

No entanto, atualmente "o setor sucroenergético vive um ciclo de reestruturação empresarial com crescente interesse na realização de investimentos em projetos de cogeração e bioeletricidade"(Revista Alcoolbrás n°130 – Eficiência Energética e Sustentabilidade).

Este capítulo visa estimular o raciocínio voltado para os projetos de cogeração favorecendo a eficiência energética, além de abordar algumas limitações que, em muitos casos, inviabilizam a execução destes projetos.

6.1 Possibilidades de melhoria da eficiência do sistema termelétrico

Nas indústrias produtoras de açúcar, etanol e bioeletricidade, são várias as possibilidades de melhoria de eficiência na geração de energia elétrica e, consequentemente, no balanço energético da usina. Este tópico aborda as principais iniciativas promovidas nas usinas para melhoria de eficiência, segundo apontamentos de estudos feitos pela UNICA, CTC e grandes produtores nacionais. Dentre estas iniciativas principais, podem ser mencionadas:

- Aproveitamento da palha como combustível das caldeiras;
- Eletrificação dos acionamentos mecânicos;
- Utilização de caldeiras de alta pressão e temperatura;

- Projetos de redução do consumo específico de vapor na indústria para fabricação de açúcar e etanol.

6.2 Aproveitamento da palha

A palha, juntamente com o bagaço, compõe a biomassa da cana-de-açúcar, úteis para queima nas caldeiras responsáveis pela geração de vapor. Há atualmente três possíveis destinos para a palha no processo da usina: queima no campo, cobertura do solo e/ou uso em caldeiras.

Considera-se palha as folhas secas e ponteiras da cana que, na grande maioria dos casos, são desprezadas no campo. Sem os recursos de mecanização, o corte da cana é precedido pela queima da palha como técnica para facilitar o corte manual no acesso dos cortadores ao canavial. A parcela da palha que não é queimada fica depositada no solo, no próprio local do corte, para servir de adubo orgânico para a lavoura e uma cobertura protetora para o solo. Descartando a contribuição que a queima oferece para a colheita manual, sua prática produz apenas malefícios ao meio ambiente e para o próprio solo, que perde muitos microrganismos necessários à adubação natural, além de comprometer a saúde de trabalhadores rurais contribuindo com o aumento de doenças respiratórias.

Foi considerando estes fatores que o Governo do Estado de São Paulo e a UNICA, juntamente com as usinas do Estado, assinaram o Protocolo Agroambiental que promove a antecipação do marco legal que determina metas para a colheita mecanizada e o fim das queimadas. O prazo para o fim da colheita manual e queima da palha foi reduzido de 2021 para 2014 nas áreas planas.

Isto promove condições para o aproveitamento da palha como combustível das caldeiras e aumento do potencial de geração de energia.

6.2.1 Uso em caldeiras e incremento na geração de bioeletricidade

A utilização de parte da palha, deixando ainda no campo quantidade suficiente para obter os benefícios agrícolas, apresenta uma excelente alternativa para os produtores aumentarem o potencial de geração de bioeletricidade.

Além do benefício do aumento da quantidade de combustível disponível para geração de vapor, há o incremento do poder calorífico do combustível considerando que o poder calorífico médio da palha é em torno de 70% superior ao do bagaço.

Em consulta à empresa Dedini Indústrias de Base, se obtém a informação de que as caldeiras aquotubulares de grelha rotativa, comumente comercializada neste segmento de mercado, próprias para operar com bagaço de cana-de-açúcar como combustível estão aptas a receber uma pequena parcela de palha no volume total de combustível introduzido na caldeira na mistura bagaço-palha. Isto pode ser feito sem necessidade de adaptações no projeto da caldeira e sem variações em sua eficiência. Por questões de sua baixa umidade, em caso de utilização de uma quantidade grande de palha na mistura, isto poderia ocasionar danos na caldeira e/ou reduzir sua vida útil. Contudo, as indústrias sucroalcooleiras ainda não têm requisitado caldeiras com grande proporção de palha.

Simulações, como as ilustradas a seguir, comprovam que a introdução da palha como combustível da caldeira pode aumentar a geração de vapor significativamente em relação à capacidade nominal da máquina com a utilização exclusiva de bagaço.

As simulações a seguir são feitas com a aplicação da equação 5.1 e adotam como parâmetros as mesmas premissas estabelecidas no capítulo 5 para os dados da caldeira e combustível. Estes são valores típicos utilizados em muitas indústrias do setor.

- PCI do bagaço: 7.536 kJ/kg;
- PCI da palha: 12.811 kJ/kg, ou seja, 70% superior ao PCI do bagaço;
- Pressão da bomba d'água de alimentação da caldeira: 85 bar
- Temperatura de alimentação d'água da caldeira: 116°C;
- Pressão do vapor: 65 bar;
- Temperatura do vapor: 510°C;
- Eficiência da caldeira: 86%
- Proporção da palha na mistura: 6% do total (vide figura 6.2).

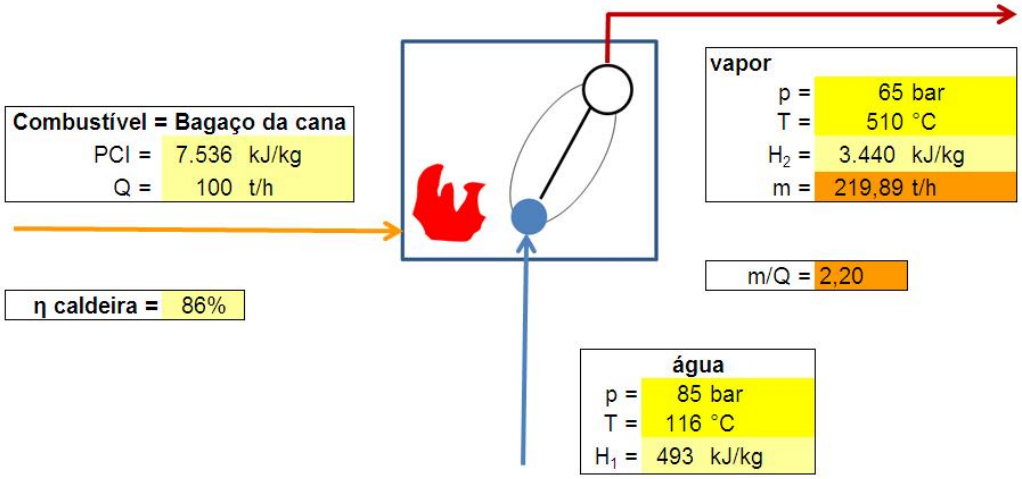


Figura 6. 1: Geração de vapor exclusivamente com bagaço de cana

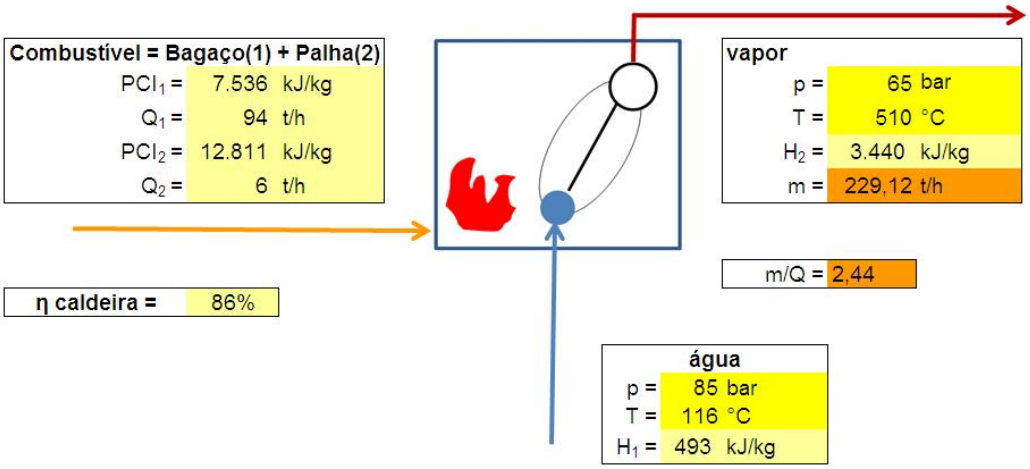


Figura 6. 2: Geração de vapor com mistura de bagaço e palha da cana

Simulações		Geração de vapor	Ganho
1	100% Bagaço da cana	219,9 t/h	-
2	94% Bagaço + 6% Palha	229,1 t/h	4,2%

Figura 6. 3: Ganho com a inserção da palha como combustível

A figura 6.3 evidencia que a inserção de apenas 6% de palha na mistura bagaço-palha para queima na caldeira, proporciona um ganho ligeiramente superior a 4% na geração de vapor. Este vapor adicional é responsável pelo incremento na geração de bioeletricidade, levando em consideração que a geração de energia elétrica nos turbogeradores está diretamente associada ao fluxo de vapor dentro das turbinas. Ou seja, para uma mesma tecnologia de turbogeradores, o ganho de geração de energia elétrica é diretamente proporcional ao ganho de geração de vapor, além, é claro, da possibilidade de

poupança do bagaço para ser queimado durante um período estendido de entressafra.

As atuais limitações para viabilizar a utilização da palha estão associadas aos investimentos no transporte desta biomassa do campo à usina e o posterior processo na indústria antes da queima na caldeira. Atualmente são três os principais métodos para transporte da palha:

- Recolhimento de parte da palha com a cana e limpeza a seco na indústria para separação através de ventiladores;
- Recolhimento somente da palha no campo e transporte à usina;
- Enfardamento da palha no campo, transporte à usina e desenfardamento e picagem da palha para queima na caldeira.

Todos estes métodos, cada um em sua proporção, comprometem investimentos que, em grande parte dos casos, não viabilizam a utilização da palha para queima nas caldeiras em função do alto custo de transporte.

Segundo Bruno Covas, secretário de Meio Ambiente de São Paulo, “Hoje, o problema é econômico. Não há estímulo para investir no recolhimento da palha, e é isso que está sendo discutido" (IE - Instituto de Engenharia).

No entanto, em casos onde o canavial está próximo à usina e os custos de transporte são baixos, o aproveitamento da palha se mostra atrativo pois a rentabilidade com a venda do adicional de bioeletricidade recupera os custos envolvidos para processamento da palha.

6.3 Eletrificação dos acionamentos

Dentre as possibilidades de aumento da eficiência energética no projeto de cogeração numa indústria sucroalcooleira está a eletrificação dos acionamentos mecânicos. Ela consiste na substituição das turbinas a vapor responsáveis pelo acionamento dos picadores, desfibradores, moendas e bombas d’água por motores elétricos trifásicos.

O intuito fundamental é maximizar a disponibilidade de vapor (consumido pelas turbinas de acionamento) para geração de energia elétrica. Além da redução no consumo de vapor e maior eficiência em comparação com as turbinas de acionamento, os motores elétricos empregados nas usinas apresentam outras vantagens como maior eficiência na extração do caldo nas moendas, maior controle do processo pela flexibilidade no controle de velocidade da moenda através de inversores de frequência, que eliminam os impactos causados por oscilação de pressão de vapor. A utilização de motores elétricos resulta em uma instalação compacta e reduzida e maior facilidade para manutenção.

Em questões de eficiência de máquina de acionamento, os motores elétricos superam muito as turbinas a vapor para esta aplicação. Enquanto as turbinas a vapor de simples estágios apresentam eficiência próxima de 60%, os motores elétricos atingem valores em torno de 95%.

Outra questão que deve ser analisada é o acompanhamento das tecnologias que promovem a eficiência energética e que, em curto prazo, colocará as turbinas de acionamentos em uma posição de obsolescência tecnológica.

Para uma análise detalhada da possibilidade de incremento no montante final de energia a ser comercializado pela indústria com a eletrificação dos acionamentos, a seguir são apresentados alguns cálculos e balanços energéticos que ilustram este cenário.

A simulação a seguir é feita com base nos cálculos realizados no capítulo 5, considerando dois cenários comparativos: acionamentos mecânicos através de turbinas a vapor e através de motores elétricos. No cenário mecanizado considera-se que as turbinas de acionamento tem um consumo específico de vapor por tonelada de cana de 140 kg/t [ALCOOLBRÁS, 2011] e a usina um consumo específico de energia elétrica da indústria de 22 kWh/t [ALCOOLBRÁS, 2011]. Tomando como base a turbina selecionada no capítulo 5, é feita a adição de mais uma linha de extração controlada de vapor para suprimento das turbinas de acionamentos com mostra o fluxograma a seguir. Cabe salientar que, em geral, estas turbinas de acionamento operam com uma pressão de entrada de 21 bar.

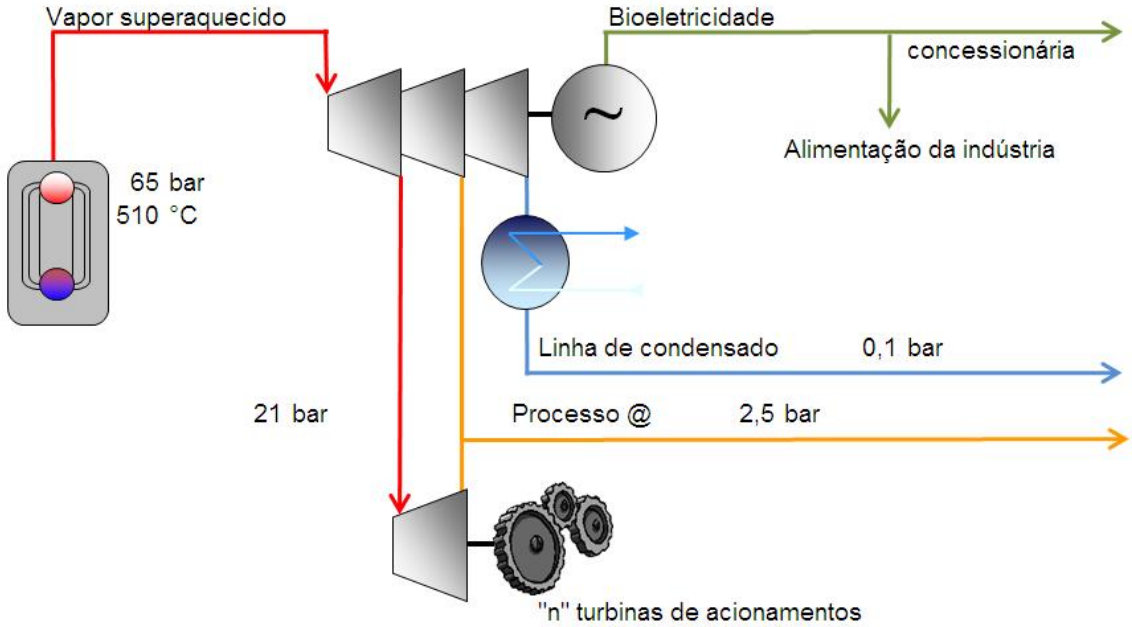


Figura 6. 4: Fluxograma de usina com acionamento mecânico e geração através de turbina com dupla extração

Moagem horária	408,5 t/h	
Cenário	Mecanizado	Eletrificado
Consumo específico médio por tonelada de cana		
Energia elétrica	22 kWh/t	30 kWh/t
Vapor de processo industrial	450 kg/t	450 kg/t
Vapor de acionamento mecânico	140 kg/t	-
Balanço de massa		
Caldeira	193,8 t/h	193,8 t/h
Consumo de vapor de processo	183,8 t/h	183,8 t/h
Consumo de vapor de acionamento	57,2 t/h	-
Vapor de condensação	10 t/h	10 t/h
Balanço de potência elétrica		
Geração	30,0 MW	35,8 MW
Demanda	9,0 MW	12,3 MW
Exportação	21,0 MW	23,6 MW
Ganho na exportação	+ 12,2%	

As figuras a seguir retratam o sistema de geração operando na usina em ambas as condições, supondo que toda geração de bioeletricidade seja realizada por apenas um turbogerador, como determinado nos cálculos do capítulo 5.

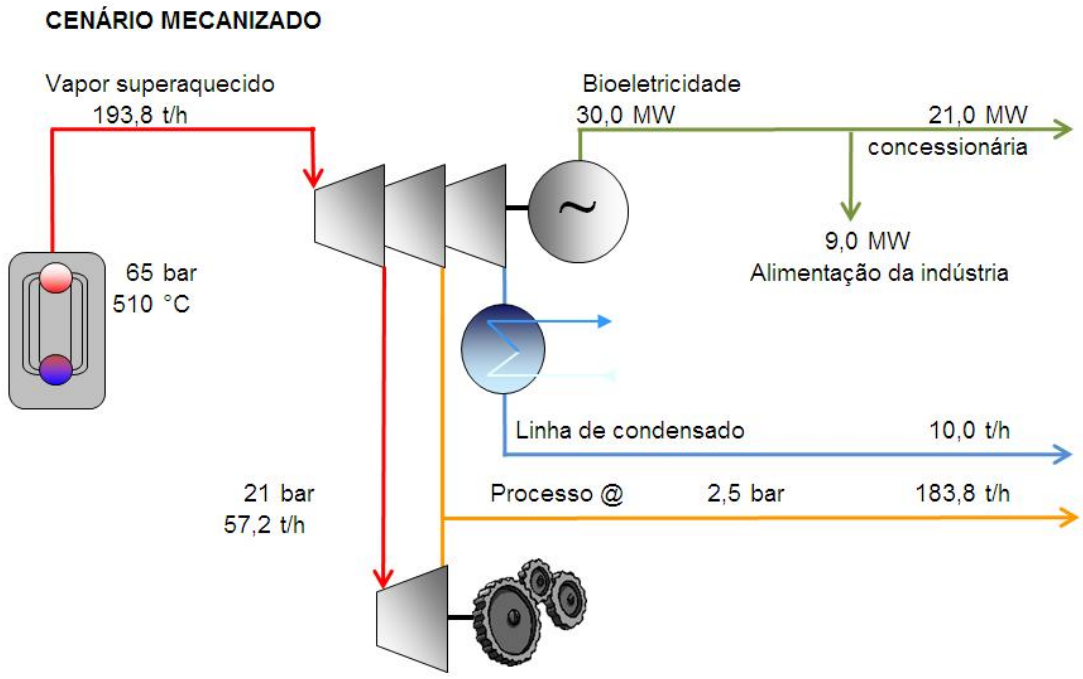


Figura 6. 5: Turbogerador operando na usina mecanizada

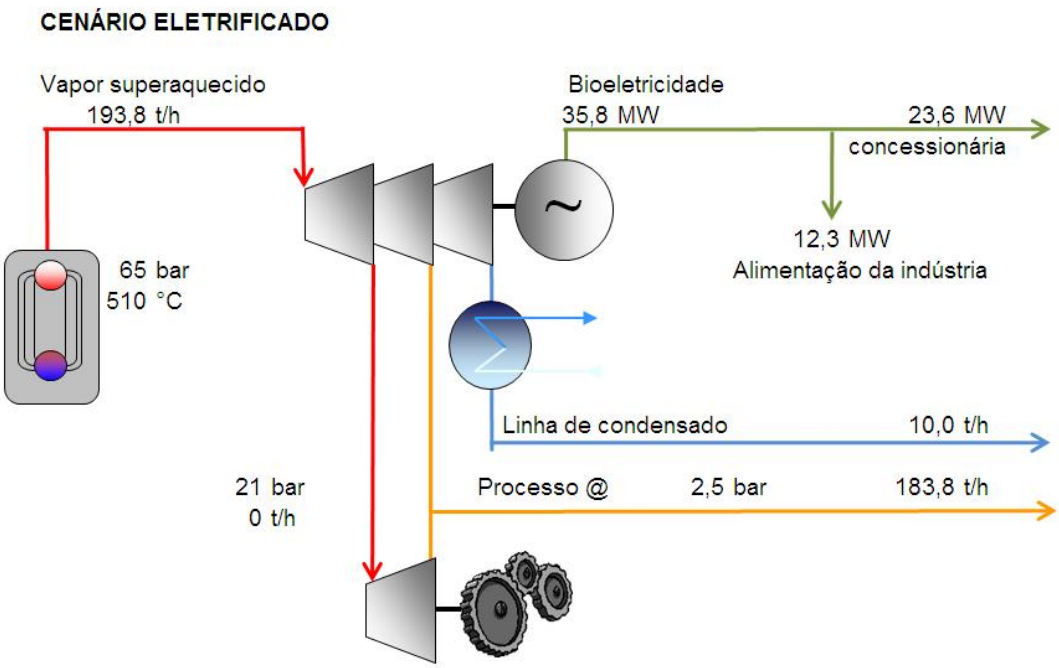


Figura 6. 6: Turbogerador operando na usina eletrificada

Cabe salientar que na condição de operação da usina eletrificada, não há mais extração de vapor para suprimento da turbina de acionamento. Ou seja, nesta situação o vapor que anteriormente era extraído para acionamento mecânico torna-se útil para geração de bioeletricidade e promove um incremento de geração em torno de 19%.

No entanto, o propósito fundamental é avaliar o ganho energético de todo o sistema substituindo os acionamentos mecânicos pelos elétricos levando em consideração que, apesar de haver maior disponibilidade de vapor para geração de energia elétrica, em contrapartida o consumo de eletricidade aumentará em função da instalação dos motores trifásicos. No entanto, os cálculos evidenciam que, mesmo com o aumento no consumo de energia elétrica da planta, o potencial de exportação de energia no cenário eletrificado supera em 12% o cenário mecanizado.

O cálculo financeiro para avaliação do ganho monetário com implementação da eletrificação sempre deverá ser feito em função do adicional de energia a ser exportada e o tempo de operação da usina durante o ano, que depende do período total de operação de safra e entressafra. Ou seja, a viabilidade de adoção desta solução será certificada pelo faturamento com a comercialização da bioeletricidade adicional em comparação com o valor a ser investido na solução. Mas outros fatores também devem ser considerados como os já citados que estão relacionados à modernização do processo de recepção e moagem da cana e às vantagens de controle do sistema e recursos de manutenção.

6.4 Caldeiras de alta pressão e temperatura

Outra alternativa para o incremento de geração de bioeletricidade nas usinas é o investimento em caldeiras de alta pressão e temperatura. Como mencionado anteriormente, existe uma grande parcela de usinas que não são dedicadas à cogeração. Nesta parcela, as caldeiras estão destinadas a alimentar as turbinas de acionamento e os processos térmicos, que não carecem de vapor em elevada pressão e temperatura. Em usinas antigas onde existem turbinas para geração de bioeletricidade, estas geralmente são de baixa potência devido à baixa queda de energia entálpica e baixa eficiência em relação às turbinas maiores.

A proposta anterior relacionada à substituição das turbinas de acionamentos por motores elétricos exige a substituição das caldeiras de média pressão. Entende-se por caldeiras de média pressão aquelas com pressão em torno de 21 bar. Tendo em vista a eliminação dos acionamentos mecânicos por turbinas a vapor, as caldeiras podem ser destinadas à cogeração, onde todo o vapor necessário para alimentar o processo industrial passaria pelas turbinas de geração de bioeletricidade.

As figuras a seguir ilustram os dois conceitos de instalação. Na primeira, o arranjo é composto por turbina de acionamento e caldeira de média pressão. Na segunda, o acionamento é elétrico, a caldeira é de alta pressão e temperatura e a turbina de cogeração alimenta o processo industrial através de uma extração de vapor.

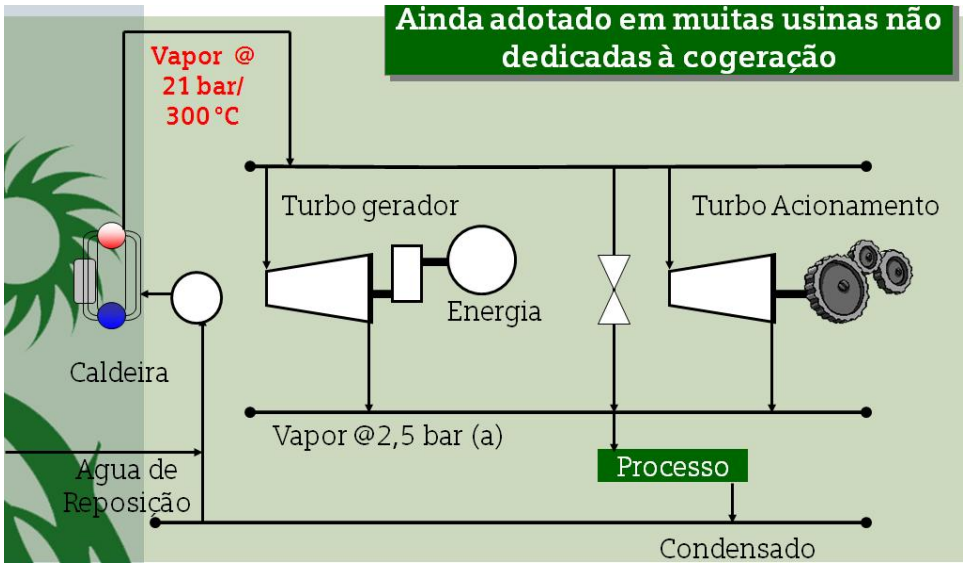


Figura 6. 7: Fluxo de vapor em usina com acionamento mecânico
Fonte: SIEMENS

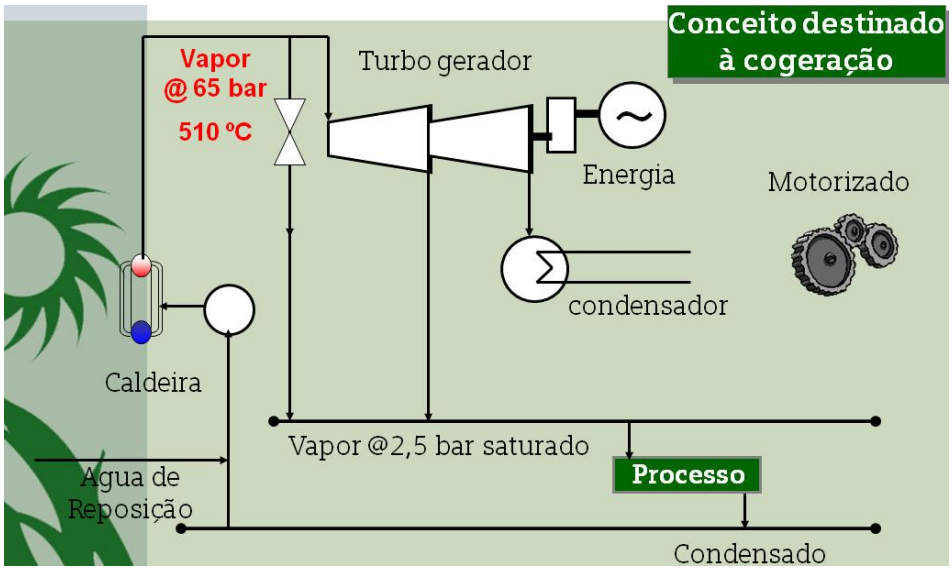


Figura 6. 8: Fluxo de vapor em usina com acionamento elétrico e dedicada à cogeração
Fonte: SIEMENS

Para ilustrar o ganho de geração de bioeletricidade com a substituição das caldeiras de média pressão por outras com nível de pressão mais elevado, a seguir são apresentadas algumas simulações com um comparativo entre as soluções.

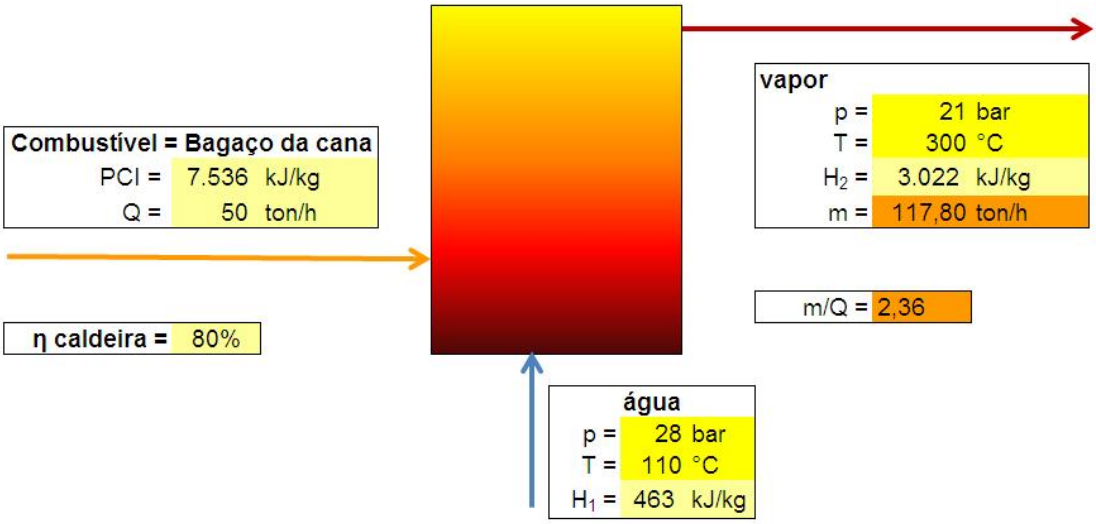


Figura 6. 9: Geração com caldeira de 21bar

O cálculo de geração de vapor da caldeira da figura 6.9 foi realizado com base na equação 5.1 da seguinte forma:

$$m = \frac{7.536\,\frac{kJ}{kg} \cdot 50\,\frac{ton}{h}}{3.022\,\frac{kJ}{kg} - 463\,\frac{kJ}{kg}} \cdot 80\% = 117{,}8\,\frac{ton}{h}$$

As demais simulações seguem o mesmo critério de cálculo.

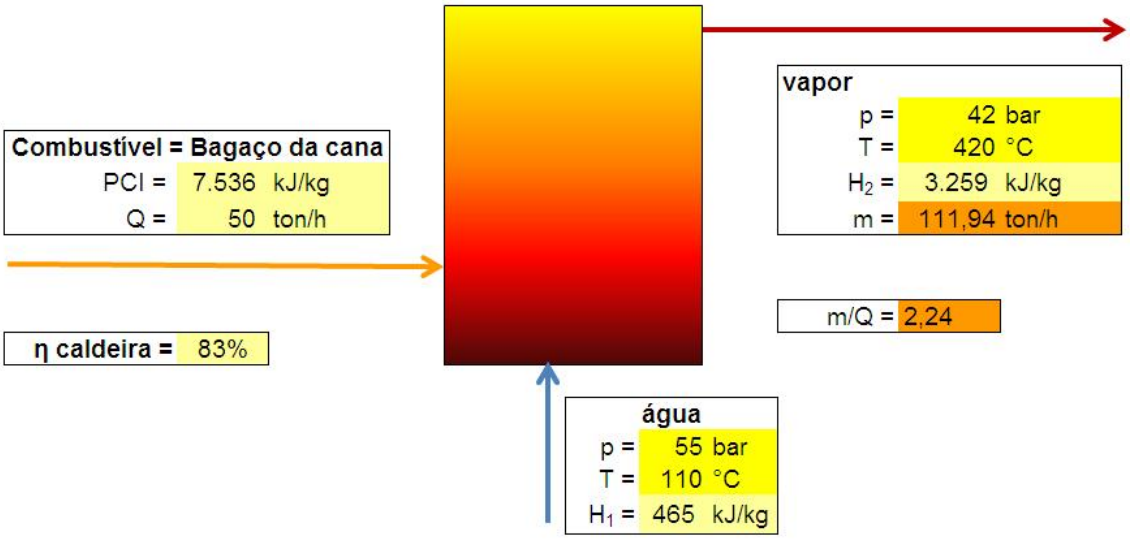


Figura 6.10: Geração com caldeira de 42bar

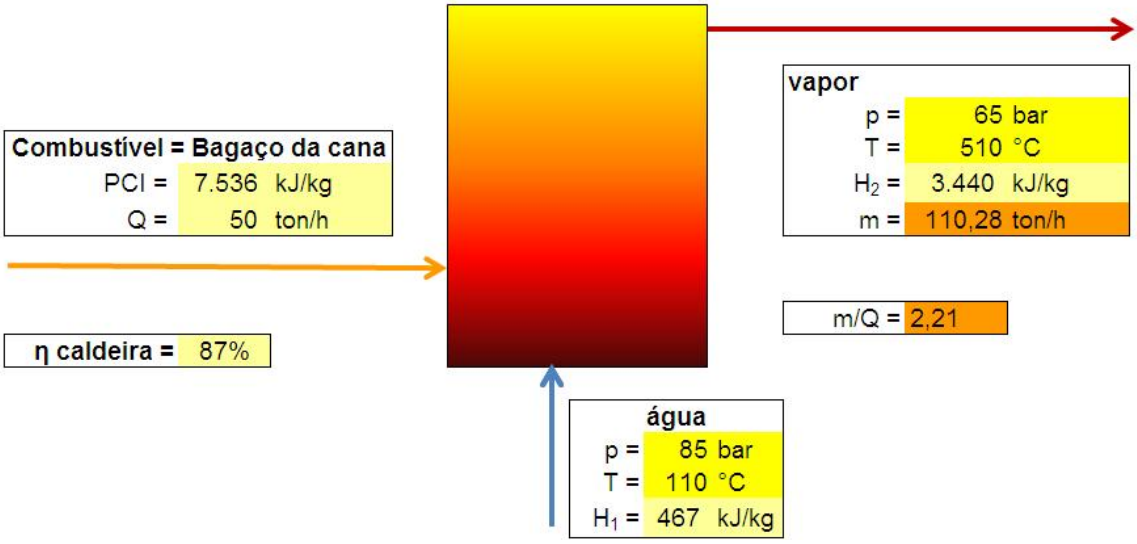


Figura 6.11: Geração com caldeira de 65bar

Pelas simulações observa-se que a relação vapor-combustível na caldeira de baixa pressão é maior em relação à de alta, mesmo com uma eficiência inferior. No entanto, o ganho de energia entálpica para geração de energia elétrica no turbogerador é significativamente maior operando com a caldeira de alta pressão como apresentado na simulação seguinte. Os cálculos a seguir foram feitos com base na equação 5.2.

Turbina de contrapressão

simulação	Pressão/ Temperatura bar/°C	vapor entrada (t/h)	Pressão escape (bar)	Queda entalpica ΔH (kJ/kg)	Eficiência turbina	Eficiência redutor	Eficiência gerador	Potência no terminais do gerador	Ganho
1	21/300	117,80	2,5	436,67	88,0%	98,5%	98,2%	12.162 kW	-
2	42/420	111,94	2,5	637,43	88,0%	98,5%	98,2%	16.871 kW	38,7%
3	65/510	110,28	2,5	796,7	88,0%	98,5%	98,2%	20.773 kW	70,8%

Turbina de condensação

simulação	Pressão/ Temperatura bar/°C	vapor entrada (t/h)	Pressão escape (bar)	Queda entalpica ΔH (kJ/kg)	Eficiência turbina	Eficiência redutor	Eficiência gerador	Potência no terminais do gerador	Ganho
1	21 bar /300°C	117,80	0,1	886,47	85,0%	98,5%	98,2%	23.849 kW	-
2	42 bar /420°C	111,94	0,1	1100,38	85,0%	98,5%	98,2%	28.131 kW	18,0%
3	65 bar /510°C	110,28	0,1	1264,07	85,0%	98,5%	98,2%	31.836 kW	33,5%

Figura 6.12: Ganho de geração com substituição da caldeira

Os cálculos evidenciam que, mesmo com uma geração de vapor ligeiramente inferior na caldeira de alta pressão, o ganho na geração de bioeletricidade é muito elevado tanto na turbina de contrapressão quanto na de condensação, com um ganho mais acentuado na turbina de contrapressão.

6.5 Redução do consumo específico de vapor

O vapor na indústria de açúcar e etanol tem por finalidade principal o suprimento do processo industrial, alimentando equipamentos como evaporadores, cozedores, destilarias e trocadores de calor. Todas as indústrias com foco na cogeração e comercialização da bioeletricidade buscam recursos para aumentar o potencial de geração de vapor e uma das maneiras é a melhoria do consumo específico de vapor nos equipamentos. Com a redução do consumo de vapor nos equipamento, haverá maior quantidade de vapor disponível para suprimento dos turbogeradores, aumentando o potencial de geração de bioeletricidade.

Muitas das atuais indústrias voltadas para a geração de bioeletricidade estão promovendo melhorias na eficiência termodinâmica dos equipamentos industriais e corrigindo algumas práticas de operação que desperdiçavam vapor.

Na prática, o consumo específico de vapor afeta diretamente a reserva de biomassa. Quanto menor for o consumo de vapor na indústria, maior será a reserva de biomassa. Esta biomassa adicional não necessariamente aumenta a geração de vapor na usina, mas pode promover uma extensão no tempo de geração de bioeletricidade. Por exemplo, uma usina que possui uma reserva de biomassa suficiente para gerar bioeletricidade em uma turbina de condensação durante todo o período de safra e paralisa o equipamento durante a

entressafra, com uma reserva adicional de biomassa esta geração também pode ser estendida à entressafra mantendo a mesma vazão de vapor e potência dos equipamentos. O resultado final será uma quantidade maior de energia gerada total durante o ano, sem necessidade de investimento em caldeiras e turbogeradores de maior porte e aumentando o faturamento da indústria com a exportação de energia elétrica.

Cabe ressaltar que a eletrificação dos acionamentos é uma das práticas adotadas pelas indústrias para melhoria do consumo específico de vapor, tendo em vista que a substituição das turbinas de acionamento por motores elétricos promove uma maior disponibilidade de vapor para o cogeração conforme apresentado nos cálculos do item 6.3. Outra prática é o investimento em equipamentos que possuem melhor eficiência de troca térmica no processo de tratamento do caldo, cozimento, destilarias e outros, a fim de diminuir a requisição de vapor na indústria.

Capítulo 7

7. Conclusões

O Ministério de Minas e Energia, em seu Plano de Expansão Decenal 2010-2019 da Empresa de Pesquisa Energética, considera que a contribuição da biomassa da cana-de-açúcar na matriz nacional é de extrema importância, dado o atual crescimento das indústrias de açúcar e etanol, aumentando a produção da biomassa, e principalmente, pela contribuição aos aspectos ambientais, tema largamente discutido em todo o mundo nos tempos atuais.

Fato é que o projeto de cogeração de energia com a implantação de uma usina termelétrica a vapor dentro da indústria de açúcar e etanol proporciona à indústria autossuficiência energética, além da possibilidade de comercialização da energia excedente, aumentando a receita dos produtores.

A cultura da usina denominada sucroalcooleira tem como produto principal o açúcar e o etanol. O maior desafio é o rompimento desta cultura para que este mercado interprete que a bioeletricidade também deve ser um dos principais produtos, dado o grande potencial de cogeração e autossuficiência energética da qual estas usinas são dotadas. Além da difusão desta nova cultura, é ideal que as usinas modernas adotem o modelo de turbina de condensação com extração controlada de vapor já que este tipo de máquina sustenta um equilíbrio de carga da caldeira e possibilita a operação contínua durante a safra e entressafra da cana.

Os projetos destinados à geração de bioeletricidade durante a safra e entressafra com apenas uma turbina possibilita à usina uma economia no investimento da termelétrica tendo em vista que, em termos de potência instalada, os equipamentos podem ser menores em comparação com equipamentos que operam apenas na safra.

Com relação às questões culturais do segmento, cabe ressaltar que segundo o CTC, muitas usinas ainda preferem fechar o balanço com uma eficiência mais baixa, mas que proporcione segurança na operação. Há um desafio em comprovar que os métodos atuais que promovem a cogeração são confiáveis, já que os equipamentos envolvidos são de domínio tecnológico da engenharia nacional como a caldeira, turbina e gerador, e seu emprego favorecem a lucratividade da indústria.

Os projetos voltados para melhoria da eficiência energética nas plantas de cogeração destas indústrias são de fundamental importância para incremento na geração de bioeletricidade. A viabilidade é comprovada sempre no balanço do investimento na melhoria comparado ao ganho na comercialização da bioeletricidade adicional a ser exportada.

Referências Bibliográficas

ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica, Cana-de-açúcar um produto energético sustentável, Revista Abinee, Ano XII - nº 55 março/2010.

ALCARDE, André Ricardo – Processamento da Cana-de-Açúcar. Disponível em http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_102_22122006154841.html. Acesso em 08.03.11 as 18:01h.

ALCOOLBRÁS, Artigo Técnico – Bioeletricidade com Eficiência. Revista Alcoolbrás edição n°130, 2011.

ANDERSON, P. M., FOUAD, Power System and Stability, IEEE Press, New York, 1994.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, Leilão de Energia de Reserva. Disponível em http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=3538&id_area=. Acesso em 22.05.2011 as 22:42h.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, Resolução n° 394 de 04 de dezembro de 1998.

AREVA KOBLITZ, Revista Energia, out/nov/dez 2009.

BARROS, L., Material de Treinamento em Turbinas a Vapor, Siemens – Demag Delaval Industrial Turbomachinery, Taubaté-SP, 2000.

BNDES, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – Determinantes do Baixo Aproveitamento do Potencial Elétrico do Setor Sucroenergético: Uma Pesquisa de Campo. Piracicaba, 2011.

BRESSAN, F., Universidade Petrobrás – Curso de Turbinas a Vapor para Engenheiros Eletricistas, Siemens, versão 1.0, Jundiaí-SP, 2008.

CARDOSO, M.S.; SILVA, V.N.O.; CARDOSO, C.S.; CORREIA, R.S. – Bagaço da

Cana: Fonte de Energia Alternativa nas Usinas de Alagoas. Disponível em http://files.simagauneal.webnode.com.br/200000059-8575d866f9/Baga%C3%A7o%20da%20cana%20fonte%20de%20energia%20alternativa%20nas%20usinas%20de%20Alagoas.pdf . Acesso em 25.07.2011.

CEISE, Centro Nacional das Indústrias do Setor Sucroenergético e Biocombustíveis – Proposta para o Desenvolvimento da Bioeletricidade no Setor Sucroenergético. Sertãozinho, 2011.

COGEN, Cogeração – Bioeletricidade & Gás Natural – Energia Positiva para o Desenvolvimento Sustentável. Disponível em http://foruns.bc.unicamp.br/Arquivos%20Bibioteca%20Virtual/Palestras/FORUM%20DIA%2011-05/LSCF_Unicamp_Mai_2011.pdf. Acesso em 05.11.11.

COGEN, Programa Bioeletricidade 2011-2020. Disponível em http://www.cogen.com.br/workshop/2010/Bioeletricidade_2011_2020_27052010.pdf . Acesso em 03.11.11.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento – A Geração Termelétrica com a Queima do Bagaço de Cana-de-Açúcar no Brasil. Análise do Desempenho da Safra 2009-2010. Brasília, 2011.

EBAH, Geradores de Vapor. Disponível em http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAHEAAF/geradores-vapor. Acesso em 01.02.2012.

ENGINEERING TOOLBOX, Mollier Diagram for Water-Steam. Disponível em http://www.engineeringtoolbox.com/mollier-diagram-water-d_308.html. Acesso em 22.05.2011 as 20:50h.

ETANOL VERDE, Etanol, uma atitude inteligente. Como e por que o álcool combustível melhora a sua vida e a do planeta. Disponível em www.etanolverde.com.br. Acesso em 27.09.2010 as 13:53h.

GOLDEMBERG, J., NIGRO, F. E. B., COELHO, S. T., Bioenergia no Estado de São Paulo – Situação Atual, Perspectivas, Barreiras e Propostas, São Paulo, 2008.

HPB Engenharia e Equipamentos, Casos de Aplicações. Disponível em http://www.hpb.com.br/produtos/casos/detalhes/. Acesso em 07.11.11.

IBGE, Projeção da População do Brasil; disponível em http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=207. Acesso em 17/11/2010 as 14:31h.

IE, Instituto de Engenharia – Notícias-Energia; disponível em http://www.ie.org.br/site/noticia.php?id_sessao=4&id_noticia=5283. Acesso em 05.05.2011.

KUNDUR, P., Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994.

LAMONICA, H. M., Geração de Eletricidade a partir da Biomassa da Cana-de-Açúcar, CTC – Centro de Tecnologia Canavieira, Rio de Janeiro, 2005.

LORA, E. E. S., NASCIMENTO, M. A. R., Geração Termelétrica – Planejamento, Projeto e Operação, Ed. Interciência, Vols. 1 e 2, Rio de Janeiro, 2004.

MME – Ministério de Minas e Energia, Plano Nacional de Energia (PNE) 2030, Brasília, 2007.

MME – Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética, Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2010–2019, Brasília, 2010.

MME – Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética, Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2008–2017, Rio de Janeiro, 2009.

MME – Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética, Plano Decenal de Expansão de Energia 2020, Brasília, 2011.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N. – Fundamentals of Engineering Thermodynamics. John Wiley & Sons Inc. 5th Edition. England, 2006.

NETO, José Ieda – Implementação da Cogeração no Grupo São João de Araras -Redução do Consumo de Vapor através da Eletrificação de Moendas Secadoras. Ribeirão Preto, 2011.

PETROBRAS, Ampliação da Indústria do Álcool: Oportunidade para Geração de Energia Elétrica. http://www.metodoeventos.com.br/4eficienciaenergetica/downloads/22-05-2007/tarde/jair_arone_maues.pdf. Acesso em 05.03.2011.

PISTORE, Thiago Teodoro – Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da

Eletrificação das Moendas na Indústria Sucroalcooleira, Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2004.

RENK AKTIENGESELLSCHAFT, High Speed Gearboxes – Innovative Gear in Power Plants Systems. Disponível em http://www.renk.newsfactory.de/cms_media/objekte/206-Turbo_GB%206-seitig.pdf. Acesso em 05.11.11.

RENK ZANINI, Turbo Gear Unit TA – Single Stage with Horizontal Offset Shafts, 2001.

REVISTA ENGENHARIA, Paulo Vieira de Souza é o Eminente Engenheiro do Ano de 2009, Engenho Editora Técnica, Nº 596, São Paulo, 2009.

ROMÃO, Ricardo Agudo – Análise da Viabilidade do Aproveitamento da Palha da Cana de Açúcar para Cogeração de Energia numa Usina Sucroalcooleira. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia – UNESP, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Ilha Solteira – SP, 2009.

SHLYAKHIN, P., Steam Turbines – Theory and Design. Moscow, 1994.

SIEMENS, Eletrificação de Moendas; disponível em http://www.siemens.com.br/medias/FILES/5295_20081103130142.pdf. Acesso em 28.06.2011.

SIEMENS, Four-Pole Air-Cooled Generator up to 65 MVA Salient Pole Design. Short Description. Germany, 2003.

SIEMENS, SST-300 Steam Turbine for Economical Production of Heat and Power. Erlangen, Germany, 2005.

SMA, Secretaria do Meio Ambiente – Projeto Etanol Verde, Protocolo Agroambiental. Disponível em http://www.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/index.php. Acesso em 09.11.2011.

SOUSA, Eduardo L. Leão de; MACEDO, Isaias de Carvalho – Etanol e Bioeletricidade: a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética, Editora Luc Projetos de Comunicação, São Paulo, 2010.

UNICA, Ciclo Econômico da Cana-de-Açúcar. Disponível em http://www.unica.com.br/content/show.asp?cntCode=8875C0EE-34FA-4649-A2E6-80160F1A4782. Acesso em 31.10.2011.

UNICA, CTC – Bioeletricidade - Programa "Retrofit & Palha 2011-2015". São Paulo, 2011.

UNICA, Protocolo Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro. Disponível em http://www.unica.com.br/content/show.asp?cntCode={BEE106FF-D0D5-4264-B1B3-7E0C7D4031D6}. Acesso em 09.11.2011.

UNICA, Ranking da produção de cana, açúcar e etanol das unidades da Região Centro-Sul. Disponível em http://www.unica.com.br/downloads/estatisticas/ranking0809.xls. Acesso em 22.05.2011.

ANEXO I

Protocolo Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro

Anexo I

Protocolo Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro

Fonte: Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo

O Protocolo

O Protocolo Agroambiental, assinado pelo Governador de São Paulo, pelos Secretários de Estado do Meio Ambiente e de Agricultura e Abastecimento e pelos presidentes da União da Indústria Sucroalcooleira (UNICA) e da Organização de Plantadores de Cana da Região Centro-Sul do Brasil (ORPLANA), faz parte do Projeto Etanol Verde, um dos 21 projetos estratégicos da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, que tem o objetivo de desenvolver ações que estimulem a sustentabilidade da cadeia produtiva de açúcar, etanol e bioenergia.

Tal iniciativa se desenvolveu a partir de um entendimento entre governo, usinas e fornecedores de cana-de-açúcar sobre a necessidade de organizar a atividade agrícola e industrial de modo a promover a adequação ambiental e minimizar, conseqüentemente, os impactos sobre o meio ambiente e a sociedade. Isso é especialmente importante em um setor que vem apresentando crescimento significativo e representando uma parcela cada vez maior na economia do Estado.

O Protocolo Agroambiental visa reconhecer e premiar as boas práticas ambientais do setor sucroenergético com um certificado de conformidade, renovado anualmente. Por meio da publicidade do certificado concedido às unidades agroindustriais e às associações de fornecedores de cana, o Protocolo influencia na imagem das usinas e associações frente ao mercado interno e externo, determinando um padrão positivo de planos e metas de adequação ambiental a ser seguido.

Em seu terceiro ano de atuação no Estado de São Paulo, o instrumento cobre alguns dos principais pontos de redução de impactos da cultura. Entre eles, a antecipação dos prazos de eliminação da queima da palha da cana, a proteção dos remanescentes florestais de nascentes e de matas ciliares, o

controle das erosões e melhores práticas de uso do solo, o adequado gerenciamento das embalagens de agrotóxicos, além da redução de consumo de água na etapa industrial.

Objetivos

O objetivo principal do Projeto Ambiental Estratégico Etanol Verde é estabelecer uma parceria com o setor sucroenergético paulista a fim de desenvolver tratativas diferenciadas que focam a cooperação e pró-atividade do setor e que estabelecem, de forma clara e objetiva, parâmetros positivos viáveis e passíveis de aplicação e monitoramento a serem adotados pelos produtores de açúcar, etanol e bioenergia.

Assim, torna-se possível estimular a produção sustentável de etanol, respeitando os recursos naturais e controlando a poluição, sem descuidar da população da região nem prejudicar o desenvolvimento regional.

Também são ações do projeto articular e subsidiar o órgão licenciador nos procedimentos de licenciamento e na padronização de dados enviados nos estudos ambientais, e contribuir para o Sistema Estadual de Informações Ambientais, com informações sobre cobertura florestal e áreas de recuperação florestal do Estado.

Diretivas

O Protocolo define diretivas técnicas ambientais a serem implementadas pelas Unidades Agroindustriais e pelas Associações de Fornecedores de Cana aderentes, sendo muitas delas mais restritivas que a legislação ambiental aplicável no Estado de São Paulo.

Diretivas ambientais – Usinas

- redução do prazo legal de queima da palha de cana-de-açúcar (Lei Estadual nº 11.241/02) para 2014, ao invés de 2021, em áreas mecanizáveis e para 2017, ao invés de 2031, em áreas não mecanizáveis;
- não utilizar a queima da cana-de-açúcar para colheita nas áreas de expansão de canaviais;
- adotar ações para que não ocorra a queima a céu aberto do bagaço de cana ou de qualquer outro subproduto da cana-de-açúcar;

- proteger as áreas de matas ciliares das propriedades canavieiras, devido à relevância de sua contribuição para a preservação ambiental e proteção à biodiversidade;
- proteger as nascentes de água das áreas rurais do empreendimento canavieiro, recuperando a vegetação ao seu redor;
- proposição e implantação de plano técnico de conservação do solo;
- proposição e implantação de plano técnico de conservação dos recursos hídricos e minimização do consumo de água;
- plano de gerenciamento de resíduos gerados no processo agroindustrial e;
- plano de minimização de geração de poluentes atmosféricos.

Diretivas ambientais - Associações de Fornecedores

- redução do prazo legal de queima da palha de cana-de-açúcar (Lei Estadual nº 11.241/02) para 2014, ao invés de 2021, em áreas mecanizáveis acima de 150 ha e para 2017, ao invés de 2031, em áreas não mecanizáveis e em áreas menores que 150 ha;
- não utilizar a queima da cana-de-açúcar para colheita nas áreas de expansão de canaviais;
- adotar ações para que não ocorra a queima a céu aberto do bagaço de cana ou de qualquer outro subproduto da cana-de-açúcar;
- proteger as áreas de matas ciliares das propriedades canavieiras, devido à relevância de sua contribuição para a preservação ambiental e proteção à biodiversidade;
- proteger as nascentes de água das áreas rurais, recuperando a vegetação ao seu redor;
- proposição e implantação de plano técnico de conservação do solo;
- proposição e implantação de plano técnico de conservação dos recursos hídricos e minimização do consumo de água;

Desafios

As atividades agrícolas e industriais do setor sucroenergético têm grande influência sobre o meio ambiente. A expansão das áreas de cultivo em função do aumento da demanda traz consigo inevitáveis impactos ambientais no solo, recursos hídricos e sobre a fauna e flora. No entanto, para grande parte destes impactos há o potencial de mitigação, sendo que algumas situações requerem ações mais onerosas, enquanto outras podem ser facilmente resolvidas por meio de um planejamento mais adequado das atividades produtivas.

Os principais impactos ambientais decorrentes da atividade do setor são:

- utilização da prática de colheita por meio da queima da palha da cana e acidentes relacionados ao fogo em áreas indesejáveis;
- perda de solo por erosão hídrica;
- acidentes relacionados à contaminação dos recursos hídricos por meio do manejo inadequado de agrotóxicos;
- excesso do consumo de água nos processos industriais;
- geração de poluentes atmosféricos;
- geração de vinhaça e possível contaminação de cursos d'água com o manejo inadequado deste subproduto;
- implantação de grandes áreas de monocultura resultando na formação de extensos espaços contínuos de plantio de cana-de-açúcar;
- supressão de vegetação ciliar de corpos d'água e nascentes e corte de indivíduos isolados, e a conseqüente redução da biodiversidade, tanto de flora quanto de fauna.

A prática da queima da palha da cana para a colheita manual tem sérios impactos sobre o meio ambiente e a saúde pública. A utilização inadequada do fogo causa impactos negativos sobre a fauna, aprisionando animais silvestres no meio do fogo do canavial, e sobre a flora, com a eventual propagação do fogo para áreas de mata. Além disso, os gases formados durante a queima da cana contribuem para a formação da chuva ácida e para o aquecimento global. A liberação de material particulado e de aerossóis durante a queima tem sérios efeitos danosos ao sistema respiratório humano, afetando principalmente crianças e idosos.

Para a eliminação da queima da palha da cana-de-açúcar e a implementação de um sistema de colheita mecanizado, deve-se investir em máquinas, equipamentos e capacitação de mão de obra, além de adequar a configuração dos talhões para a adequada movimentação das máquinas. A colheita da cana crua deixa a palha da cana no solo, protegendo-o de fatores

de degradação como ventos e chuvas, além de manter a umidade e aumentar seu teor de nutrientes. O sombreamento do solo propiciado pela camada de palha ainda ajuda a prevenir o crescimento de plantas indesejadas.

Parte da palha pode ainda ser aproveitada em outros processos, como na produção de energia elétrica. De um modo geral, a queima do bagaço nas caldeiras já produz energia suficiente para suprir o consumo da usina; com a queima adicional da palha as usinas podem gerar excedentes de energia para serem exportados para a rede elétrica.

Contudo, o processo de mecanização ainda recebe algumas críticas. A colheita mecanizada pode ser economicamente inviável para pequenos produtores, além de ser mais difícil a entrada de maquinário em propriedades pequenas. Ainda, as máquinas atualmente disponíveis não comportam a colheita em áreas de declive. O processo também enfrenta pesadas críticas no aspecto social, pois a mecanização diminui a necessidade de mão de obra do campo e requer programas de capacitação para realocação parcial dos funcionários em outras funções da agroindústria, compensando com o aumento na demanda para operação de maquinários e na formação de frentes de colheita mecânica, por exemplo.

Em relação ao uso da água, todo o consumo ocorre no processamento industrial da cana. Os problemas relacionados ao excesso de uso de água estão sendo resolvidos com modificações nas plantas agroindustriais para a implantação de sistemas de reuso e de sistemas fechados. A maior pressão para estas modificações estruturais parte de exigências dos órgãos ambientais para a renovação de licenças de operação e pela iminente implantação do sistema de cobrança pelo uso da água.

A extensão da monocultura da cana por grandes áreas levou, durante anos de desenvolvimento do setor, à devastação de áreas de vegetação nativa, inclusive da vegetação ao longo de cursos d'água e de nascentes, protegidas por lei pela função ecológica e estrutural que elas desempenham. As matas ciliares estruturam os solos das margens dos rios, preservando a qualidade do solo e prevenindo a erosão e mantendo a qualidade e quantidade da água. Desta forma, a preservação desta vegetação é extremamente importante para manter a integridade dos recursos naturais e a qualidade da área de cultivo.

Atualmente, já vêm sendo observadas diversas alterações de comportamento do setor sucroenergético frente às questões ambientais e sociais, devido principalmente às demandas dos mercados interno e externo em relação à sustentabilidade sócio-ambiental. O principal desafio para o setor é provar ao mercado consumidor que a produção de açúcar e etanol brasileiros é feita com responsabilidade social e com técnicas produtivas pouco impactantes ao meio ambiente.

O setor tem um grande potencial para aumentar o valor agregado de suas atividades, uma vez que a porção da cana-de-açúcar utilizada para produção de açúcar e etanol corresponde à apenas um terço do potencial energético da planta. Os outros dois terços são representados pelo bagaço e folhas, que podem ser utilizados para produção de energia elétrica, dentre outros usos. Já existem, em escala experimental, as tecnologias de produção do etanol de segunda geração por hidrólise da celulose e de gaseificação da biomassa da cana, que permitem, por meio da obtenção de gás de síntese, a fabricação de produtos como gasolina, plásticos e diesel. O desenvolvimento da cadeia alcoolquímica também abrirá mais possibilidades de agregação de valor na cadeia produtiva.

Ganhos Ambientais

Estima-se que no ano 2014 haverá no Estado de SP cerca de 7 milhões de hectares de cana plantada. Dessa área, cerca de 5,9 milhões de hectares serão em áreas mecanizáveis. Os restantes 1,1 milhões de hectares estarão em áreas não-mecanizáveis, com declividade acima de 12%. Sem o Protocolo e atendendo à Lei 11.241 de 2002, teríamos no ano 2014 ainda 3,83 milhões de hectares sendo queimados. Com o Protocolo, toda a área mecanizável será colhida crua, sem queima. Da área total, haverá queima em apenas 440 mil hectares, ou menos.

A redução da quantidade de água utilizada no processamento industrial da cana, estabelecendo como meta o uso de 0,7 - 1 m^3 de água por tonelada de cana-de-açúcar processada (Resolução SMA – 88, de 19/12/08), é outra ação do Protocolo que, em conjunto com os outros instrumentos da Secretaria do Meio Ambiente, visa melhorar a eficiência dos processos industriais, poupando um recurso ambiental cada vez mais escasso.

Outro ponto positivo desencadeado pelo Protocolo Agroambiental é o compromisso das signatárias em proteger e favorecer a recuperação de suas áreas de mata ciliar. Nas áreas canavieiras das usinas e propriedades de fornecedores de todo o Estado de São Paulo estão declarados mais de 250 mil hectares de matas ciliares, algo nunca antes assumido por nenhum setor agropecuário no Brasil.

Operacionalização

A adesão das Unidades Agroindustriais ao Protocolo é voluntária e feita individualmente, ao passo que a adesão dos fornecedores deve, obrigatoriamente, ser realizada por meio de uma Associação.

As usinas e associações interessadas em aderir ao Protocolo entregam à Secretaria de Meio Ambiente um plano de ação que estabelece medidas detalhadas, metas e prazos para cumprimento das diretivas técnicas definidas pelo Protocolo. Os Planos de Ação são ótimas ferramentas para a criação de bases de dados sobre o setor sucroenergético, pois sistematizam as propostas de ações por parte das Unidades e Associações aderentes e permitem o acompanhamento e monitoramento da realidade das atividades do setor no Estado de São Paulo. Esses dados permitem o delineamento de políticas públicas e indicadores de desempenho para auxiliar as boas práticas da produção de açúcar e álcool e garantir a sustentabilidade ambiental do setor.

Os Planos são analisados por um comitê tripartite formado por técnicos da SMA-SP, SAA-SP e UNICA, que avaliam as ações propostas e cronogramas adotados para aprovar ou requerer complementações ou informações adicionais. Após a aprovação, as usinas recebem um certificado de conformidade que deve ser renovado anualmente após o acompanhamento e avaliações de cumprimento das diretivas; esse certificado pode ser cancelado em caso de inconformidades.

Na página do programa Etanol Verde estão disponíveis as regras para adesão das Unidades Agroindustriais e dos Fornecedores , além da lista das Usinas e Associações de Fornecedores certificadas para o ano corrente.

Novos quesitos que forem negociados pelo comitê tripartite podem ser incorporados na renovação do Certificado. Uma tabela de acompanhamento resume as ações e metas propostas nos Planos de Ação, permitindo a verificação rápida dos programas propostos.

Visitas às Usinas foram previstas na elaboração do Protocolo vêm sendo realizadas desde o ano de 2009, com o objetivo de acompanhar os processos produtivos agrícola e industrial e verificar o cumprimento das diretivas do Protocolo.

Protocolo assinado

PROTOCOLO DE COOPERAÇÃO QUE CELEBRAM ENTRE SI, O GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, A SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE, A SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA E ABASTECIMENTO E A UNIÃO DA AGROINDÚSTRIA CANAVIERA DE SÃO PAULO PARA A ADOÇÃO DE AÇÕES DESTINADAS A CONSOLIDAR O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO.

As partes a seguir nomeadas:

O **GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO** e suas **SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE** e **SECRETARIA DA AGRICULTURA E ABASTECIMENTO**; e

A **UNIÃO DA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA DE SÃO PAULO, UNICA**;

Considerando que:

1. A atividade sucroalcooleira tem relevante importância no Estado de São Paulo, contribuindo significativamente para o seu desenvolvimento econômico e a geração de empregos, renda, divisas e tributos, distribuídos por toda sua cadeia produtiva;

2. As mudanças climáticas globais exigem medidas de responsabilidade entre agentes públicos e privados para evitar o agravamento das condições ambientais e a conseqüente queda da qualidade de vida da população, entre as quais o estímulo ao uso de combustíveis de fontes renováveis;

3. O planejamento da expansão da agricultura energética, nos seus aspectos agro-ambientais, é necessário para o ordenado desenvolvimento da economia paulista, de forma sustentável, baseado na parceria entre instituições públicas e privadas;

Resolvem celebrar o presente **Protocolo Agro-Ambiental do Setor Sucroalcooleiro Paulista**, doravante **Protocolo**, regido pelas clausulas a seguir:

CLÁUSULA PRIMEIRA – DIRETRIZES GERAIS

Na execução do objeto do presente Protocolo, as partes observarão as seguintes diretrizes gerais:

1. A transparência das ações governamentais e empresarias é elemento fundamental da democracia, possibilitando direcionar as condutas de cada setor ao interesse público.

2. Os produtos do setor sucroalcooleiro devem apresentar qualidade compativel com o seu uso e com a legislação aplicável, assegurando-se, de forma adequada, sua oferta a partir da produção sustentável e com responsabilidade social.

3. O etanol é energia de fonte renovável, sendo opção economicamente viável para a mitigação do efeito estufa e importante instrumento para a prevenção e controle da poluição atmosférica.

CLÁUSULA SEGUNDA – OBJETO

O presente Protocolo tem por objeto promover a cooperação técnica e institucional entre as partes de forma a criar condições que viabilizem, de forma objetiva e transparente, o

desenvolvimento de um conjunto de ações para a consolidação do processo de desenvolvimento sustentável do setor sucroalcooleiro no Estado de São Paulo.

Mediante adesão voluntária ao **Protocolo**, os produtores de cana-de-açúcar e as indústrias que a processam se comprometem a respeitar as Diretivas Técnicas descritas na Cláusula Terceira, abaixo.

CLÁUSULA TERCEIRA – DIRETIVAS TÉCNICAS

I. Os produtores e as indústrias de cana-de-açúcar que aderirem ao **Protocolo** deverão:

a. Antecipar, nos terrenos com declividade até 12%, o prazo final para a eliminação da queimada da cana de açúcar, de 2021 para 2014, adiantando o percentual de cana não queimada, em 2010, de 50% para 70%;

b. Antecipar, nos terrenos com declividade acima de 12%, o prazo final para a eliminação da queimada da cana de açúcar, de 2031 para 2017, adiantando o percentual da cana não queimada, em 2010, de 10% para 30%;

c. Não utilizar a prática da queima da cana-de-açúcar para fins de colheita nas áreas de expansão de canaviais;

d. Adotar ações para que não ocorra a queima, a céu aberto, do bagaço de cana, ou de qualquer outro subproduto da cana-de-açúcar;

e. Proteger as áreas de mata ciliar das propriedades canavieiras, devido à relevância de sua contribuição para a preservação ambiental e proteção à biodiversidade;

f. Proteger as nascentes de água das áreas rurais do empreendimento canavieiro, recuperando a vegetação ao seu redor;

g. Implementar Plano Técnico de Conservação do Solo, incluindo o combate à erosão e a contenção de águas pluviais nas estradas internas e carreadores;

h. Implementar Plano Técnico de Conservação de Recursos Hídricos, favorecendo o adequado funcionamento do ciclo hidrológico, incluindo programa de controle da qualidade da água e reuso da água utilizada no processo industrial;

i. Adotar boas práticas para descarte de embalagens vazias de agrotóxicos, promovendo a tríplice lavagem, armazenamento correto, treinamento adequado dos operadores e uso obrigatório de equipamentos de proteção individual; e

j. Adotar boas práticas destinadas a minimizar a poluição atmosférica de processos industriais e otimizar a reciclagem e o reuso adequados dos resíduos gerados na produção de açúcar e etanol.

CLÁUSULA QUARTA – APOIO GOVERNAMENTAL

A administração pública estadual por sua vez atuará no sentido de:

a. Fomentar a pesquisa para o aproveitamento energético e econômico da palha da cana-de-açúcar;

b. Apoiar a instalação de infra-estrutura logística sustentável para a movimentação de produtos da agroindústria da cana-de-açúcar no Estado, com ênfase nas exportações,

visando a otimização dos modais de transportes e a redução do tráfego potencial de veículos pesados nas regiões metropolitanas e nos acessos aos portos;

c. Conceder o certificado de Conformidade Agro-Ambiental aos produtores agrícolas e industriais de cana-de-açúcar que aderirem ao Protocolo e atenderem as Diretivas Técnicas constantes deste Protocolo; e

d. Estimular a adequada transição do sistema de colheita de cana queimada para a colheita de cana crua, em especial para os pequenos e médios plantadores de cana, com área de até 150 hectares.

CLÁUSULA QUINTA – OBRIGAÇÃO DAS PARTES

I. A implementação desse Protocolo está condicionada ao integral cumprimento de todas as cláusulas conjuntamente, de forma tal que o descumprimento de qualquer uma delas desobriga o cumprimento de todas as demais;

II. Dar apoio para a realização dos objetivos do presente Protocolo e oferecer transparência às informações e ações decorrentes de seu cumprimento;

III. Participar conjuntamente, da formulação e análise de possíveis convênios de interesse para o desenvolvimento do presente Protocolo;

IV. Constituir um Grupo Executivo, composto por 3 (três) técnicos e respectivos suplentes, indicados pelos setores públicos e privados, que terão a responsabilidade de zelar pela operacionalidade das ações, estabelecendo metodologia para avaliação global das metas, podendo inclusive propor ajustes e adequações do presente Protocolo, e definir critérios para a expedição e renovação de Certificado de Conformidade Agro-ambiental.

V. Desconsiderar das metas, as queimadas de natureza criminosas ou acidentais, as quais deverão ser registradas junto às autoridades competentes com comprovação por meio de boletins de ocorrências.

CLÁUSULA SEXTA - PRAZO

O presente **Protocolo** entrará em vigor na data de sua assinatura, com prazo de vigência de 60 (sessenta meses), prorrogáveis, por meio de Termo Aditivo com a participação de todas as partes.

E por estarem justas e acertadas, assinam o presente instrumento em **4** vias de um só teor e efeito.

São Paulo, 04 de junho de 2007.

Governo do Estado de São Paulo
Governador José Serra

União da Agroindústria Canavieira de São Paulo
Eduardo Pereira de Carvalho

Secretaria do Meio Ambiente
Francisco Graziano Neto

Secretaria da Agricultura e Abastecimento
João de Almeida Sampaio Filho