

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA DA ESCOLA
POLITÉCNICA DA USP

Alex Sandro Costa Amorim

**Cogeração em usinas de açúcar e álcool; história,
desafios e oportunidades.**

São Paulo

2015

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA DA ESCOLA
POLITÉCNICA DA USP

Alex Sandro Costa Amorim

**Cogeração em usinas de açúcar e álcool; história,
desafios e oportunidades.**

Monografia apresentado ao Programa de
Educação Continuada da Escola Politécnica de
São Paulo para obtenção do título de Especialista
em Energias Renováveis, Geração distribuída e
Eficiência Energética.

Orientador: Prof. Msc. Ronaldo Andreos

São Paulo

2015

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial desse trabalho, por qualquer meio, seja convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada à fonte.

AMORIM, Alex Sandro Costa

Cogeração em usinas de açúcar e álcool; história, desafios e oportunidades. / Alex Sandro Costa Amorim – São Paulo, 2015.

90 f.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

Orientador: Prof. Msc. Ronaldo Andreos

1. Indústria sucroalcooleira 2. Bagaço de cana 3. Biomassa
4. Cogeração de energia elétrica. 5. Bioeletricidade
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Programa de Educação Continuada em Engenharia II. t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem ele não somos nada.

Agradeço à minha família principalmente a minha esposa Viviane e aos meus filhos Pietro e Davi por terem paciência durante a minha ausência para a dedicação a esse trabalho de conclusão de curso.

Agradeço a minha mãe Laudia que com as suas palavras de sabedoria me incentivaram em momentos difíceis.

Agradeço ao Sr. Welington Abadio - Consultor de novos negócios da empresa Siner Engenharia, que com muita paciência me orientou em vários momentos.

Agradeço ao Prof. Msc. Ronaldo Andreos pelas as orientações precisas para o desenvolvimento dessa monografia.

RESUMO

AMORIM, A. S. C. Cogeração em usinas de açúcar e álcool; história, desafios e oportunidades. 2015. 90 F. Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética). Escola Politécnica da Universidade de São Pulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

O desenvolvimento do país está ligado diretamente a capacidade de geração de energia elétrica. Uma crise nesse setor limita o desenvolvimento da infraestrutura básica, não sendo possível a construção de novos empreendimentos como indústrias, hotéis, residências etc. Ou seja, a economia se estagna, novos negócios são perdidos e por consequência deixasse de gerar novos empregos.

Atualmente, o Brasil passa por uma crise energética, onde a falta das chuvas na região Sudeste e Nordeste do país que afeta a nossa principal fonte de energia, a Hidroeletricidade, responsável por 65,85% de toda a geração nacional. O Brasil é conhecido mundialmente por ter uma matriz energética limpa, porém com a falta de água, o Operador Nacional do Sistema (ONS) aciona as usinas termelétricas a base de combustíveis fósseis para complementar a demanda de energia. Até então, as usinas termelétricas foram construídas para atendimentos emergenciais, no entanto, se tornaram fundamentais para o Sistema Interligado Nacional (SIN). Os fatores negativos dessa forma de geração são o valor por megawatt-hora, que chega a ser 8x maior do que as gerações hídricas ou eólicas, valores são repassados para os consumidores finais. Os poluentes emitidos na atmosfera causando impactos ambientais irreparáveis é outro fator contra a esse modo de geração.

É muito claro que a matriz energética brasileira necessita cada vez mais de fontes alternativas. Nos últimos anos as energias renováveis teve uma leve crescente, destaque para as energias eólica e solar. Porém, os altos valores para implantações e operações dessas plantas as inviabilizam diante de projetos como de PCH's e Hidroelétricas, em que seu insumo para esse tipo de geração não tem custo "água", consequentemente barateando o valor final do kWh ao consumidor. A geração de energia elétrica através da biomassa especificamente a base do bagaço de cana, é uma ótima alternativa para amenizar os impactos causados por essa crise. Pensando pelo lado social e econômico, uma indústria de açúcar e álcool gera milhares de empregos diretos e indiretos. Esse trabalho tem como finalidade estudar a cogeração em usinas de cana de açúcar, retratando sua história, desafios

percorridos ao longo do tempo, assim como as grandes oportunidades apresentadas até momento.

Serão apresentadas simulações de viabilidade técnica econômica, onde que será proposto o aumento da moagem de cana, para uma usina que possui atualmente um sistema de cogeração que visa apenas a geração de energia elétrica e térmica para seu próprio consumo. Devido ao aumento dessa moagem de cana será possível produzir uma maior quantidade de energia elétrica sendo assim possível a venda desse excedente. Será representado o balanço energético, onde será possível dimensionar a capacidade da geração elétrica nessa nova configuração. Os cálculos de viabilidade econômica terão dois cenários, o primeiro será a venda de energia elétrica no mercado regulado e o segundo a venda no mercado livre. Os custos de operação e manutenção serão analisados ao longo do tempo, ou seja, fluxo de caixa (Operação/ Manutenção), possibilitando obter os indicadores como: tempo de retorno do investimento (Pay back), Taxa interna de retorno (TIR), e valor presente líquido (VPL).

O intuito é demonstrar de maneira prática e objetiva a importância que a cogeração em usinas de açúcar e álcool tem para o Brasil.

Palavras-chave: Indústria sucroalcooleira, bagaço de cana, biomassa, cogeração e bioeletricidade.

ABSTRACT

The country's development is directly linked to the capacity of power generation. A crisis in the sector limits the development of basic infrastructure; it is not possible to build new ventures as industries, hotels, homes etc. That is, the economy stagnates, new businesses are lost and consequently failed to generate new jobs.

Currently, Brazil is going through an energy crisis, where the lack of rain in the Southeast and Northeast of the country that affects our main source of energy, Hydroelectricity, accounting for 65.85% of the entire national generation. Brazil is known worldwide for having a clean energetic matrix, but with the lack of water, the National System Operator (ONS) drives the thermal power plants based on fossil fuels to supplement energy demand. Until then, the power plants were built to emergency care, however, have become central to the National Interconnected System (SIN). The negative factors of this form of generation is the value per megawatt-hour, that it's 8x higher than water or wind generation, values are passed on to final consumers. The pollutants emitted into the atmosphere causing irreparable environmental impacts is another factor against this generation mode.

It is very clear that the Brazilian energy matrix increasingly needs from alternative sources. In recent years renewable energy has a growing light, especially wind and solar energy. But high values for deployments and operations of these plants on the unfeasible projects as PCH'se Hydroelectric, where your input for this type of generation does not cost "water", thus cheapening the final value of kWh consumer. The generation of electricity from biomass specifically the basis of sugarcane bagasse, is a great alternative to mitigate the impacts of this crisis. Thinking about the social and economic side, a sugar and alcohol industry generates thousands of direct and indirect jobs. This work aims to study the cogeneration in sugar cane mills, depicting its history, challenges traveled over time, as well as the great opportunities presented to time.

Economic technical feasibility simulations will be presented, which will be proposed to increase the sugarcane crushing to a plant which currently has a cogeneration system that aims only to generate electric and thermal energy for their own consumption. Due to this increase in sugar cane crushing it is possible to

produce a greater amount of electrical energy being thus possible to sell this surplus. Energy balance, where it will be possible to measure the electrical generation capacity in this new configuration will be represented. The economic viability calculations will have two scenarios, the first is the sale of electricity in the regulated market and the second sale on the open market. The operation and maintenance costs will be analyzed over time, ie, cash flow (Operation / Maintenance), allowing obtain indicators such as return on investment time (pay back), Internal Rate of Return (IRR), and net present value (NPV).

The aim is to demonstrate a practical and objective way the importance of cogeneration in sugar mills and alcohol has for Brazil.

Keywords: Sugarcane industry, bagasse of cane, biomass, cogeneration and bioelectricity.

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

SIN	Sistema Interligado Nacional
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
PROINFRA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
IAA	Instituto do Açúcar e Alcool
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
ACR	Ambiente de Contratação Regulado
ACL	Ambiente de Contratação Livre
MDL	Mecanismo do Desenvolvimento Limpo
FUE	Fator de Utilização de Energia
ÚNICA	União dos Produtores de Cana-de-açúcar
UDOP	União dos Produtores de Bioenergia
CTC	Centro de Tecnologia Copersucar
ATR	Açúcares Totais Recuperáveis
AVGAS	Gasolina da Aviação
APE	Autoprodução de Energia
PIE	Produção Independente de Energia
REG	Registro do Empreendimento Gerador de energia
VPL	Valor Presente Líquido
TIR	Taxa Interna de Retorno
PAY BACK	Tempo de Retorno do Investimento
PCI	Poder Calorífico Inferior
TUST	Tarifas de Uso dos Sistemas de Transmissão
TUSD	Tarifas de Uso dos Sistemas de Distribuição
MW	Megawatt
kW	Quilowatt
MWh	Megawatt hora
Hz	Hertz
MIL	Milhões

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema simplificado de cogeração.....	3
Figura 2 - Esquema simplificado de uma usina de açúcar e álcool.....	4
Figura 3 - Ciclo de Carnot em Diagrama p-v.....	6
Figura 4 - Ciclo Rankine em Diagrama p-v.....	7
Figura 5 - Turbina a vapor.....	8
Figura 6 - Corte de uma turbina a vapor multiestágios.....	9
Figura 7 - Esquema simplificado de uma caldeira.....	11
Figura 8 - Caldeira a vapor.....	12
Figura 9 - Redutor de velocidades	13
Figura 10 - Esquema simplificado do gerador.....	14
Figura 11 - Circuito térmico na indústria sucroalcooleira antiga.....	16
Figura 12 - Circuito térmico na indústria sucroalcooleira moderna.....	16
Figura 13 - Resumo geral FUE.....	19
Figura 14 - Esquema simplificado do rendimento da cogeração.....	20
Figura 15 - Fonte / Potência elétrica instalada	22
Figura 16 - O círculo virtuoso do Álcool	26
Figura 17 - Os três pilares da Sustentabilidade.....	27
Figura 18 - O ciclo do plástico biodegradável.....	28
Figura 19 - Distribuição percentual fabricação veículos Flex	29
Figura 20 - Aeronave Embraer Ipanema (Motor a etanol).....	30
Figura 21 - Resumo do leilão de energia de reserva 14/08/2008.....	31
Figura 22 - Projetos de MDL no Brasil (Energias Renováveis)	32
Figura 23 - Diagrama do processamento da cana	33
Figura 24 - Balança – Pesagem dos caminhões.....	34
Figura 25 - Retirada da amostra da cana através de sonda oblíquas.....	34
Figura 26 - Laboratório para análises químicas da cana-de-açúcar.....	35
Figura 27 - Mesa alimentadora - Lavagem da cana	36
Figura 28 - Pátio de estocagem de cana.....	36
Figura 29 - Picador de cana	37
Figura 30 - Moenda de cana	38
Figura 31 - Difusor de cana	39
Figura 32 - Esteira transportadora de bagaço.....	39
Figura 33 - Caldeira.....	40
Figura 34 - Tratamento do caldo	41
Figura 35 - Evaporação do caldo	42
Figura 36 - Armazém de açúcar	42
Figura 37 - Dornas de fermentação.....	43
Figura 38 - Destilaria	44
Figura 39 - Tanque de vinhaça.....	44
Figura 40 - Tanques de álcool.....	45
Figura 41 - Mapa de produção de cana-de-açúcar	46
Figura 42 - Fontes de energia no Brasil (%).....	50

Figura 43 - Fontes da biomassa.....	51
Figura 44 - Combustíveis utilizados na biomassa (%).....	52
Figura 45 - Partes da cana-de-açúcar.....	56
Figura 46 - Complementaridade da Bioenergia para o SIN.....	58
Figura 47 - Cogeração com turbina de contrapressão	61
Figura 48 - Balanço Térmico – Simulação	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de cana-de-açúcar (2005 - 2014).....	47
Tabela 2 - Produção de álcool (2005 - 2012)	48
Tabela 3 - Produção de açúcar (2005 - 2014).....	49
Tabela 4 - Fontes de energia no Brasil	49
Tabela 5 - Fontes da Biomassa.....	50
Tabela 6 - Combustíveis utilizados na biomassa agroindustriais	51
Tabela 7- Somatório destino da energia	53
Tabela 8 - Somatório destino da energia (Estimativa).....	53
Tabela 9 - Produção de bagaço até o ano de 2030	54
Tabela 10 - Produção de Energia Elétrica em GWh (Estimativa).....	55
Tabela 11 - Balanço energético – Premissas	62
Tabela 12 - Balanço energético – Dados Gerais da Moagem	63
Tabela 13 - Acionamentos de geração com uso de vapor (SAFRA)	63
Tabela 14 - Acionamentos de geração com uso de vapor (ENTRE SAFRA)	64
Tabela 15 - Produção de vapor (SAFRA).....	65
Tabela 16 - Produção de vapor (ENTRE SAFRA).....	65
Tabela 17 - Dados bagaço	66
Tabela 18 - Geração de energia.....	67
Tabela 19 - Geração de energia SAFRA e ENTRE SAFRA.....	67
Tabela 20- Viabilidade econômica - Venda de energia elétrica no mercado regulado	Erro! Indicador não definido.
Tabela 21 - Viabilidade econômica - Venda de energia elétrica no mercado livre	71

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo	1
1.2 Motivação e Justificativas.....	1
2. ESTADO DA ARTE.....	3
2.1 Conceito da cogeração	3
2.1.1 Ciclo de Carnot	5
2.1.2 Ciclo de Rankine simples.....	7
2.2 Equipamentos e tecnologias empregados	8
2.2.1 Turbina a vapor.....	8
2.2.2 Caldeira	11
2.2.3 Redutor de velocidades	13
2.2.4 Gerador elétrico	14
2.3 Configurações básicas e balanço energético.....	16
2.4 Fator de utilização de energia.....	18
2.5 Rendimento da cogeração	19
2.6 Qualificação da cogeração.....	21
3. A INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	23
3.1 História.....	23
3.2 Processos empregados	33
3.3 Capacidade Instalada	46
3.4 Potencial da cogeração do bagaço de cana-de-açúcar ao SIN	52
3.5 Desafios e oportunidades	55
4. APLICAÇÃO DA COGERAÇÃO NA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	59
4.1 Integração da cogeração ao SIN.....	59
4.2 Configuração do sistema de cogeração em estudo	61
4.3 Simulações do balanço energético.....	62
4.4 Análise econômica (Payback, VPL e TIR).....	70
5. CONCLUSÕES	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

1. INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é apresentar a importância da cogeração em usinas de açúcar e álcool para o Sistema Interligado Nacional, pontuando a sua história os desafios percorridos assim como as oportunidades apresentadas para o mercado de energia elétrica brasileira.

1.2 Motivação e Justificativas

As crises no setor energético apresentadas nos últimos anos deixam muito evidentes a necessidade de uma diversificação na matriz energética brasileira, ou seja, novas fontes de energia precisam ser incorporadas ao Sistema Interligado Nacional. A geração de energia elétrica através do bagaço de cana é um forte aliado para combater essas crises. O Estado de São Paulo é um dos maiores produtores de álcool do mundo, os resíduos gerados desse processo podem ser reaproveitados para a cogeração. Segundo a União da Indústria de Cana de Açúcar (UNICA, 2015) há uma expectativa de que o mercado sucroalcooleiro tende a aumentar nos próximos anos. Tornando a Bioeletricidade cada vez mais atrativa para os novos investimentos.

A contribuição da biomassa para o Sistema Interligado Nacional é de extrema importância, pois o período de geração é entre Abril e Novembro, ou seja, existe um equilíbrio no sistema, pois casa com o período de estiagem.

Conforme exposto pela **Dilma Celi** Pena em seminários sobre “Alternativas Energéticas para São Paulo” apresentado pela Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo em outubro de 2007. O estado de São Paulo possui 150 usinas de cogeração produzindo 900 MW médios. Os estudos indicam um potencial de mais 3000 megawatts nos próximos anos. Isto equivale a mais de duas usinas Angra III.

Nas últimas décadas a cogeração em usinas de açúcar e álcool evoluíram consideravelmente. Porém, ainda existem usinas que não vendem o excedente da

energia elétrica gerada. Entende-se que no cenário atual da comercialização regulado de energia os valores estão relativamente baixos, dificultando assim a inserção da energia elétrica proveniente da queima do bagaço da cana. Pensando desta forma, o presente trabalho foi desenvolvido para apresentar os cálculos para dimensionamento básico de um sistema de cogeração, demonstrando valores dos investimentos iniciais para a implantação representando assim a sua viabilidade técnica econômica.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Conceito da cogeração

“A cogeração é a produção simultânea e de forma sequenciada, de duas ou mais formas de energia a partir de um único combustível [...]” (**Cogen** 2015).

Como premissa a cogeração tem como objetivo o aproveitamento máximo da energia da fonte primária, no caso das usinas de açúcar e álcool, o poder calorífico da queima do bagaço de cana ou palha (biomassa).

A figura 1 demonstra um esquema simplificado de um sistema de cogeração. A Caldeira gera vapor tanto para o processo industrial como também para a geração de energia elétrica. No caso, a turbina de extração-condensação é responsável por converter a energia térmica (Vapor) em energia cinética que está instalado diretamente ao eixo do gerador elétrico.

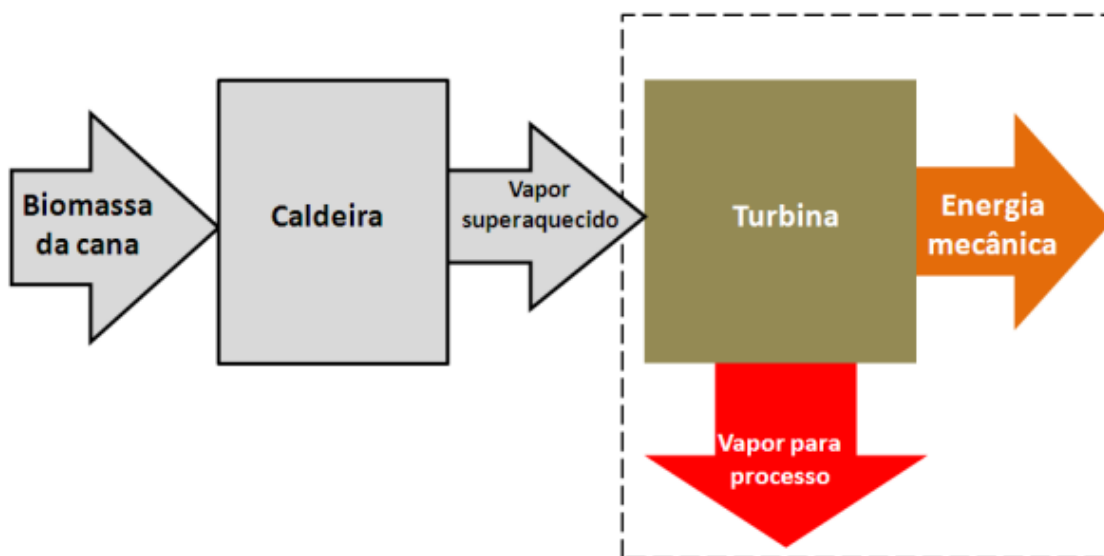


Figura 1 - Esquema simplificado de cogeração
Fonte: SANTOS, FERNANDO ALVES DOS, 2012

A figura 2 demonstra um esquema simplificado de uma usina de açúcar e álcool.

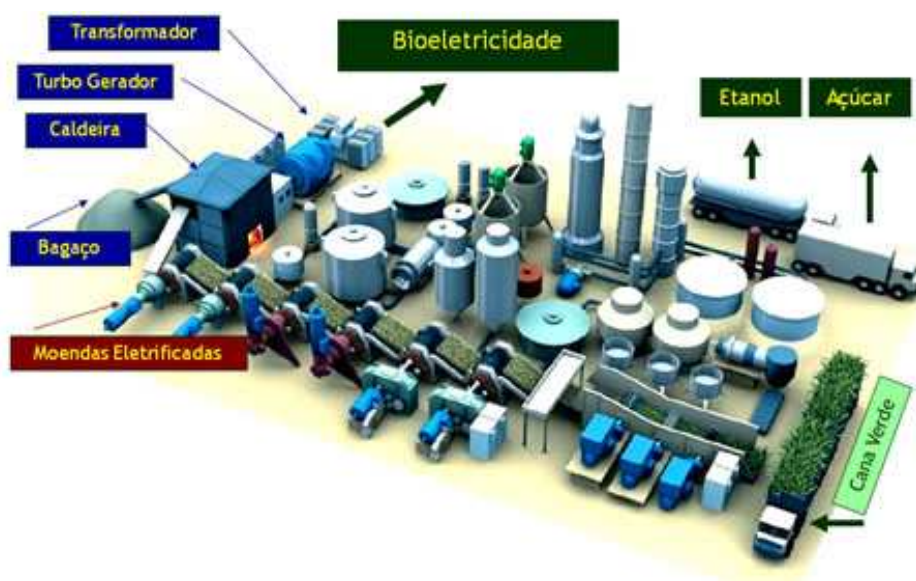


Figura 2 - Esquema simplificado de uma usina de açúcar e álcool

Fonte: COGEN 2015

É possível visualizar o processo de geração de energia de uma usina sucroalcooleira, a biomassa (resíduos do processo) é utilizada como combustível para as Caldeiras, onde as mesmas são responsáveis pela geração de vapor. A energia térmica é utilizada no processo, porém parte dela é destinada a turbina. Assim como a energia elétrica gerada é utilizada para alimentação de cargas da própria usina, o excedente dessa energia é comercializado.

A definição de cogeração para a ANEEL está descrita na Resolução Normativa nº235, de 14 de novembro de 2006 Art. 3º :

I – Cogeração: processo operado numa instalação específica para fins da produção combinada das utilidades calor e energia mecânica, esta geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária.

Para um melhor entendimento do sistema de cogeração em usinas de açúcar e álcool é importante entender os ciclos termodinâmicos de Carnot e Rankine.

2.1.1 Ciclo de Carnot

O ciclo de Carnot é um ciclo termodinâmico teórico, idealizado pelo físico francês Nicolas Léonard Sadi Carnot no século XIX, uma máquina térmica capaz de aproveitar ao máximo o rendimento da transformação de calor em movimento. O ciclo tem como base a duas transformações adiabáticas alternadas com duas transformações isotérmicas, em vista que as mesmas seriam reversíveis. Dito por Sadi Carnot (1986):

[...] Para haver conversão contínua de calor em trabalho, um sistema deve realizar ciclos entre fontes quentes e frias, continuamente. Em cada ciclo, é retirada certa quantidade de calor da fonte quente, que é parcialmente convertida em trabalho, sendo o restante rejeitado para a fonte.

Dá-se o rendimento pelas diferenças das temperaturas de fonte fria e fonte quente do sistema, como definido abaixo pela Eq.(1) (**SIMÕES MOREIRA; PIMENTA, 2011**):

$$\eta_{Carnot} = \frac{W_{liq}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (1)$$

Sendo:

η : Rendimento

W_{liq} : Trabalho útil

Q_H : Energia útil

Q_L : Energia dissipada

T_L : Temperatura da fonte fria

T_H : Temperatura da fonte quente

Exemplo de cálculo:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{300K}{700K}$$

$$\eta_{Carnot} = 0,57 \text{ ou seja } 57\%$$

Esse cálculo demonstra que não é possível transformar 100% do calor em trabalho mecânico, pois existem perdas físicas naturais do processo.

A figura 3 tem como objetivo explicar os processos do ciclo de Carnot:

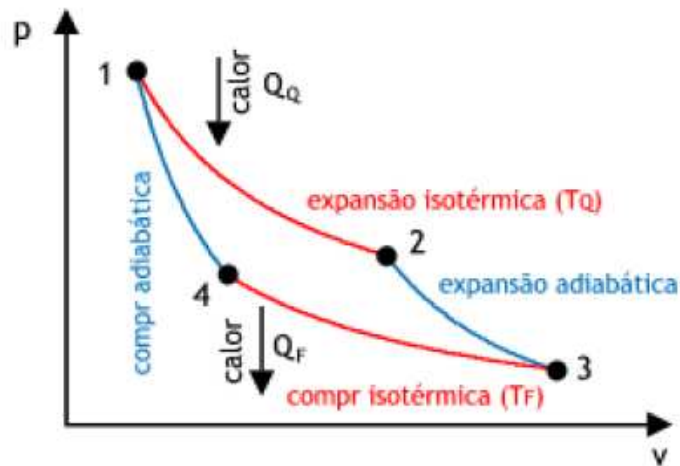


Figura 3 - Ciclo de Carnot em Diagrama p-v

Fonte: DOMINGUES JUNIOR, 2013

Sendo:

- 1 → 2: Expansão isotérmica do fluido em temperatura T_Q ou T_H ao receber calor Q_Q ou Q_H ;
- 2 → 3: Expansão adiabática do fluido onde a temperatura cai de T_Q ou T_H para T_F ou T_L ao gerar trabalho útil $W_{liq} \rightarrow Q_H - Q_L$;
- 3 → 4: Compressão isotérmica do fluido em temperatura T_F ou T_L ao dissipar calor Q_F ou Q_L ;
- 4 → 1: Compressão adiabática do fluido com aumento de temperatura T_F ou T_L para T_Q ou T_H .

2.1.2 Ciclo de Rankine simples

O ciclo de Rankine é uma variação do ciclo de Carnot, como demonstrado na figura 4, existe uma dificuldade no processo de bombeamento 4 – 1 da figura 3 acima, trata-se do bombeamento da mistura líquido-vapor como a do estado 4. A solução proposta no ciclo Rankine, é a utilização de um condensador responsável pela condensação total do fluido neste estágio liberando seu bombeamento para o evaporador. Neste instante acontece a variação que no ciclo de Carnot o processo era isotérmico, em Rankine o processo se torna isobárico (**SIMÕES MOREIRA; PIMENTA, 2011**).

A figura 4 demonstra o diagrama p-v do ciclo Rankine:

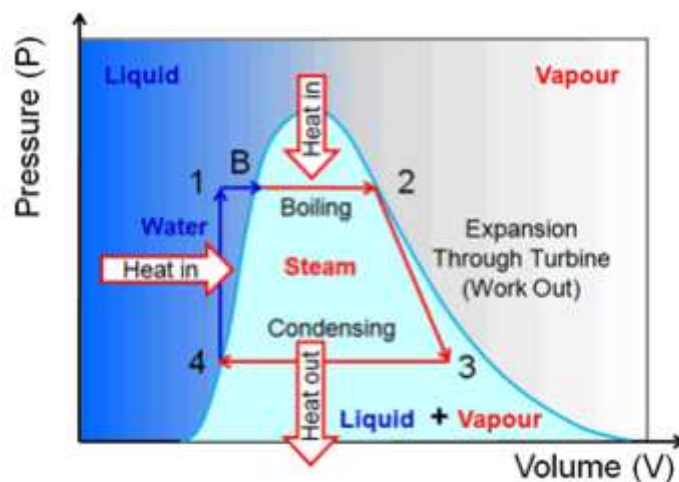


Figura 4 - Ciclo Rankine em Diagrama p-v
Fonte: DOMINGUES JUNIOR, 2013

Sendo:

- 1 → B: Fluido é aquecido até atingir saturação a pressão constante;
- B → 2: Após atingir saturação, fluido recebe calor até ser completamente vaporizado a pressão constante;
- 2 → 3: Vapor é expandido de forma isentrópica através de uma turbina gerando trabalho útil;
- 3 → 4: Fluido passa através de condensador alterando seu estado de líquido-vapor para líquido;
- 4 → 1: Fluido é bombeado para o evaporador completando o ciclo.

2.2 Equipamentos e tecnologias empregados

Os principais equipamentos do sistema de cogeração das usinas de açúcar e álcool são: turbina a vapor, caldeira e o gerador elétrico. Neste capítulo iremos abordar de maneira sucinta os princípios de funcionamento assim como as tecnologias empregadas.

2.2.1 Turbina a vapor

A turbina a vapor é uma máquina térmica que transforma a energia cinética do vapor em energia mecânica na ponta do seu eixo. Esse equipamento acoplado ao um gerador síncrono é capaz de produzir energia elétrica. Nesse contexto a turbina torna-se um dos principais equipamentos do sistema de cogeração.

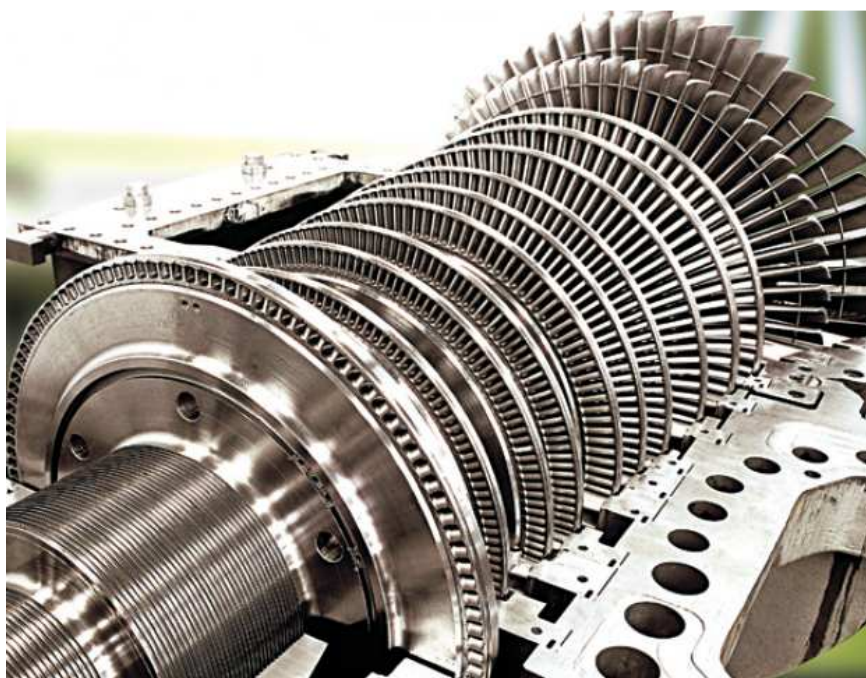


Figura 5 - Turbina a vapor
Fonte: TGM, 2015

SANTOS (2012, p. 44) descreve “[...] Uma grande vantagem das turbinas a vapor é a possibilidade da utilização de 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. [...]”. Em outras palavras, pode-se utilizar a turbina a vapor como

gerador de energia mecânica e térmica ao mesmo tempo. Essa afirmação irá depender da configuração do sistema de cogeração da planta.

Como observado na figura 5, a turbina é composta por palhetas móveis fixadas ao eixo, sendo esse fixo ao estator. A concepção mecânica é similar ao de um gerador elétrico, sendo a máquina composta por uma parte fixa designado, estator, e uma parte móvel “rotor” neste caso atribui-se essa função as palhetas fixadas ao eixo.

A quantidade de palhetas móveis determina se a turbina é de simples estágios, melhor dizendo, apenas um único conjunto de palhetas, ou se é de multiestágios composta por vários conjuntos de palhetas. A figura 6 demonstra um corte para melhor entendimento de uma turbina multiestágios e seus principais elementos.

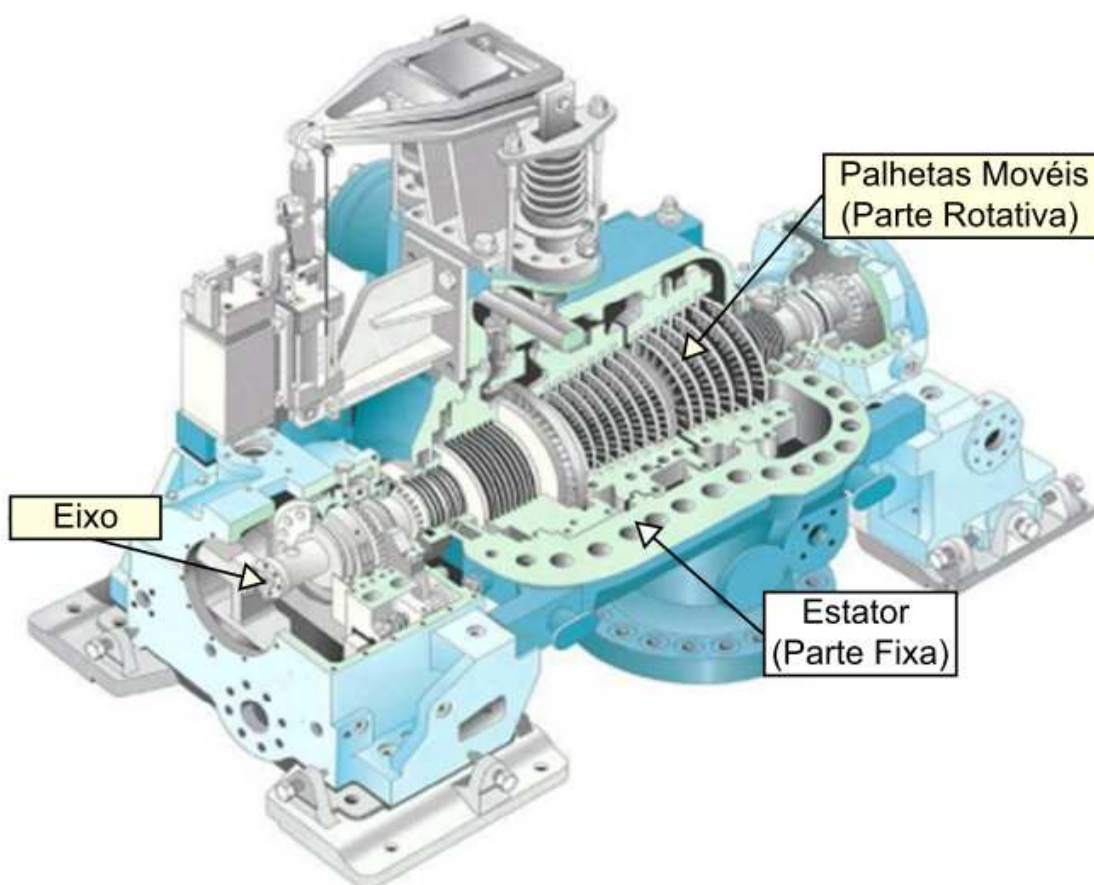


Figura 6 - Corte de uma turbina a vapor multiestágios
Fonte: SANTOS, FERNANDO ALVES DOS, 2012

As turbinas multiestágios podem ser classificadas em: contrapressão e condensação. Como dito por **SANTOS, FERNANDO ALVES DOS** (2012):

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 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, 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.

Turbina de condensação

Em aplicações exclusivas para geração de energia elétrica, 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, 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 de 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.

2.2.2 Caldeira

A caldeira é responsável pela transformação da água em vapor, a partir de um combustível primário em nosso caso a queima do bagaço de cana. Para SANTOS (2012) “[...] 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 resultante é destinado primeiramente ao acionamento de turbinas na geração de energia elétrica [...]”. A figura 7 demonstra de maneira simplificada o processo de geração de vapor.

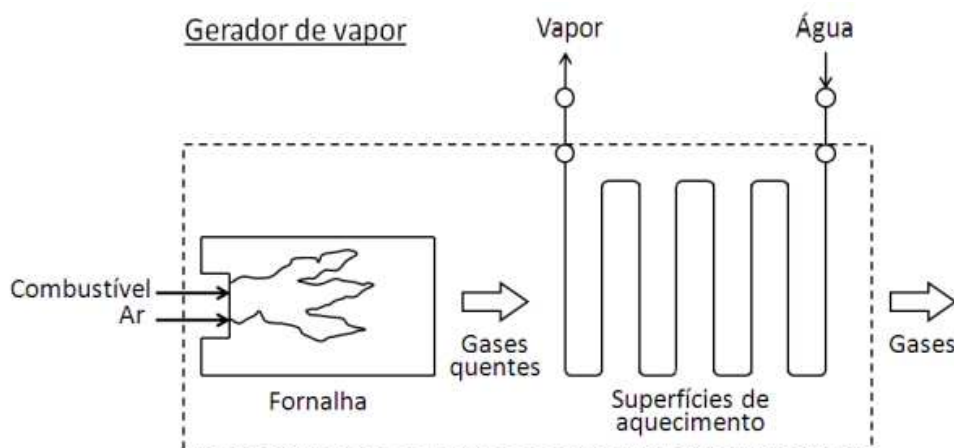


Figura 7 - Esquema simplificado de uma caldeira

Fonte: SANTOS, FERNANDO ALVES DOS, 2012

Nas usinas de açúcar e álcool utilizam-se caldeiras aquatubulares, pois são capazes de gerar vapor em médias e altas pressões atendendo assim a demanda de vapor da planta. São constituídas internamente por tubos que tem como finalidade transitar a água trocando assim calor com as chamas internas da caldeira transformando este em vapor.



Figura 8 - Caldeira a vapor

Fonte: SERMATEC, 2015

Na figura 8 é possível observar uma caldeira aquatubular instalada em uma planta industrial. O sistema é complexo, pois para ter uma melhor eficiência, são instaladas esteiras transportadoras de bagaço, responsáveis pelo o transporte do combustível primário da caldeira. Também são controlados os níveis de água interno da caldeira, pois conforme ocorre a geração de vapor os níveis da água diminuem naturalmente, sendo necessário o bombeamento de água, pois caso ocorra a falta da mesma a caldeira pode ter um superaquecimento causando assim um acidente. Se nível de água estiver muito alto, a água pode ser levada pelo ponto de saída do vapor. Gerando assim um vapor de baixa qualidade.

Por esse e muitos detalhes a operação das usinas de açúcar e álcool não são baratas, porém o ponto principal que viabiliza a cogeração é a utilização de um resíduo antes descartado, o “bagaço de cana”, insumo esse que possui custo zero para a indústria.

2.2.3 Redutor de velocidades

O redutor de velocidades é um conjunto de engrenagens que tem como objetivo regular a rotação entre duas máquinas rotativas. Em nossa aplicação os redutores de velocidades são instalados entre a turbina a vapor que podem chegar a rotação de 12000 rpm ao gerador elétrico, esse responsável por um fornecimento de uma tensão alternada em uma frequência 60 Hz para rede elétrica. Escrito por **SANTOS, FERNANDO ALVES DOS** (2012):

A relação de transmissão de um redutor é calculada pela Eq. (2):

$$i = \frac{\eta_1}{\eta_2} \quad (2)$$

Sendo:

i = Relação de transmissão

η_1 = Rotação de entrada

η_2 = Rotação de saída

Considerando que os geradores para este tipo de aplicação no Brasil operam com rotação de 1800 rpm, ou seja, geradores de 4 polos, os respectivos redutores de velocidade podem atingir uma relação de transmissão de 6,67.



Figura 9 - Redutor de velocidades
Fonte: TGM, 2015

2.2.4 Gerador elétrico

O gerador elétrico ou máquina elétrica rotativa é responsável pela transformação da energia mecânica disponibilizada pela turbina em energia elétrica. Nas usinas de açúcar e álcool utilizam-se máquinas síncronas, que possuem o seguinte princípio de funcionamento; através de uma corrente contínua injetada no campo localizado no rotor é produzido um campo magnético. O rotor é acionado pela turbina, produzindo um campo magnético girante no interior da máquina. Enfim o campo girante induzirá um conjunto de tensões trifásicas nos enrolamentos do estator. A figura 10 ilustra os principais elementos do gerador síncrono, conforme descrito por **SANTOS, FERNANDO ALVES DOS** (2012):

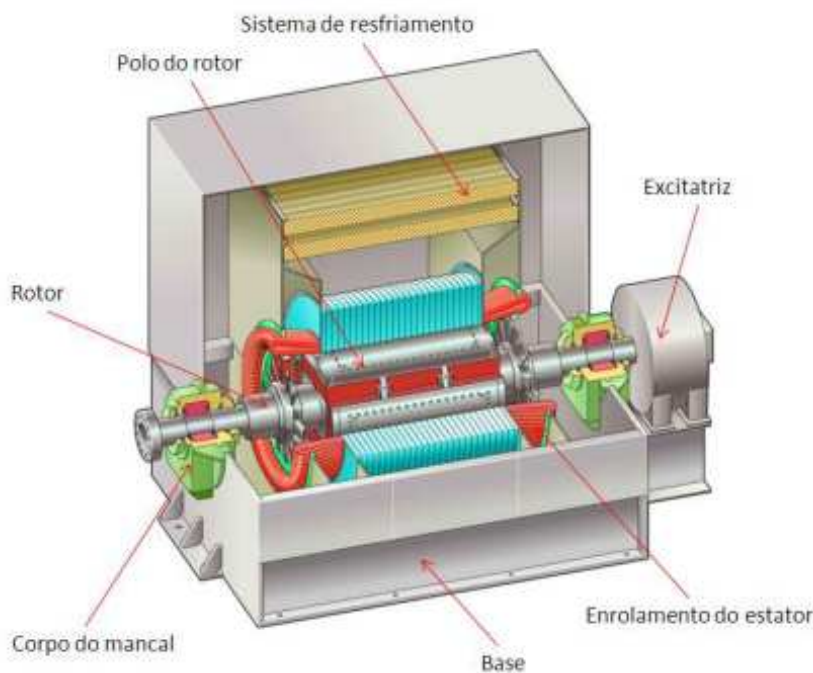


Figura 10 - Esquema simplificado do gerador
Fonte: SANTOS, FERNANDO ALVES DOS, 2012

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 termelétricas 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 Eq.(3) abaixo:

$$\eta = \frac{f}{p} \quad (3)$$

Sendo:

η = Rotação do eixo [rps]

f = Frequência [Hz]

p = Par de polos magnéticos

2.3 Configurações básicas e balanço energético

As configurações podem ser variadas, a escolha correta é sempre vista em aproveitar ao máximo o consumo específico do vapor. As figuras 11 e 12 representam os circuitos térmicos típicos utilizados na indústria sucroalcooleira:

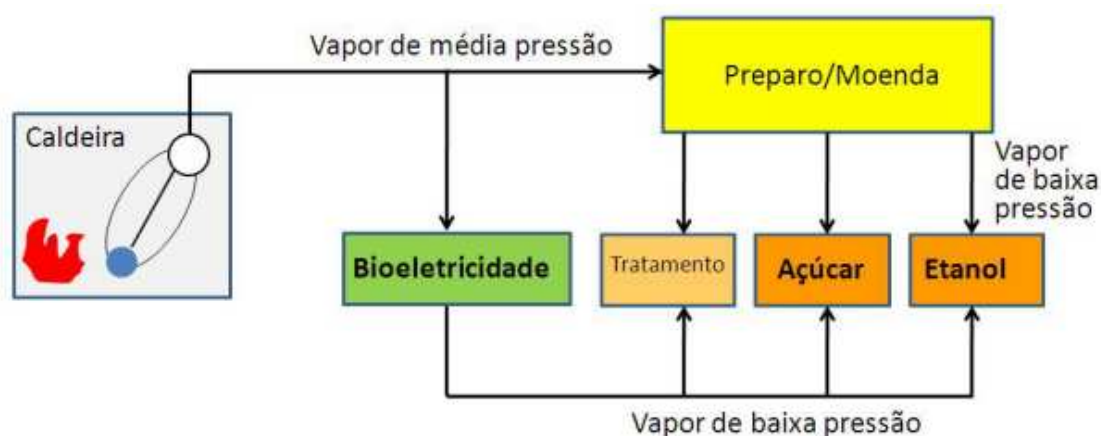


Figura 11 - Circuito térmico na indústria sucroalcooleira antiga
 Fonte: SANTOS, FERNANDO ALVES DOS, 2012

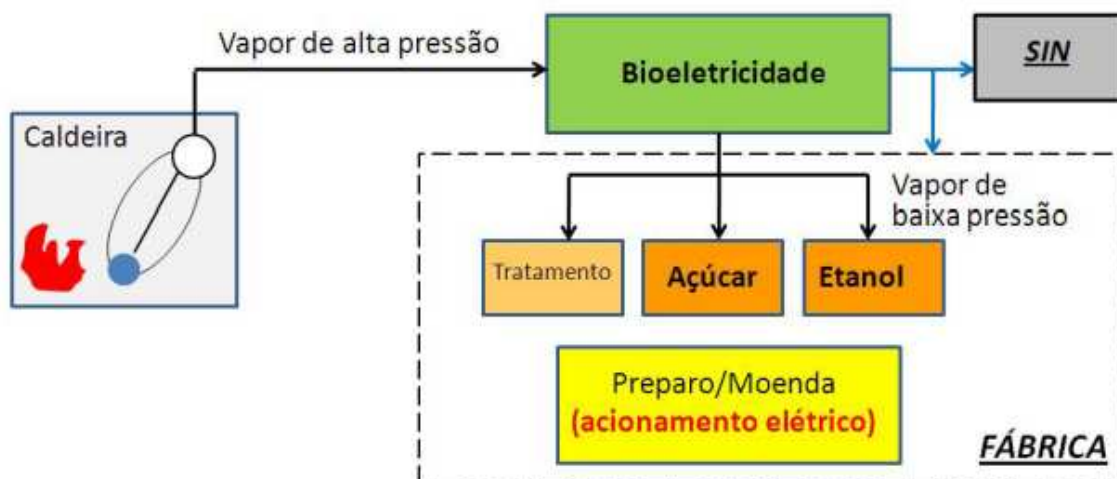


Figura 12 - Circuito térmico na indústria sucroalcooleira moderna
 Fonte: SANTOS, FERNANDO ALVES DOS, 2012

Como pode ser observado na configuração antiga o vapor é de média pressão, onde que são utilizados em acionamentos mecânicos do processo. A bioeletricidade fica em segundo plano, esse esquema tem como objetivo gerar energia apenas para consumo próprio. Para SANTOS, FERNANDO ALVES DOS (2012).

[...] 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.

Para a configuração moderna, o objetivo principal é a geração de bioeletricidade sendo assim caldeiras de alta pressão são aplicadas nesses circuitos. O processo térmico é explicado por SANTOS, FERNANDO ALVES DOS (2012):

[...] 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 de 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.

O conceito de balanço energético consiste na prática de análise da demanda de vapor necessária para o processo de fabricação do açúcar e álcool, e para a geração da bioeletricidade. Dá-se a importância dessa etapa, pois é necessário verificar se a biomassa produzida pelo o processo será suficiente para a geração de vapor. Caso não seja suficiente os custos de compra de biomassa deverá ser

levado em consideração nos cálculos da viabilidade econômico do projeto. Por outro lado as usinas antigas que não tem como objetivo a exportação da bioeletricidade, a biomassa remanescente torna-se um problema. Como solução o bagaço é queimado causando impactos ambientais, utilizado nas plantações como fertilizantes naturais e até mesmo são vendidos para outras usinas que tem como negócio a exportação de bioeletricidade.

2.4 Fator de utilização de energia

O fator de utilização de energia, FUE (do inglês – “energy utilization factor”), tem como objetivo demonstrar a porcentagem de utilização entre a energia do combustível da fonte primária com o trabalho a ser produzido tanto elétrico como térmico. A Eq.(4) abaixo demonstra o que está sendo proposto:

$$FUE = \frac{\dot{W} + Q_U}{\dot{m} \times PCI} \quad (4)$$

Sendo:

\dot{W} = Potência de eixo produzido pela máquina (kW)

Q_U = Taxa de calor útil produzido ou recuperado (kW)

PCI = Poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg)

\dot{m} = Vazão mássica de combustível (kg/s)

A ideal principal é que os sistemas de cogeração se aproximem dos 100%. No entanto quanto maior for o aproveitamento térmico maior será o valor do FUE, podendo chegar até em 85%.

Abaixo um resumo geral que demonstra os valores de FUE:

Gerador	η_e	Cogeração (FUE)
MCI	25 a 45%	~ 85%
TV	30 a 45%	~ 50%
TG	35 a 45%	~ 75%
μ TG	25 a 33%	~ 85%
Ciclo Combinado	Até 57%	~ 75%

Figura 13 - Resumo geral FUE

Fonte: SIMÕES-MOREIRA, JR.; ANDREOS, R, 2014

Sendo:

MCI = Motor a combustão interna

TV = Turbina a vapor

TG = Turbina a gás

μ TG= Microturbina a gás

2.5 Rendimento da cogeração

O rendimento da cogeração é o fator importante a ser observado, é um percentual que indicará o quanto está sendo utilizado de energia útil no processo. Dá-se as fórmulas abaixo:

$$\eta_e = \frac{E}{c} \quad (\text{Rendimento Elétrico}) \quad (5)$$

$$\eta_T = \frac{Q_U}{c} \quad (\text{Rendimento Térmico}) \quad (6)$$

$$\eta_G = \frac{E+Q_U}{c} \quad (\text{Rendimento Global}) \quad (7)$$

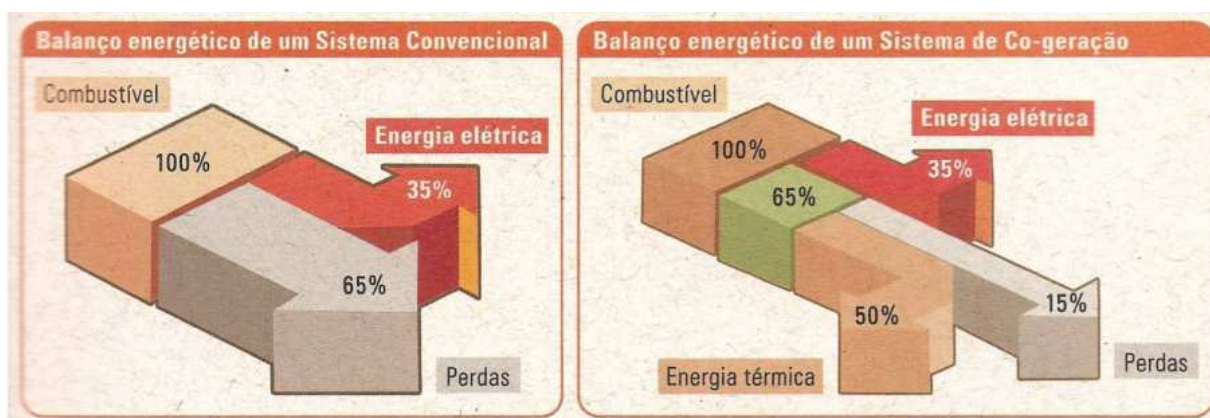
Sendo:

η = Rendimento

E = Energia elétrica produzida

Q_U = Calor útil produzido

C = Combustível consumido



$$\eta_G = \eta_e = 35\% \text{ (Geração Elétrica)}$$

$$\eta_G = \eta_e + \eta_t = 85\% \text{ (Cogeração)}$$

Figura 14 - Esquema simplificado do rendimento da cogeração

Fonte: SIMÕES-MOREIRA, JR.; ANDREOS, R, 2014

Na figura 14 o quadro da esquerda demonstra que, em um sistema convencional dos 100% da energia da fonte primária, apenas 35% é recuperado para geração de energia elétrica. Já o quadro da direita representa um sistema de cogeração, onde que para os 100% da energia da fonte primária apenas 15% são desperdiçados, 35% são convertidos em geração de energia elétrica e 50% para produção de energia térmica.

2.6 Qualificação da cogeração

A ANEEL criou a Resolução Normativa N°235, de 14 de novembro de 2006, que estabelece os requisitos para a qualificação de centrais termelétricas cogradoras de energia e dá outras providências. Descrito por SIMÕES-MOREIRA, JR.; ANDREOS, R, (2014).

[...] O dispositivo desta resolução visa estabelecer os requisitos para o reconhecimento da qualificação de centrais termelétricas cogradoras, com vistas à participação nas políticas de incentivo ao uso racional dos recursos energéticos. Esta resolução é válida para pessoa física e jurídica.

Requisitos para qualificação

A central termelétrica cogradora, para fins de enquadramento na modalidade de “cogeração qualificada”, deverá atender os seguintes requisitos:

1. Estar regularizada perante ANEEL, conforme o disposto na legislação específica e na Resolução no 112, de 18 de maio de 1999.
2. Preencher os requisitos mínimos de racionalidade energética, mediante o cumprimento das inequações (a) e (b) respectivamente:

$$a) \frac{E_t}{E_f} \geq 15\%$$

$$b) \left(\frac{E_t}{E_f} \right) \div X + \frac{E_e}{E_f} \geq F_C \%$$

Onde:

Ef- Energia da fonte: energia recebida pela central termelétrica cogradora, no seu regime operativo médio, em kWh/h, com base no conteúdo energético específico, que no caso dos combustíveis é o Poder Calorífico Inferior (PCI);

Ee- Energia da utilidade eletromecânica: energia cedida pela central termelétrica cogradora, no seu regime operativo médio, em kWk/h, em termos líquidos, ou seja, descontando da energia bruta gerada o consumo em serviços auxiliares elétricos da central;

Ee- Energia da utilidade eletromecânica: energia cedida pela central termelétrica cogeneradora, no seu regime operativo médio, em kWh/h, em termos líquidos, ou seja, descontado da energia bruta gerada o consumo em serviços auxiliares elétricos da central;

Et – Energia da utilidade calor: energia cedida pela central termelétrica cogeneradora, no seu regime operativo médio, em kWh/h, em termos líquidos, ou seja, descontado das energias brutas entregues ao processo as energias de baixo potencial térmico que retornam à central;

Fc% - Fator de cogeração: parâmetro definido em função da potência instalada e da fonte da central termelétrica cogeneradora, o qual aproxima do conceito de Eficiência Exergética;

X – Fator de ponderação: parâmetro adimensional definido em função da potência instalada e da fonte da central termelétrica cogeneradora, obtido da relação entre a eficiência de referência da utilidade calor e da eletromecânica, em processos de conversão para obtenção em separado destas utilidades.

Fonte/potência elétrica instalada	<i>X</i>	<i>Fc%</i>
Derivados de Petróleo, Gás Natural e Carvão:		
Até 5 MW	2,14	41
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,13	44
Acima de 20 MW	2,00	50
Demais combustíveis:		
Até 5 MW	2,50	32
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,14	37
Acima de 20 MW	1,88	42
Calor recuperado de processo:		
Até 5 MW	2,60	25
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,17	30
Acima de 20 MW	1,86	35

Figura 15 - Fonte / Potência elétrica instalada
Fonte: ANEEL, 2015

3. A INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR

3.1 História

A cana-de-açúcar foi introduzida no Brasil no ano de 1532, pelo colonizador português Martim Afonso de Souza. Sendo o primeiro a construir um engenho em São Vicente – Litoral do Estado de São Paulo. Até então o uso da cana-de-açúcar era como alimento e em construções. Dito por **Fúlvio de Barros Pinheiro Machado**, texto “Brasil, a doce terra” [...] Depois de várias dificuldades, após 50 anos, o Brasil passou a monopolizar a produção mundial **açúcar**. Portugal e Holanda, que comercializavam o produto, tinham uma elevada lucratividade. A Europa enriquecida pelo ouro e prata do Novo Mundo passou a ser grande consumidora de **açúcar**. As regiões produtoras, especialmente as cidades de Salvador e Olinda prosperaram rapidamente. As refinarias se multiplicavam na Europa, a ponto de Portugal proibir novas centrais de refino em 1559 devido ao grande consumo de lenha e insumos para a clarificação do caldo (clara de ovos, sangue de boi, ossos e gordura de galinha) [...].

Em 1857, Dom Pedro II elaborou um programa de modernização da produção de açúcar, onde os “Engenhos Centrais” iriam apenas produzir açúcar, o cultivo seria responsabilidade dos produtores.

No início de 1900 o termo “usinas de açúcar” tomou força, sendo que os fornecedores de equipamentos assumiram até então os “antigos Engenhos Centrais” que por desconhecimento de seus proprietários utilizavam equipamentos antigos para produzir açúcar, alguns preferiram produzir “cachaça” sendo assim o mercado de açúcar entrou em queda.

No ano de 1914, iniciou-se a 1ª Guerra Mundial houve muita destruição inclusive da indústria de açúcar. Desta forma o valor do açúcar aumentou no mercado mundial. Esse fato influenciou os investidores nesse ramo no Brasil, muitas foram construídas principalmente na região de São Paulo.

Na tentativa de estimular o mercado da cana-de-açúcar o governo de Getúlio Vargas em 20 de fevereiro de 1931, criou o Decreto N° 19.717, que estabeleceu a

aquisição obrigatória de álcool, na proporção de 5% da gasolina importada, e dá outras providências. A mesma foi revogada em 15 de fevereiro de 1991, no governo de Fernando Collor.

Segundo Fúlvio de Barros Pinheiro Machado, texto “Brasil, a doce terra”.

[...]No final do século XIX, o Brasil vivia a euforia do café (70% da produção mundial estavam aqui). Após a abolição da escravidão, o governo brasileiro incentivou a vinda de europeus para suprir a mão-de-obra necessária às fazendas de café, no interior paulista. Os imigrantes, de maioria italiana, adquiriram terra e grande parte optou pela produção de aguardente a partir da **cana**. Inúmeros engenhos se concentraram nas regiões de Campinas, Itu, Moji-Guaçu e Piracicaba. Mais ao norte do estado, nas vizinhanças de Ribeirão Preto, novos engenhos também se formaram.

Na virada do século, com terras menos adequadas ao café, Piracicaba, cuja região possuía três dos maiores Engenhos Centrais do estado e usinas de porte, rapidamente se tornou o maior centro produtor de **açúcar** de São Paulo. A partir da década de 10, impulsionados pelo crescimento da economia paulista, os engenhos de aguardente foram rapidamente se transformando em usinas de **açúcar**, dando origem aos grupos produtores mais tradicionais do estado na atualidade.

Em 1933 foi criado pelo o governo de Vargas o IAA (Instituto do Açúcar e Alcool), a mesma tinha como objetivo controlar a produção de açúcar e álcool em todas as usinas do país (Nordeste, Sudeste e Sul do Brasil). Eram estipulados cotas de produção de açúcar e álcool a fim de equilibrar o mercado. O IAA também participava ativamente da aprovação de novos equipamentos e modificações das usinas existentes. A partir desse momento começava-se a criar Órgãos regulamentadores do setor, pois houve um crescimento acelerado como já comentado.

Conforme Fúlvio de Barros Pinheiro Machado, texto “Brasil, a doce terra”.

[...]Por ocasião da 2ª Guerra Mundial, com o risco representado pelos submarinos alemães à navegação na costa brasileira, as usinas paulistas reivindicaram o aumento da produção para que não houvesse o desabastecimento dos Estados do sul. A solicitação foi aceita e nos dez anos subseqüentes os paulistas multiplicaram por quase seis vezes sua produção. No início da década de 50, São Paulo ultrapassou a produção do Nordeste, quebrando uma hegemonia de mais de 400 anos.

Desde a 2ª Guerra Mundial, os esforços da indústria açucareira brasileira se concentraram na multiplicação da capacidade produtiva. As constantes

alterações na cotação do **açúcar** no mercado internacional e os equipamentos obsoletos forçaram uma mudança de atitude para a manutenção da rentabilidade. Coube à Copersucar - cooperativa formada em 1959 por mais de uma centena de produtores paulistas para a defesa de seus preços de comercialização - a iniciativa de buscar novas tecnologias para o setor. A indústria açucareira da Austrália e a África do Sul representavam o modelo de modernidade desejada. Do país africano vieram vários equipamentos modernos.

O ano de 1973 ficou marcado pela crise do Petróleo, onde o valor do produto estava muito elevado dificultando assim sua exportação. Em 1975 o governo do Brasil desenvolveu o Proálcool (Programa Nacional do Álcool), criando políticas de incentivo que ofereceu incentivos fiscais e empréstimos para os produtores de cana-de-açúcar e para as indústrias automobilísticas que desenvolvessem carros movidos a álcool. Dito por **Fúlvio de Barros Pinheiro Machado**, texto “Brasil, a doce terra” [...] Em menos de cinco anos a produção de pouco mais de 300 milhões de litros ultrapassou a cifra de 11 bilhões de litros, caracterizando o **Proálcool** como o maior programa de **energia** renovável já estabelecido em termos mundiais, economizando mais de US\$ 30 bilhões em divisas [...].

Para a cogeração no Brasil em 1987 teve um importante acontecimento, foi firmado o primeiro acordo de exportação energia elétrica excedente, a Usina responsável foi a São Francisco, localizada em Sertãozinho (SP), cuja concessão é de responsável da CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz).

Em 1989 o Brasil registrava uma inflação acumulada em 1.764,86% a maior do país até então. Com isso o governo diminuiu os incentivos fiscais para os produtores de cana-de-açúcar, levando assim o álcool a decadência perdendo novamente espaço para a gasolina.

O Centro de Tecnologia Copersucar (CTC) em 1992 realizou o primeiro estudo da redução de emissões de gases causadores do efeito estufa elaborado pelo pesquisador Isaias de Carvalho Macedo, demonstrando que o Etanol utilizado como combustível emite muito menos gases nocivos a camada de ozônio do que a gasolina. A figura 16 demonstra de forma simplificada a comparação entre o Álcool e a Gasolina.



Figura 16 - O círculo virtuoso do Álcool

Fonte: UNICA, 2015

Em 1992 o Brasil sediou o ECO-92 ou Cúpula da Terra, onde se concretizou o desenvolvimento sustentável. Com a seguinte definição descrita no Relatório Brundtland, um relatório elaborado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento:

[...] O desenvolvimento que procura satisfazer as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades, significa possibilitar que as pessoas, agora e no futuro, atinjam um nível satisfatório de desenvolvimento social e econômico e de realização humana e cultural, fazendo, ao mesmo tempo, um uso razoável dos recursos da terra e preservando as espécies e os habitats naturais [...].

A figura 17 ilustra os três pilares da sustentabilidade, sendo necessários processos de desenvolvimento nas áreas ambiental, social e econômico.



Figura 17 - Os três pilares da Sustentabilidade

Fonte: UNICA, 2015

A partir de 1994 a exportação do açúcar produzido no Brasil aumentou, pois as taxas de 40% em cima do valor do produto aplicadas quando os valores das cotas eram superados foram liberalizadas. Segundo o site da UNICA, na safra de 1995/96 o Brasil se tornou o maior produtor de açúcar no mundo.

A Copersucar no início da década de 90 teve iniciativa em procurar por novos produtos a serem fabricados pelas usinas de açúcar e álcool, a intenção foi diversificar os produtos e não ficar assim preso nos commodities. Um dos produtos em destaque foi o plástico biodegradável.

Com início em 1992 o Instituto de pesquisas tecnológicas (IPT) em conjunto com o Governo do estado de São Paulo desenvolveram pesquisas sobre os plásticos biodegradáveis. O processo tem origem bacteriana, onde as bactérias se alimentam do açúcar da cana, produzindo assim um tipo de biopolímero, deste é fabricado os plásticos biodegradáveis. A vantagem é que esse produto é totalmente biodegradável, sendo assim as próprias bactérias podem consumi-lo. O tempo de decomposição é muito menor comparado com os plásticos atuais.



Figura 18 - O ciclo do plástico biodegradável

Fonte: IPT, 2012

A Usina da Pedra, localizada em Riberião Preto em 1994 montou uma planta piloto para produção do plástico biodegradável. No ano de 2000 foi concebida a PHB Industrial e a tecnologia foi comprada pelo o Grupo Pedra Agroindustrial, de Serrana, e ao Grupo Balbo, de Sertãozinho.

Como já citado anteriormente, após a crise do petróleo nos anos 70 o governo brasileiro criou o Pró-Álcool incentivando assim a produção de combustível alternativo, porém no final dos anos 80 por causa da inflação o governo diminuiu os incentivos. O programa foi oficialmente extinto no início dos anos 90, porém o álcool continuou sendo ofertado no mercado. Com incentivo do governo a indústria automotiva investiu forte na produção dos motores bicompostíveis na tentativa de

criar novamente uma alternativa de combustível. Em março de 2003, a Volkswagen lançava o primeiro carro flex no mercado brasileiro.

O gráfico abaixo demonstra a sucesso dessa empreitada:

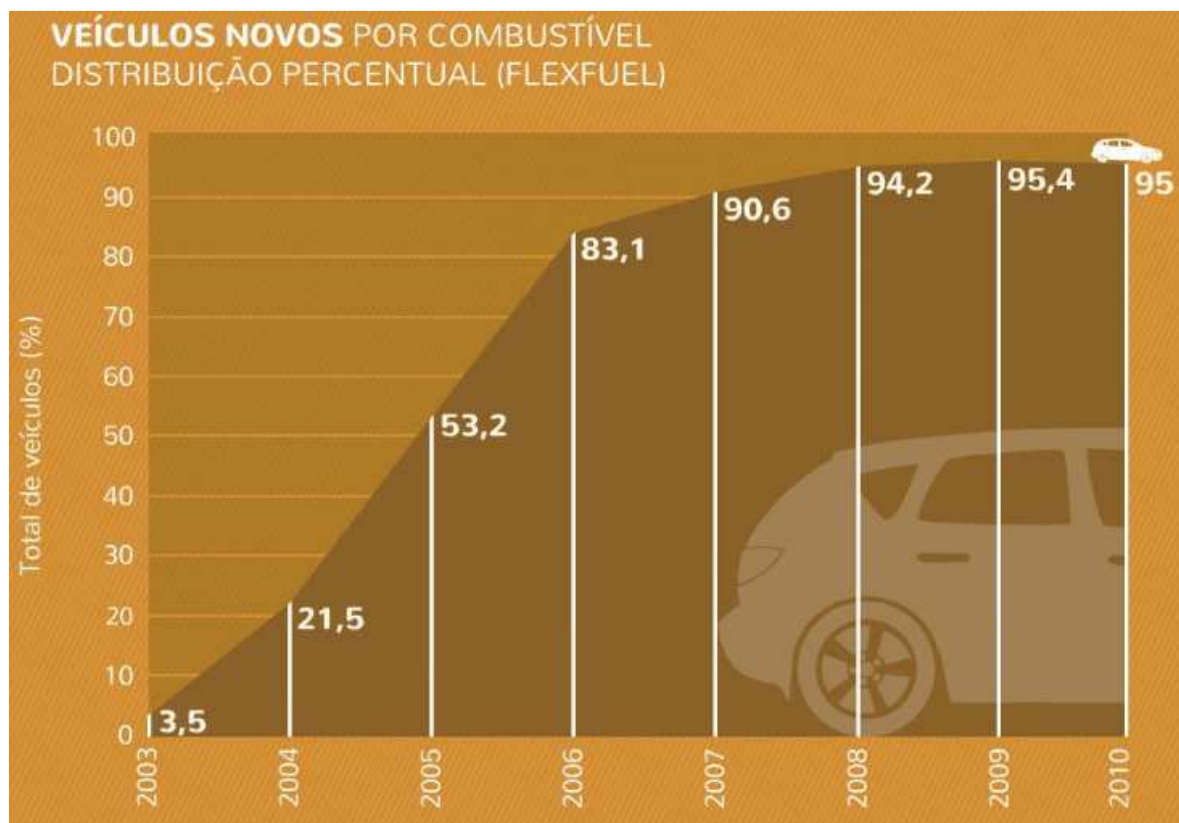


Figura 19 - Distribuição percentual fabricação veículos Flex

Fonte: UNICA, 2015

É possível perceber que o percentual de venda de carros novos Flex, só aumentou com o passar dos anos, em 2010 chegou em 95%.

A indústria aeronáutica também tratou de diversificar o combustível utilizado nas aeronaves. Em outubro de 2002 a empresa Embraer fez o primeiro teste com o motor do Ipanema, Modelo Lycoming IO-540 movido a etanol. A certificação ocorreu em 2004, obtendo um resultado muito positivo quando lançado no mercado.



Figura 20 - Aeronave Embraer Ipanema (Motor a etanol)
 Fonte: CULTURA AERONÁUTICA, 2014

O Etanol apresentou várias vantagens diante a gasolina da aviação (AVGAS), dentro delas a mais significativa o impacto ambiental. Como explicado por JONAS LIASCH (2014):

[...] A vantagem ambiental é evidente: o motor a etanol produz nada menos que quatro vezes menos dióxido de carbono que os motores a gasolina, como pode se ver pelo cálculo abaixo:

- Álcool: $C_2H_6O + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$

- Gasolina: $C_8H_{18} + 25/2 O_2 \rightarrow 8CO_2 + 9H_2O$

A emissão de outros gases poluentes, como o monóxido de carbono, é também reduzida pela vantagem de se poderem usar maiores taxas de compressão, e como a queima do etanol ocorre em temperaturas menores, à produção de óxidos de nitrogênio também é menor. Além disso, a queima do etanol é isenta de metais pesados, enquanto a queima da AVGAS contém venenosos compostos de chumbo.

Em 2004 foi criado pelo o governo o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfra), impulsionando a construção de plantas eólicas, geração através da biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCH). O programa teve como objetivo diversificar a matriz energética brasileira, considerando as possíveis formas de geração disponíveis no território nacional, além de promover desenvolvimento das regiões ao redor dessas.

No ano de 2005 foi realizado o primeiro leilão de energia nova, onde as usinas de açúcar tiveram uma importante participação.

Em 2008 a CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica) realizou um leilão de energia reserva, negociando com as térmicas à biomassa. Essa reserva tem como objetivo expandir a segurança no fornecimento de energia elétrica a matriz energética brasileira. Ou seja, em época da estiagem para garantir o fornecimento de energia elétrica para o SIN (Sistema Interligado Nacional) o ONS (Operador Nacional do Sistema) aciona as térmicas. Esse evento resultou na contratação de 2.379,40 MW distribuídas em 31 termelétricas movidas à biomassa, essa potência foi injetada ao SIN no ano de 2009 e 2010.



Leilão de Energia de Reserva – quadro-resumo:

Produto	Quantidade	Potência	Preço de venda
2009	3 usinas	229,50 MW	R\$ 60,86/MWh
2010	28 usinas	2.149,90 MW	R\$ 58,71/MWh
Total	31 usinas	2.379,40 MW	R\$ 58,84/MWh

Figura 21 - Resumo do leilão de energia de reserva 14/08/2008

Fonte: EPE, 2008

Esse foi o primeiro leilão de energia destinado para a biomassa, facilitando assim a aprovação de novos projetos para usinas térmicas. Projetos de construção de hidroelétricas tem grande vantagem sobre as térmicas, pois o seu “combustível” para geração de energia é gratuita no caso a água. Já para térmicas o valor do combustível é levado em consideração, maiores detalhes serão apresentados no capítulo 4 (simulações de cálculos da viabilidade técnico-econômica). Neste caso um leilão direcionado para o setor da Biomassa e de suma importância, pois torna essa forma de geração de energia mais competitiva.

Em 2006 a Usina Cerradinho, localizada em Catanduva (SP) foi pioneira ao ter o seu projeto “Cogeração de Bagaço” aprovado pela ONU e assim receber créditos de carbono em território Brasileiro. Essa bonificação faz parte do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), conforme descrito pelo site do IPEA:

[...] O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) é originário das disposições do Protocolo de Quioto, no âmbito das discussões das mudanças climáticas. O *Comunicado nº 80* trata dos panoramas brasileiro e mundial do MDL, do mercado de carbono – com seus volumes e valores –, das políticas públicas e medidas de desenvolvimento sustentável, do setor de saneamento básico do Brasil e do tratamento dos resíduos sólidos e projetos de geração de energia a partir de aterros.

É importante ressaltar que o protocolo de Quioto entrou em vigor em 2005. Como demonstrado no gráfico abaixo, cerca de 30% dos créditos de carbono que são destinados as energias renováveis são oriundas da indústria de açúcar e álcool.

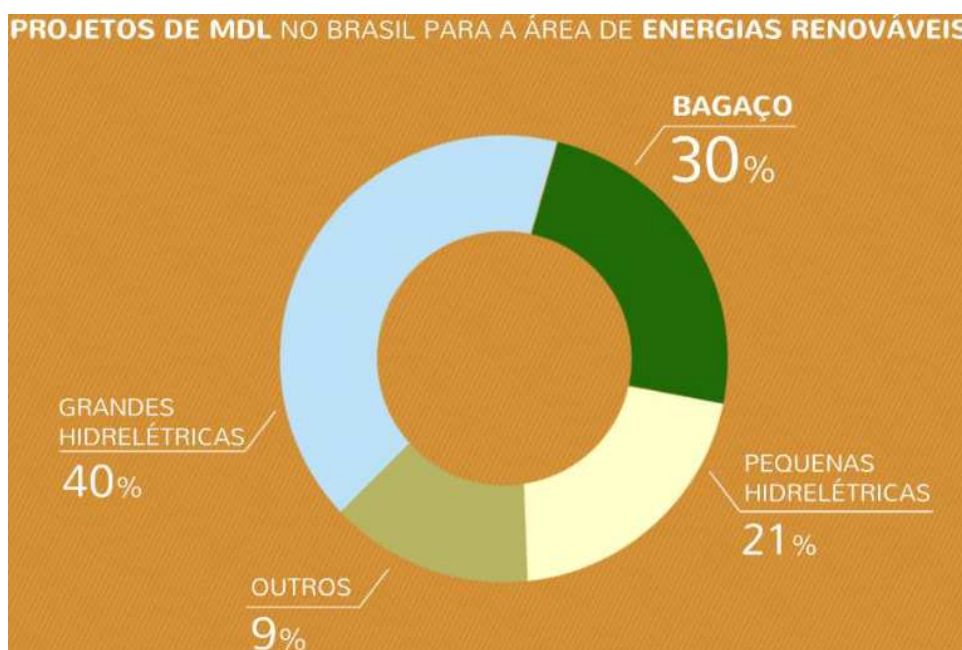


Figura 22 - Projetos de MDL no Brasil (Energias Renováveis)

Fonte: UNICA, 2015

Os eventos relatados acima trazem parte da história do setor sucroalcooleiro. É possível perceber que apesar das adversidades apresentadas, o setor de alguma forma se supera. As tecnologias com o passar do tempo se aperfeiçoam, fazendo com que novas oportunidades sejam descobertas. Oportunidades que se refletem em benefícios para a sociedade. O setor traz soluções tanto para o ramo alimentício (produção do açúcar), biocombustíveis (produção do álcool substituto direto da gasolina) quanto para a geração da bioeletricidade (energia renovável a partir da biomassa).

3.2 Processos empregados

Neste capítulo iremos descrever de forma sucinta os processos empregados na fabricação do açúcar e álcool.

A figura 23 demonstra o processo das etapas de fabricação, o qual se divide nas seguintes etapas: recepção/ preparo / moagem, tratamento do caldo, fábrica de açúcar, destilaria de etanol, utilidades, disposição de efluentes e estocagem dos produtos.

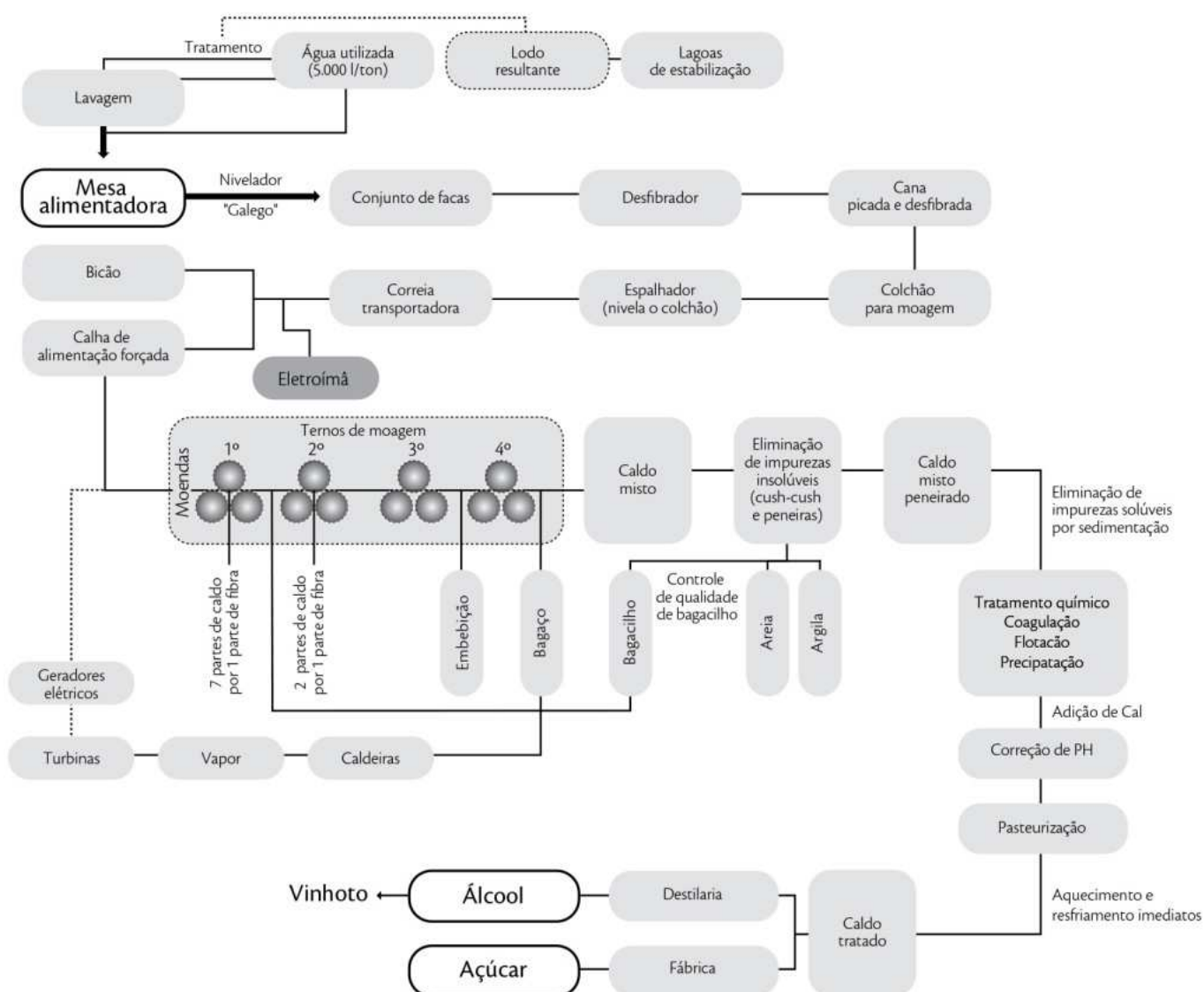


Figura 23 - Diagrama do processamento da cana

Fonte: NOVA CANA, 2015

A cana-de-açúcar chega à usina através de caminhões. No parque industrial os caminhões são pesados para verificar a quantidade exata da cana. Também são realizados ensaios para analisar o teor de açúcar da matéria prima.

São retirados amostras do carregamento através de sondas, que podem ser oblíquas ou horizontais.



Figura 24 - Balança – Pesagem dos caminhões
Fonte: SITE OFICIAL PITANGUEIRAS AÇÚCAR E ÁLCOOL, 2015



Figura 25 - Retirada da amostra da cana através de sonda oblíquas
Fonte: SITE OFICIAL PITANGUEIRAS AÇÚCAR E ÁLCOOL, 2015

A amostra é encaminhada para o laboratório, onde serão diagnosticados os índices de ATR (Açúcares Totais Recuperáveis). Como escrito por **Carlos Eduardo Freitas Vian, Artigo Qualidade de matéria prima**, [...] ATR (Açúcares Redutores Totais): indicador que representa a quantidade total de açúcares da cana (sacarose, glicose e frutose). O ATR é determinado pela relação $POL/0,95$ mais o teor de açúcares redutores. A concentração de açúcares na cana varia, em geral, dentro da faixa de 13 a 17,5%. Entretanto, é importante lembrar que canas muito ricas e com baixa percentagem de fibras estão mais sujeitas a danos físicos e ataque de pragas e microrganismos. Os estudos mostram que nas primeiras 14 horas de deterioração da cana, 93% das perdas de sacarose foram devidas à ação de microrganismos, 5,7% por reações enzimáticas e 1,3% por reações químicas, resultantes da acidez [...].



Figura 26 - Laboratório para análises químicas da cana-de-açúcar
Fonte: EMBRAPA, 2015

Após as análises, a cana quando colhida manualmente é encaminhada para mesa alimentadora onde será limpa através de processo de lavagem com água ou ventilada (limpeza a seco). Esse processo tem como objetivo retirar todas as impurezas da matéria prima.



Figura 27 - Mesa alimentadora - Lavagem da cana
Fonte: SERMATEC, 2015

Caso a cana tenha sido colhida mecanicamente, a mesma é encaminhada diretamente para o picador, desfibrador, moenda ou difusor.

Existem usinas que utilizam pátio de recepção e estocagem, onde a cana é depositada ou aguardam nos caminhões até serem encaminhadas para a mesa alimentadora.



Figura 28 - Pátio de estocagem de cana
Fonte: KINO BANCO DE IMAGENS, 2015

O próximo passo é o preparo da cana para extração do caldo, que tem como objetivo aumentar a densidade e a capacidade de moagem. Nesse processo as células são rompidas para que haja a liberação do caldo. A cana passa por um conjunto de jogos de facas para serem preparadas para irem para o desfibrador.

Nesse processo cerca de 85 à 92% das células serão rompidas, facilitando a extração do caldo.

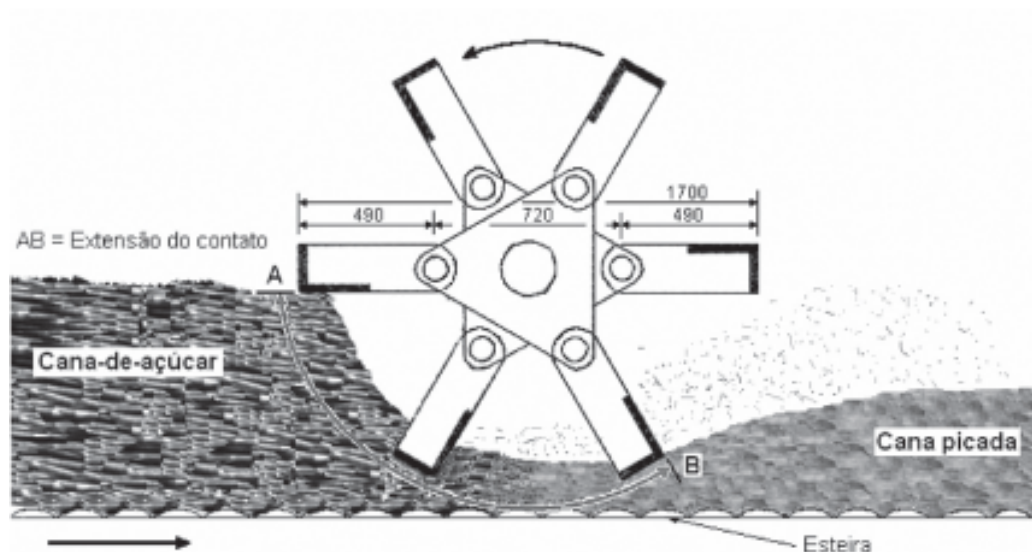


Figura 29 - Picador de cana
Fonte: CONSOLDA, 2009

O objetivo principal é extrair ao máximo o caldo contido na cana, dessa maneira após a cana ser picada esse insumo é enviado para o processo de extração de caldo. Onde pode ser feito de duas maneiras, por desfibradores ou Moendas.

As moendas são formadas por vários ternos, com dimensões diferentes. Cada terno possui quatro rolos principais, sendo o de entrada, superior, pressão e o de saída.

Extrai-se uma maior quantidade de caldo no primeiro terno, após isso a cana é embebecida por água e consequentemente passa pelo os demais ternos. A quantidade de ternos pode variar entre quatro à sete.

Nesse processo de extração é possível extrair entre 94 a 97% do caldo da cana.



Figura 30 - Moenda de cana

Fonte: EMBRAPA, 2015

Escrito por C. Nazato; D.F.C. Silva; S.C.U.Ferraz; M.N.C. Harder (2009):

[...] A difusão pode ser explicada como o fenômeno pelo quais duas soluções de diferentes concentrações separadas por uma membrana semipermeável ou porosa, que após um intervalo de tempo se misturam até atingir o equilíbrio. As células de cana imersas na água atuam como membranas semipermeáveis e a sacarose é extraída pelo escoamento do fluído, por meio de um leito poroso da cana desfibrada (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT, 1990).

Nesse sistema a extração ocorre com a ruptura das células no preparo da cana, onde se encontra a sacarose e a lavagem destas com água ou o caldo da própria cana. Foram registrados índices de extração de até 98% do caldo retirado da cana.

Os difusores comparados com as Moendas possuem uma eficiência melhor no processo de extração do caldo, os números chegam em torno de 98% contra 96% para as moendas. Essa nova tecnologia tem como vantagem a redução do consumo elétrico da planta e custos inferiores para a manutenção. No Brasil são poucas usinas que utilizam essa nova tecnologia.



Figura 31 - Difusor de cana

Fonte: SERMATEC, 2015

O material remanescente da extração de caldo denomina-se o bagaço da cana. Este é queimado e utilizado como combustível para a caldeira, que tem a função de gerar vapor para o processo e para a geração de energia. Esse assunto foi aprofundado no capítulo 2.



Figura 32 - Esteira transportadora de bagaço

Fonte: LIPPEL, 2014



Figura 33 - Caldeira
Fonte: HPB ENERGIA, 2010

O caldo é encaminhado para o processo de tratamento que tem como objetivo retirar impurezas solúveis e insolúveis, a fim de permitir uma qualidade melhor para a fabricação de açúcar e destilaria do álcool.

A primeira etapa é destinada a remoção dos sólidos insolúveis através de peneiras.

A segunda etapa tem como foco eliminação de impurezas insolúveis não eliminadas na primeira etapa e a eliminação das impurezas solúveis, este processo visa à coagulação, floculação e precipitação destas impurezas, que são eliminadas por sedimentação. Para que não ocorra a inversão e a decomposição da sacarose, é feito a correção do pH do caldo.



Figura 34 - Tratamento do caldo

Fonte: SERMATEC, 2015

O caldo tratado é dividido na planta, sendo enviado para a fabricação de açúcar ou álcool.

Na fabricação do açúcar o caldo vai para o processo de sulfitação, que tem como objetivo inibir reações que causam formação de cor, coagulação de colóides solúveis, e formação do precipitado (sulfito de cálcio) e diminuir a viscosidade do caldo e do xarope, massas cozidas e méis, facilitando as operações de evaporação e cozimento.

No processo de aquecimento o caldo é elevado a uma temperatura de 105°C, com o foco de acelerar e facilitar a coagulação, aumentando a eficiência da decantação e possibilitando a degasagem do caldo. Depois de aquecido o caldo é purificado no processo chamado de decantação ou clarificação.

O caldo decantado é retirado da parte superior de cada compartimento e enviado ao setor de evaporação para concentração. As impurezas se sedimentadas constituem o lodo, que normalmente é retirado do decantador pelo fundo e é enviado ao setor de filtração para recuperação do açúcar nele contido.



Figura 35 - Evaporação do caldo
Fonte: ALFATEC ENGENHARIA, 2015

A filtragem do caldo tem a finalidade de recuperar o açúcar contido no lodo. Após isso o caldo passa por evaporadores para ser depois cozido, cristalizado, centrifugado e secado. Depois disso o açúcar pode ser refinado, ensacado, pesado, armazenado e finalmente transportado.



Figura 36 - Armazém de açúcar
Fonte: REVISTAALCOOLBRAS, 2008

Para o processo de fabricação de álcool, o caldo após passar pelo tratamento primário de peneiramento. O mesmo é submetido a um tratamento mais completo que implica na adição de caldo, aquecimento e posterior decantação. Livre de impurezas e devidamente esterilizado o caldo pode ser enviado para a fermentação.

Onde os açúcares são transformados em álcool, as reações ocorrem em dornas de fermentação. O tempo de fermentação ocorre entre 6 a 10 horas, depois desse período praticamente todo o açúcar já foi consumido com a consequente redução da liberação de gases e multiplicação do fermento.



Figura 37 - Dornas de fermentação

Fonte: SERMATEC, 2015

Após a fermentação, o vinho é enviado às centrífugas para recuperação do fermento que é tratado novamente e utilizado para continuidade do processo fermentativo.

O excedente de fermento pode ser encaminhado para secagem, dando origem a levedura seca. Que pode ser vendidas como complemento alimentar animal ou humano como fonte importante proteínas.

O vinho centrifugado é encaminhado para a destilaria, processo esse que se utiliza dos diferentes pontos de ebulição nas diversas substâncias voláteis presentes separando-as. A operação é realizada com auxílio de colunas distribuídas em vários

troncos. Uma coluna tem como finalidade, esgotar a maior quantidade possível de álcool do seu produto de fundo, que é denominado vinhaça.

A vinhaça retirada em uma proporção aproximada de 12 litros para cada 1 litro de álcool produzido. É constituída principalmente de água, pois nesse processo sai os sólidos em suspensão e solúveis. Esse resíduo é utilizado na lavoura como fertilizante, sendo o seu calor parcialmente recuperado pelo caldo em um trocador de calor.



Figura 38 - Destilaria
Fonte: PAPINOX, 2015



Figura 39 - Tanque de vinhaça
Fonte: PENSAMENTOVERDE, 2015

O álcool hidratado produto final dos processos de destilação e retificação, é uma mistura binária álcool / água, que atinge um teor da ordem de 96°C. Este álcool hidratado pode ser comercializado dessa forma, ou passar por um processo de desidratação transformando-se no álcool anidro. Utilizado no Brasil como aditivo a gasolina em uma proporção de 23%.

Depois de produzido o álcool é armazenado em tanques de grande volume, citados nos parques industriais ou até mesmo embarcados em caminhões tanques ou composições ferroviárias para ser comercializada com as distribuidoras.



Figura 40 - Tanques de álcool
Fonte: GRUPO ANDRADE, 2015

3.3 Capacidade Instalada

Atualmente a produção de açúcar e álcool no Brasil, concentra-se principalmente nas regiões Sudeste, Nordeste, Centro-Oeste e Sul do país. A figura 41 demonstra a distribuição dessa produção por todo o território brasileiro:

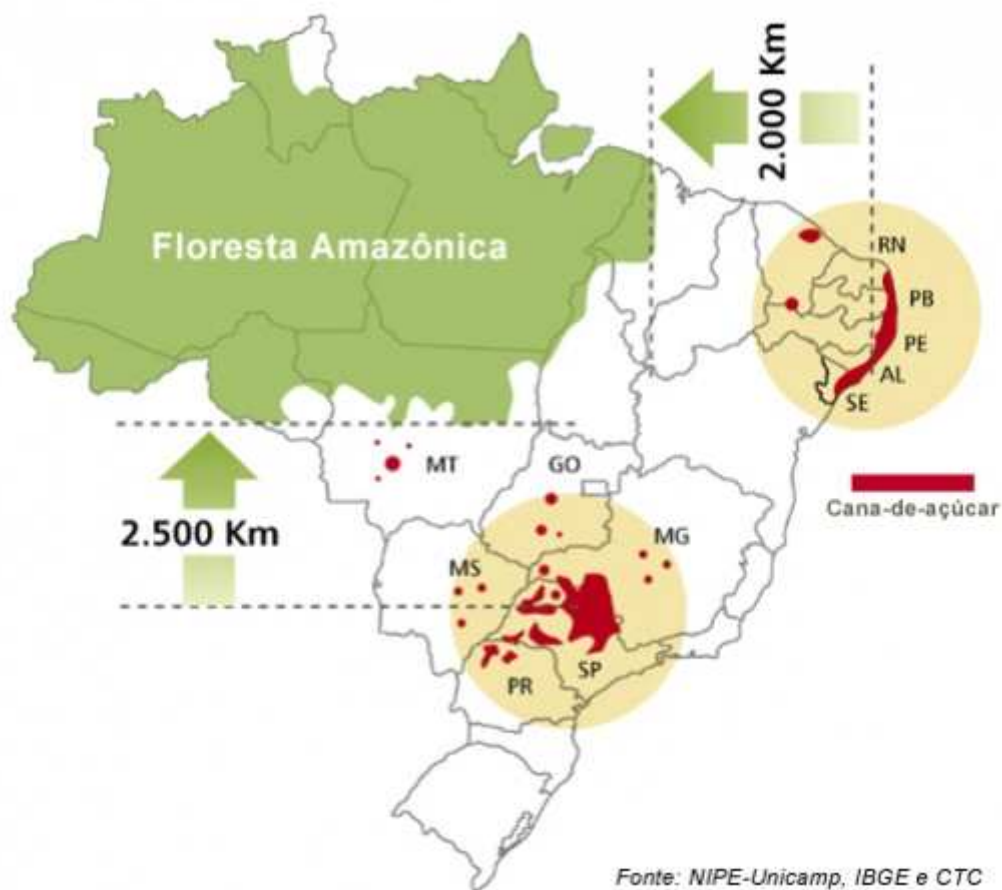


Figura 41 - Mapa de produção de cana-de-açúcar

Fonte: UNICA, 2015

Para ilustrar toda a capacidade instalada no Brasil, iremos apresentar gráficos dos principais produtos gerados através da cana-de-açúcar. Sendo, a própria produção da cana-de-açúcar (ou seja, plantação do insumo), álcool, açúcar e a energia elétrica. A fonte base para retiradas dessas informações foi o site da UNICA e ANEEL, os gráficos foram montados demonstrando os quatro principais estados do Brasil em produção de cana-de-açúcar. O objetivo principal é visualizar o mercado durante os de anos de 2005 a 2014. É importante ressaltar que os levantamentos dos dados foram realizados por ano safra que tem como início em setembro e término em agosto do ano seguinte.

Na tabela 1 é possível observar que no ano de 2005 a 2010 houve um grande desenvolvimento no setor. Esse crescimento reflete os incentivos públicos dos anos anteriores a esse período. Dá-se destaque a indústria automobilística com a fabricação dos motores bicom bustíveis. Porém nos anos seguintes a crise no setor foi inevitável. Cujos principais fatores foram, a crise internacional, falta de incentivos do governo, má gestão da indústria e problemas climáticos. O ano de 2007 ficou marcado pela a descoberta do pré-sal no Brasil. O governo voltou total atenção, deixando assim o álcool em segundo plano.

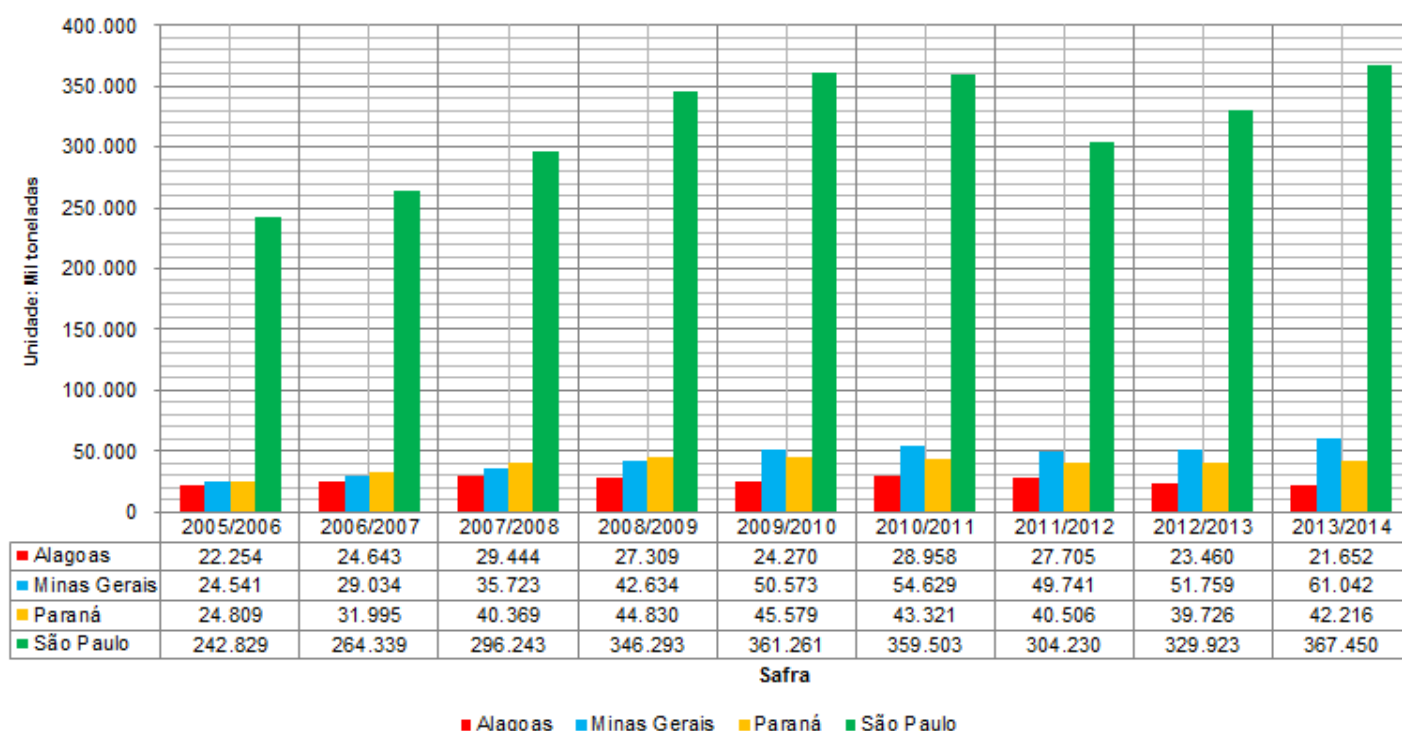


Tabela 1 - Produção de cana-de-açúcar (2005 - 2014)

Fonte: UNICA, 2015

Na tabela 2 é possível visualizar a crise após a safra de 2010/2011, a preço do álcool elevou não o tornando atrativo para o cliente final. Esse fato se dá pelo o governo manter o preço da gasolina em um valor baixo de maneira artificial. Ou seja, o álcool fica em total desvantagem perante a gasolina, pois sua eficiência é menor.

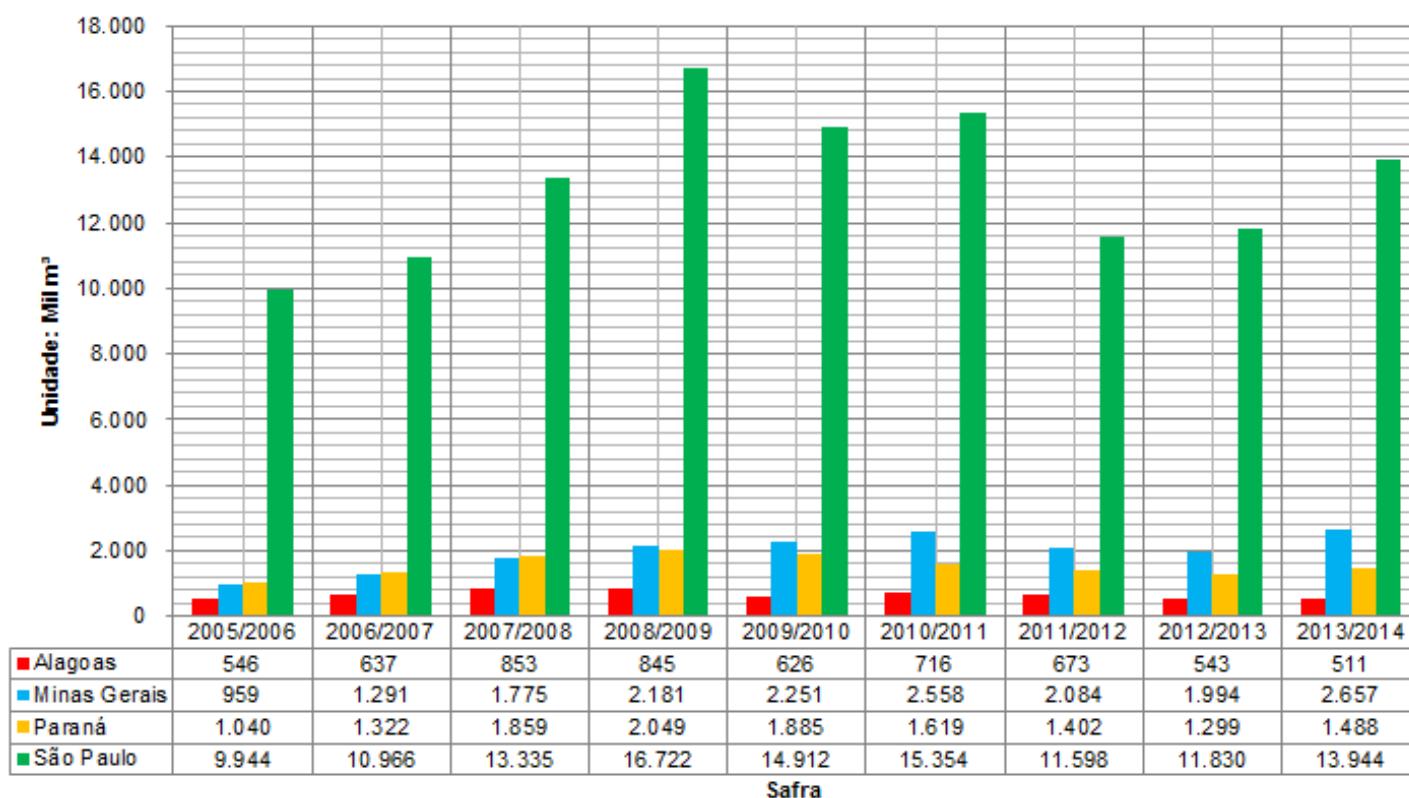


Tabela 2 - Produção de álcool (2005 - 2012)

Fonte: UNICA, 2015

O Brasil é um dos principais produtores de açúcar no mundo. Como demonstrado na tabela 3, sua produção se manteve estável durante as safras. Porém os lucros previstos com a venda do açúcar variam conforme o mercado. Em muitos casos o preço do açúcar é negociado antes mesmo da finalização da safra, fazendo com o lucro seja baixo. Produtores com investimento próprio estocam o açúcar e esperam o momento da alta para venderem. Desta forma é possível negociar no mercado interno ou externo. Nos últimos anos a indústria brasileira de açúcar tem fechado parcerias importantes com país como a China e a Índia.

Um fator importante é o reconhecimento da população perante a importância do açúcar na saúde. Por mais que a indústria química fabricante dos adoçantes fazem o marketing negativo do açúcar, o insumo se firmou na mesa de toda a população.

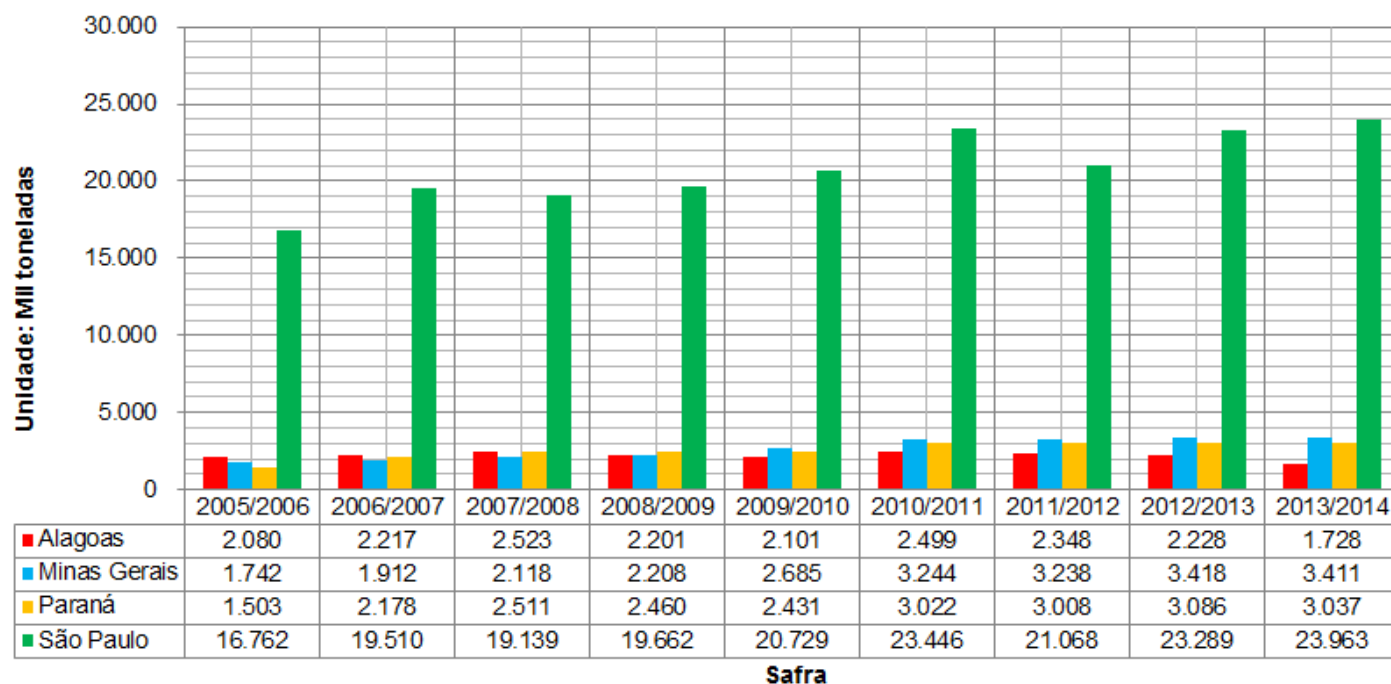


Tabela 3 - Produção de açúcar (2005 - 2014)

Fonte: UNICA, 2015

A seguir a tabela 4 representa proporção das fontes de energia para a matriz energética brasileira. A matriz energética brasileira é conhecida mundial por ter uma base limpa, a oferta de renováveis equivale a 79,6%. Predominantemente a geração hídrica é responsável por 65,68% do fornecimento. A biomassa ocupa apenas 9,49%, contra 18,98% de geração a partir de combustíveis fósseis.

Fontes utilizadas no Brasil - Fase: Operação				
Origem	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	%
Fóssil	1888	26.640.267	26.051.167	18,98
Biomassa	506	13.318.862	12.414.543	9,49
Nuclear	2	1.990.000	1.990.000	1,42
Hídrica	1173	92.431.330	89.888.340	65,85
Eólica	266	5.966.761	5.862.249	4,25
Solar	317	19.179	15.179	0,01
Total	4152	140.366.399	136.221.477	100

Tabela 4 - Fontes de energia no Brasil

Fonte: ANEEL, 2015

O gráfico representado na figura 42 demonstra as proporções acima citadas.

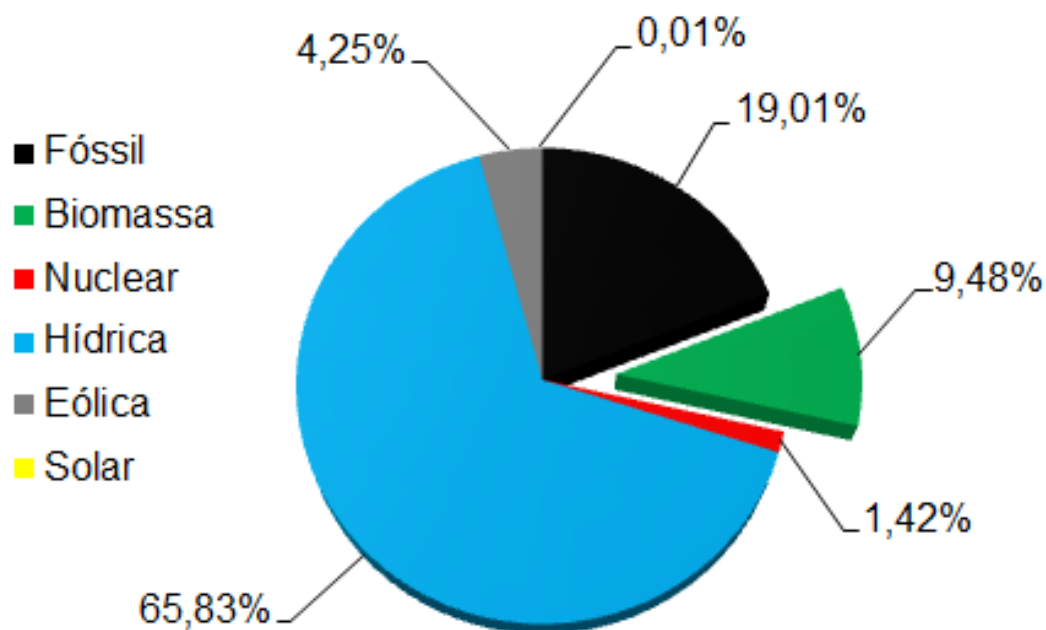


Figura 42 - Fontes de energia no Brasil (%)
Fonte: ANEEL, 2015

A tabela 5 demonstra as proporções das fontes utilizadas pela a biomassa. A biomassa se caracteriza como a reutilização dos resíduos de processo. O enfoque será dado para os resíduos Agroindustriais.

Fontes utilizadas no Brasil - Fase: Operação				
Fonte Nível 1	Quantidade	Potência Outorgada(kW)	Potência Fiscalizada(kW)	%
Floresta	79	2.535.488	2.305.289	19,04
Resíduos sólidos urbanos	10	65.397	62.317	0,49
Resíduos animais	12	2.081	2.081	0,02
Biocombustíveis líquidos	2	4.350	4.350	0,03
Agroindustriais	403	10.711.545	10.040.505	80,42
Total	506	13.318.862	12.414.543	100

Tabela 5 - Fontes da Biomassa
Fonte: ANEEL, 2015

A figura 43 demonstra graficamente as proporções acima citadas.

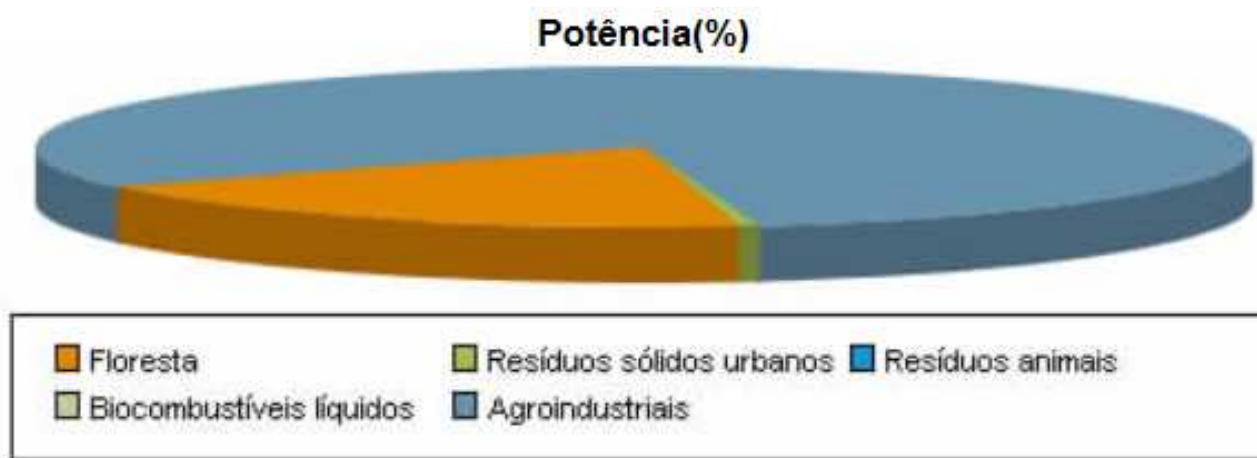


Figura 43 - Fontes da biomassa

Fonte: ANEEL, 2015

O Bagaço de cana-de-açúcar é responsável por 99% do total da energia gerada utilizando a biomassa agroindustrial, como demonstra a tabela 6. Existe um total de 387 usinas de açúcar e álcool registrados na ANEEL. Esses valores demonstram o quanto as tecnologias em sistemas de cogeração em usinas de açúcar estão evoluídas aqui no Brasil.

Fonte de Combustíveis Utilizados no Brasil - Operação				
Fonte Nível 2	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	%
Bagaço de Cana de Açúcar	387	10.604.590	9.933.550	99
Casca de Arroz	11	39.533	39.533	0,37
Biogás-AGR	2	1.722	1.722	0,02
Capim Elefante	3	65.700	65.700	0,61
Total	403	10.711.545	10.040.505	100

Tabela 6 - Combustíveis utilizados na biomassa agroindustriais

Fonte: ANEEL, 2015

A figura 44 demonstra graficamente as proporções acima citadas.



Figura 44 - Combustíveis utilizados na biomassa (%)

Fonte: ANEEL, 2015

3.4 Potencial da cogeração do bagaço de cana-de-açúcar ao SIN

Existem 387 usinas de açúcar e álcool registradas na Aneel contribuindo com o fornecimento de energia elétrica da seguinte maneira:

- APE – Autoprodução de energia – Isso significa que a indústria é autossuficiente em produção de energia elétrica, ou seja, o sistema de cogeração dimensionado atende a demanda total de energia elétrica e térmica do todo o processo;
- PIE – Produção independente de energia – Neste caso a indústria possui um sistema de cogeração onde a demanda interna é suprimida e ainda à venda do excedente para o sistema SIN;
- REG – Registro – Significa que as indústrias são registradas junto a ANEEL, porém não possuem uma estrutura para suportar toda a demanda do seu processo, e em determinados momentos compram energia elétrica do SIN. No entanto contribuem de certa forma para o SIN, pois deixam de consumir elevados valores de energia elétrica. Ou seja, não é totalmente uma carga.

Destino da energia ▾	Soma de Potência (MW)	Total Usinas	%
⊕ APE	1231	66	17%
⊕ PIE	8962	200	52%
⊕ REG	410	121	31%
Total Geral	10603	387	100%

Tabela 7- Somatório destino da energia

Fonte: ANEEL, 2015

É possível observar na tabela 7, que 48% das usinas de açúcar e álcool não vendem energia elétrica para o SIN. Esse fato está ligado ao total de bagaço-de-cana produzido no processo. Daremos ênfase nesse assunto no capítulo 4, porém podemos criar situações e demonstrar o potencial da geração da bioeletricidade.

Podemos criar um cenário, se caso houvesse de alguma forma um incentivo para o setor da bioeletricidade, seja esse através de leilões específicos, taxas de juros menores enfim. Vamos idealizar que as 187 usinas (APE+REG) investissem em equipamentos específicos da cogeração para aumentar a geração de energia elétrica e assim comercializar o valor excedente. No intuito de baratear o projeto estimaremos uma potência de 30 MW por usina (ou CNPJ) a ser injetado ao SIN, desta forma teremos um acréscimo na geração de 5610 MW. A tabela 8 demonstra o valor total estimado de 14572 MW da capacidade geral da geração com base em cogeração do bagaço de cana-de-açúcar, esse valor de potência equivale aproximadamente a três Usinas de Belo Monte que por questão políticas irá operar com o reservatório reduzido, sendo assim deverá produzir cerca de 4500 MW. Podemos também comparar esse valor com a geração da Usina de Itaipu que possui uma capacidade de geração de 14000 MW.

Destino da energia ▾	Soma de Potência (MW)	Total Usinas	%
⊕ APE	1980	66	17%
⊕ PIE	8962	200	52%
⊕ REG	3630	121	31%
Total Geral	14572	387	100%

Tabela 8 - Somatório destino da energia (Estimativa)

Fonte: AUTOR, 2015

Outro cenário que podemos idealizar é o que o Ministério de Minas e Energia (MME) faz uma previsão da produção de bagaço de cana até ano de 2030, a tabela 9 demonstra essa suposta evolução.

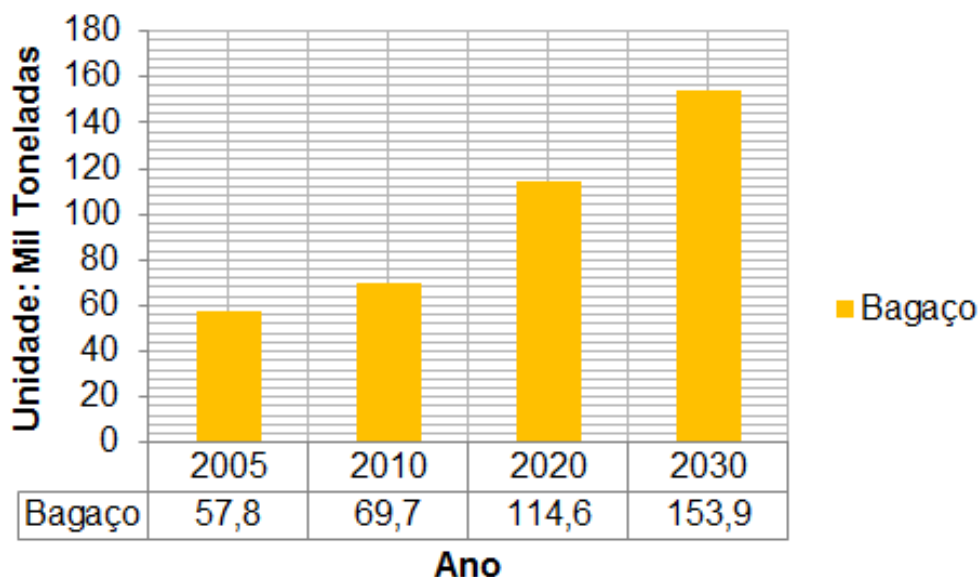


Tabela 9 - Produção de bagaço até o ano de 2030

Fonte: MME, 2006

O total do bagaço a ser obtido pode variar conforme as propriedades da cana a serem moídos, fatores que influenciam dependem da maneira do seu plantio, clima de seu cultivo, qualidade da terra, utilização de vinhoto¹ na fertirrigação, entre outros aspectos.

De acordo com a tabela 9 podemos estimar o total de energia elétrica a ser injetada no SIN, utilizaremos as seguintes premissas:

- O bagaço estimado tenha 50% de umidade por tonelada de cana;
- Para 1 kg de bagaço nas condições acima temos um PCI de 1.800 kcal;
- Eficiência térmica do sistema seja de 33%;
- Consideramos a utilização de 50% do total do bagaço para a produção de energia elétrica, o restante será destinado a geração de energia térmica do processo;

¹ Insumo proveniente da destilação do caldo da cana-de-açúcar quanto ao processo da fabricação do álcool.

Teremos os seguintes valores de GWh de produção de energia elétrica.

	2005	2010	2020	2030
Bagaço da Cana (Milhões de Toneladas)	57,80	69,70	114,60	153,90
Energia Elétrica (GWh)	19.961	24.071	39.577	53.149

Tabela 10 - Produção de Energia Elétrica em GWh (Estimativa)

Fonte: Autor, 2015

O potencial da geração da bioeletricidade através das usinas de açúcar e álcool realmente é surpreendente. Caso as estimativas da MME se concretizem, no ano de 2020 teremos em torno de 40.000 GWh, e em 2030 um total de 54.000 GWh de bioenergia a serem injetados no SIN.

O setor está preparado para esse desafio, o Brasil tem o conhecimento sobre a tecnologia desse segmento, milhares de novos empregos serão gerados. Teremos uma geração de energia elétrica mais próxima dos centros de carga, evitando assim grandes investimentos em projetos de construções de linha de transmissão. Teremos de fato uma matriz energética limpa e diversificada, não dependendo apenas das fontes hídricas e das térmicas movidas a combustíveis fósseis.

3.5 Desafios e oportunidades

O setor sucroalcooleiro com o passar dos anos tem cada vez mais demonstrado que é capaz de passar por desafios e amadurecer cada vez mais. Existem oportunidades que podem ajudar na melhoria da eficiência processo de exploração da cana de açúcar. A produção de açúcar e álcool equivale apenas um terço do potencial energético da cana, sendo esses produtos extraídos do colmo da planta. Os outros dois terços do potencial estão contidos no bagaço e pontas e palhas, insumo esses deixado no campo e utilizado como adubo. Podemos citar uma nova tecnologia que toma destaque, a queima da palha. Anteriormente deixada nos campos para utilização como adubo ou até mesmo descartada “queimada”, vem sendo que utilizada como combustível para o processo de cogeração. Estudos recentes revelaram que a palha tem um maior poder calorífico do que o bagaço.

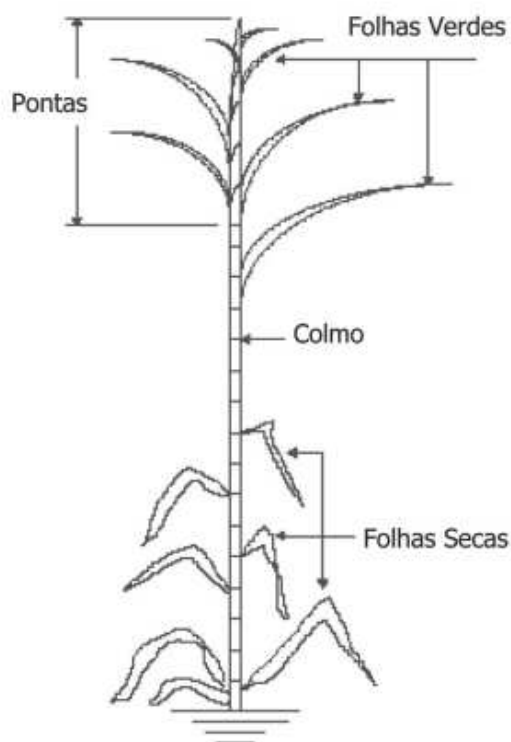


Figura 45 - Partes da cana-de-açúcar
Fonte: MME, 2006

O governo em muitos momentos teve sua parcela de culpa nesse cenário de desaceleração. A produção do álcool que até então era motivo de orgulho perante aos outros países do mundo. Motivo esse, reconhecido por ser um combustível renovável e mais limpo do que a gasolina. Como já citado a partir dos anos 70 políticas de incentivo foram criadas pelo o governo, desde a imposição de uma determinada proporção de mistura com a gasolina a facilidade de financiamentos a juros baixos para os empreendedores desse ramo. Porém com a descoberta do Pré-Sal a partir de 2008 o governo deixou o álcool em segundo plano e assim iniciando um processo de decadência no setor. Para uma possível recuperação do setor é necessário a implantação de políticas e diretrizes para produção e utilização do álcool, ou seja, determinar o quantidade a ser produzida e vendida para o consumidor. Não fazendo assim com a demanda do álcool seja influenciada perante o preço da gasolina. Um combustível renovável onde o Brasil é um dos maiores exportadores do mundo, não pode ficar em segundo plano.

Outro aspecto não menos importante a ser tratado é a Bioeletricidade. Como já demonstrado no capítulo anterior, existe um grande potencial na geração de energia elétrica através da queima do bagaço e da palha. Porém, nos últimos leilões de bioenergia, a biomassa não se tornou competitiva perante aos projetos eólicos. Para as térmicas os custos com equipamentos, operação e manutenção e produção de seus insumos (cana, madeira, etc.) são fatores determinantes para análise da viabilidade técnica econômica de futuros investimentos. Por esses motivos é necessário aumentar a quantidade de leilões específicos para o setor, onde as externalidades serão levadas em consideração e a constituição do preço do MWh será mais competitiva, possibilitando assim, a implantação de novos projetos de biomassa ao SIN. Desta forma, a matriz energética terá uma melhor diversificação. Temos como pontos positivos, o fato das usinas de açúcar e álcool estarem próximas ao centro de carga, não necessitando assim de grandes investimentos com linhas de transmissão, essa perspectiva é comparada a plantas eólicas. A construção de novas usinas influencia diretamente a geração de novos empregos para as cidades próximas ao empreendimento. O Brasil possui o know-how sobre a tecnologia empregada nas usinas sucroalcooleiras, ou seja, a fabricação é nacional. Levando assim ao desenvolvimento da indústria brasileira, movimentando a economia nacional. Outro fator positivo é o tempo de implantação das usinas de açúcar e álcool, podendo variar de 24 a 30 meses, comparado com as Hidroelétricas a depender do porte podem chegar a 60 meses.

O Brasil é reconhecido mundialmente por ter uma matriz energética limpa, sendo cerca de 70% a energia proveniente das águas. Por questões ambientais as usinas hidroelétricas estão sendo construídas a “fio d’água”, ou seja, não possuem reservatório. Desta forma não há possibilidade dessas gerarem eletricidade o ano inteiro, pois existe um período do ano que ocorre a estiagem. Fenômeno conhecido pela falta de chuvas em determinadas regiões por longos períodos. A bioeletricidade casa perfeitamente com esse fenômeno, pois nos meses entre maio e novembro a indústria da cana produz a biomassa responsável pela cogeração das usinas complementando assim a geração de eletricidade para o SIN. Abaixo a figura 46 demonstra essa complementaridade no período seco.

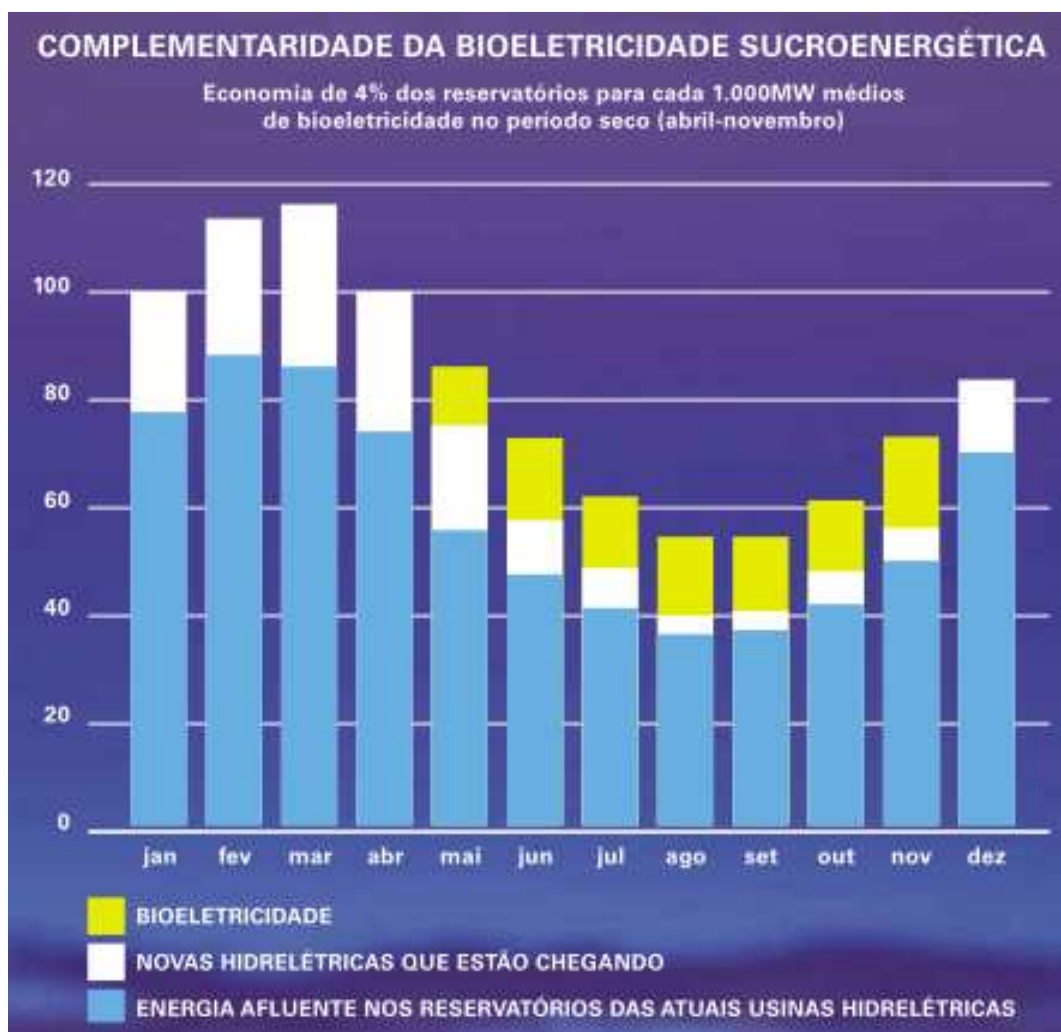


Figura 46 - Complementaridade da Bioenergia para o SIN

Fonte: UNICA, 2010

Mais uma vez a indústria da cana prova o seu real valor, não só pelos os aspectos de fabricação de alimentos como açúcar, pela a produção de combustíveis limpo como o Álcool, mas também na geração da bioeletricidade. Acredito que nos próximos anos o setor tende a crescer novamente e o Brasil só terá a ganhar.

4. APLICAÇÃO DA COGERAÇÃO NA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR

4.1 Integração da cogeração ao SIN

Para a inserção da cogeração ao SIN é necessário que o sistema atenda os requisitos de qualificação estipulados pela ANEEL, como citado no capítulo dois deste trabalho. A bioeletricidade se tornou um negócio para as usinas de açúcar e álcool, a comercialização dessa energia elétrica excedente, está regulamentada para ser vendida por meio de leilões no mercado regulado, ou até mesmo através de contratos no mercado livre. A ANEEL regula os leilões e esses são efetivados pela CCEE.

- Mercado regulado ou Ambiente de Contratação Regulado (ACR): Trata-se de um sistema de compra e venda de energia elétrica onde que empresas concessionárias de distribuição de energia participam de leilões, que tem como objetivo promover a concorrência entre os agentes de geração e encontrar o preço mais viável que será repassado para a população (consumidor final). Os projetos vencedores são aqueles que apresentam o menor megawatt/hora (MW/h) que cumpre a demanda prevista pelas distribuidoras. Para sacramentar os acordos são estipulados contratos bilaterais que determinam o prazo específico de duração, são conhecidos como Contratos de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado (CCEAR).
- Mercado livre ou Ambiente de Contratação Livre (ACL): Assim como no mercado regulado, o ambiente de contratação livre consiste na realização de contratos bilaterais que podem ser negociados livremente os preços do MW/h entre agentes geradores, comercializadores e consumidores livres. Destacam-se como compradores nesse mercado, grandes indústrias do ramo siderúrgico, automobilístico e químicos. Que por serem grandes consumidores de energia possuem a vantagem de optar dentre diferentes modelos de contratos, analisando assim a melhor viabilidade econômica entre eles.

A contratação no ambiente regulado é realizada através de leilões de energia, onde o MME classifica da seguinte forma:

Leilão A-5: processo licitatório para a contratação de energia elétrica proveniente de novos empreendimentos de geração realizado com 5 (cinco) anos de antecedência do início do suprimento. Esse foi criado para viabilizar empreendimentos de longa maturação, como, por exemplo, os empreendimentos hidrelétricos.

Leilão A-3: processo licitatório para a contratação de energia elétrica proveniente de empreendimentos de geração novos realizado com 3 (três) anos de antecedência do início do suprimento. Esse leilão foi criado para viabilizar empreendimentos de médio prazo de maturação, como, por exemplo, os empreendimentos termelétricos.

Leilão A-1: processo licitatório para a contratação de energia elétrica proveniente de empreendimentos de geração existentes realizado com 1 (um) ano de antecedência do início do suprimento. Excepcionalmente, no ano de 2013, o início de entrega poder-se-á dar no ano da licitação.

Leilão de Ajuste: processo licitatório que tem por objetivo complementar a carga de energia necessária ao atendimento do mercado consumidor dos agentes de distribuição, até o limite de 1% do mercado de cada distribuidora.

Leilão de Fontes Alternativas - LFA

Os leilões de fontes alternativas foram criados com o objetivo de incentivar a diversificação da matriz de energia elétrica, introduzindo fontes renováveis e ampliando a participação de energia eólica e da bioeletricidade.

É importante citar o incentivo dado pelo o governo para os geradores e consumidores que atuam na comercialização de energia. Estabelecida pela a lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, foi concedido desconto de até 50% sobre as Tarifas de uso dos sistemas de transmissão (TUST) e para as Tarifas de uso dos sistemas de distribuição (TUSD) para empreendimentos enquadrados como PCHs, hidrelétricas com potência igual ou inferior a 1MW, e para plantas solares, eólica, usinas à biomassa e cogeração qualificada com uma potência menor ou igual a 30MW.

4.2 Configuração do sistema de cogeração em estudo

Para o estudo iremos utilizar um sistema de cogeração com turbina de contrapressão. Sendo esse esquema muito utilizado em usinas de açúcar e álcool no Brasil, a geração de energia elétrica desse processo está diretamente ligada à demanda térmica da indústria. A figura 47 exemplifica esse sistema:

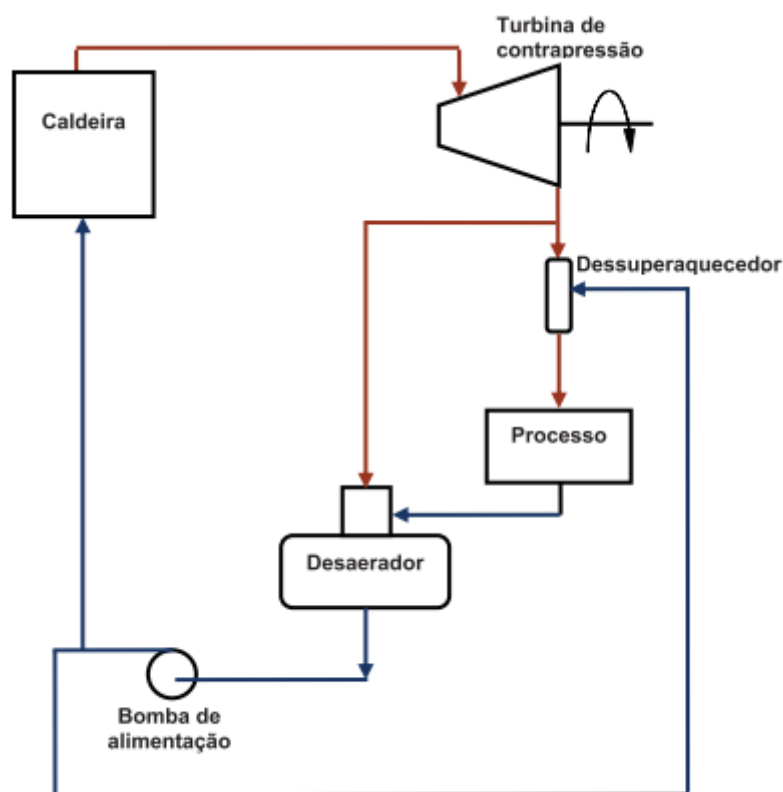


Figura 47 - Cogeração com turbina de contrapressão

Fonte: DANTAS, DJOLSE NASCIMENTO, 2010

O balanço energético toma como base a análise do total do vapor gerado pelas as caldeiras com o total de tonelada da cana moída. A sugestão é que das 2.000.000 toneladas de cana moída a usina tenha uma moagem de 3.000.000 toneladas de cana por safra. Neste caso a usina terá de fazer investimentos na instalação de uma nova caldeira 200 TV/h, troca da turbina existente e na compra de um gerador síncrono de 50,6 MW.

4.3 Simulações do balanço energético

Essa simulação toma como base a melhoria do sistema no que tange a produção de energia elétrica. Os cálculos estão divididos no período de safra e entressafra, pois as cargas térmicas possuem suas particularidades em cada período. Nesse caso foi considerado que o a usina já possuía a caldeira de 200 TV/h, porém não instalado em seu processo. Por isso se dá a necessidade da reavaliação do balanço energético do novo sistema.

Para análise do potencial da geração de energia elétrica através da queima do bagaço, precisamos levar em conta o período da safra, taxa de aproveitamento, período efetivo de safra (considera possíveis problemas com manutenção), fibra da cana, umidade da cana (influencia diretamente no poder calorífico do combustível), consumo específico do vapor para o processo (parâmetro importante para análise do vapor destinado a geração de energia elétrica) e a taxa de segurança para o estoque de bagaço (fator de segurança caso haja algum problema com o estoque).

Abaixo as premissas adotadas:

	PREMISSAS	VALOR	UNIDADE
1	Período de Safra	220	Dias
2	Taxa de Aproveitamento	91%	Porcento
3	Período Efetivo de Safra	200	Dias
4	Fibra da Cana	12%	Porcento
5	Umidade da Cana	50%	Porcento
6	Consumo Específico de Vapor Para o Processo	470	Kg Vapor/Ton Cana
7	Taxa De Segurança Para Estoque Bagaço	6%	Porcento

Tabela 11 - Balanço energético – Premissas

Fonte: Autor, 2015

Leva-se em consideração a capacidade de moagem da indústria, parâmetros importantes para dimensionamento do valor total da tonelada do bagaço da cana. A produção do excedente do bagaço será levando em consideração na geração de energia térmica e elétrica no período da entre safra.

	1) DADOS GERAIS DE MOAGEM	VALOR	UNIDADE
1	Moagem total da safra	3.000.000	tc/safra
2	Moagem diaria	14.985	tc/dia
3	Moagem Horária	624	tc/h
4	Produção Horária de Bagaço	141	tb/h
5	Estoque de Segurança de Bagaço	9	tb/h
6	Consumo Vapor Industrial	293	TV/h
7	Tempo Efetivo Moendo	4805	h

Tabela 12 - Balanço energético – Dados Gerais da Moagem

Fonte: Autor, 2015

Faz-se o levantamento das cargas do processo, no caso os equipamentos empregados são elétricos, configurando assim uma usina moderna, assunto tratado no subcapítulo 2.3. Os cálculos termodinâmicos para dimensionamento do turbo gerador não serão demonstrados neste trabalho. Através do valor total do fluxo gerado de vapor pelas turbinas, consultamos um fabricante de turbo gerador que nos informou a potência máxima da máquina, ou seja, 50,6 MW.

2) ACIONAMENTOS DE GERAÇÃO COM USO DE VAPOR (SAFRA)

Equipamento	Potência Média (KW)	Consumo Específico (kgv/kwh)	Consumo Medio de Vapor 21 kgf/cm² (TV/h)	Consumo Medio de Vapor 42 kgf/cm² (TV/h)	Consumo Medio de Vapor 67 kgf/cm² (TV/h)	Consumo Elétrico Específico (kwh/tc)	Potência Especifica Do Acionamento (HPH/tf)
1ª TANDEM (MOENDA 1)							
Desfibrador - Motor Elétrico	957	-	-	-	-	-	-
Moenda - Multiplos Estagios	3.018	-	-	-	-	-	-
2ª TANDEM (MOENDA 2)							
Desfibrador - Motor Elétrico	883	-	-	-	-	-	-
Moenda - Multiplos Estagios	3.238	-	-	-	-	-	-
GERADOR ELÉTRICO							
Turbo Gerador 1- Contra Pressão - Multiplos Estágios	50.600	5,8	-	93	200	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
Complemento De Vapor Via Valvula Condicionadora (TV/h)	-	-	-	-	-	-	-
Complemento De Vapor Via Dessuperaquecedor (TV/h)	-	-	-	-	-	-	-
Total De Vapor de Escape da Maquina de Contra-Pressão 1,5 kgf/cm² 140 °C (TV/h)	293						
Necessidade Media de Vapor De Baixa Para Processo 1,5 kgf/cm² 140 °C (TV/h)	293						
Diferença Entre Vapor De Escape e Necessidade do Processo (TV/h)	0						

Tabela 13 - Acionamentos de geração com uso de vapor (SAFRA)

Fonte: Autor, 2015

Também foi levado em consideração o incentivo dado pelo governo para comercialização de energia, para a biomassa um valor total de 30MW. É muito comum em usinas sucroalcooleiras observar transformadores de potência de 30/37,5 MVA instalados nas subestações elevadoras conectadas ao SIN. Sendo assim a demanda total de energia elétrica da fábrica na safra e entre safra determinaram para o dimensionamento do turbo gerador.

Na entre safra a potência média fornecida pelo o turbo gerador foi de 31,4 MW, ou seja, 30 MW de exportação e 1,4 MW de consumo interno.

2) ACIONAMENTOS DE GERAÇÃO COM USO DE VAPOR (ENTRE SAFRA)

Maquina	Potência Média (KW)	Consumo Especifico (kgv/kwh)	Consumo Medio de Vapor 21 kgf/cm ² (TV/h)	Consumo Medio de Vapor 42 kgf/cm ² (TV/h)	Consumo Medio de Vapor 67 kgf/cm ² (TV/h)	Consumo Elétrico Especifico (kwh/tc)	Potência Especifica Do Acionamento (HPh/tf)
1ª TANDEM (MOENDA 1)							
Desfibrador - Motor Elétrico	957	-	-	-	-	-	-
Moenda - Multiplos Estagios	3.018	-	-	-	-	-	-
2ª TANDEM (MOENDA 2)							
Desfibrador - Motor Elétrico	883	-	-	-	-	-	-
Moenda - Multiplos Estagios	3.238	-	-	-	-	-	-
GERADOR ELÉTRICO							
Turbo Gerador 1 - Contra Pressão - Multiplos Estágios	31.400	6,4	-	-	200	-	-
.	-	-	-	-	-	-	-
Complemento De Vapor Via Valvula Condicionadora (TV/h)	-	-	-	-	-	-	-
Complemento De Vapor Via Dessuperaquecedor (TV/h)	-	-	-	-	-	-	-
Total De Vapor de Escape da Maquina de Contra-Pressão 1,5 kgf/cm ² 140 °C (TV/h)	200						
Necessidade Media de Vapor De Baixa Para Processo 1,5 kgf/cm ² 140 °C (TV/h)	-						
Diferença Entre Vapor De Escape e Necessidade do Processo (TV/h)	200	Condensação Caipira					

Tabela 14 - Acionamentos de geração com uso de vapor (ENTRE SAFRA)

Fonte: Autor, 2015

Como citado anteriormente utilizamos como premissa a instalação de uma nova caldeira de 200 TV/h (C2), a análise em questão trata-se do total da de vapor pelas gerador pelas Caldeiras. Desta forma soma-se a produção da caldeira existente com uma capacidade de 150 TV/h (C1).

3) PRODUÇÃO DE VAPOR (SAFRA)			
	TV/h	Kgf/cm ²	°C
Caldeira 1 (C1)	150	45	320
Caldeira 2 (C2)	200	67	490

	C1	C2
Consumo Especifico das Caldeiras (kgv/Kgb)	2,15	2,20
Produção De Vapor (TV/h)	93	200
Produção Total De Vapor (TV/h)	293	

Tabela 15 - Produção de vapor (SAFRA)

Fonte: Autor, 2015

Na tabela acima (Produção de Vapor – Safra) consideramos o valor de 93 TV/h para a Caldeira 1 (C1), valor esse considerado de segurança, pois entendemos que por se tratar de uma caldeira existente com muitos anos de utilização a mesma possua uma baixa eficiência.

3) PRODUÇÃO DE VAPOR (ENTRE SAFRA)			
	TV/h	Kgf/cm ²	°C
Caldeira 1 (C1)	150	45	320
Caldeira 2 (C2)	200	67	490

	C1	C2
Consumo Especifico das Caldeiras (kgv/Kgb)	2,1	2,2
Produção De Vapor (TV/h)	0	200
Produção Total De Vapor (TV/h)	200	

Tabela 16 - Produção de vapor (ENTRE SAFRA)

Fonte: Autor, 2015

Na Entre Safra consideramos apenas a utilização da caldeira 2 (C2), ou seja, a nova caldeira, consideramos que a caldeira 1 existente (C1) estará em manutenção nesse período. Os valores do consumo específico das caldeiras são dados pelo fabricante, é importante ressaltar a proximidade dos valores entre a caldeira existente e a nova. Esse fato se dá pela evolução tecnológica impulsionada pelos os fabricantes dos equipamentos, esses valores afetam diretamente o consumo de bagaço de cana.

O bagaço de cana é o principal componente da cogeração em usinas de açúcar e álcool. Por sua vez os cálculos de sua disponibilidade são importantíssimos para garantia da geração térmica e elétrica de toda a planta industrial. Os valores da disponibilidade de bagaço é o resultado da multiplicação da produção horária de bagaço e o tempo efetivo da moagem, valores descritos na tabela “Dados gerais de moagem”. Já comentado anteriormente, o consumo de bagaço se dá através dos valores do consumo específicos por caldeira.

4) BAGAÇO		
	C1	C2
Disponibilidade De Bagaço (t/safra)		676.800
Consumo De Bagaço (t/h)	43	91
Consumo De Bagaço (t/Safra)	207.836	436.800
Consumo Total De Bagaço (t/Safra)		644.636
Excedente De Bagaço (t/Safra)		32.164
Estoque De Segurança De Bagaço (t/Safra)		43.200

Tabela 17 - Dados bagaço
Fonte: Autor, 2015

A partir desses resultados obtidos é possível verificar que o estoque de segurança do bagaço atenderá a demanda e que teremos um excedente, possibilitando a geração de energia elétrica na Entre Safra.

As tabelas abaixo evidenciam os respectivos valores da geração de energia elétrica. O objetivo é obter o valor do total de energia excedente em MWh para exportação. Essa energia pode ser comercializada tanto no mercado regulado como no mercado livre, esse assunto será tratado no subcapítulo 4.4.

5) GERAÇÃO DE ENERGIA	
Potência Gerada na Máquina De Contra-Pressão Com Indução (MWh)	50,6
Energia Gerada Pela Máquina De Contra-Pressão Com Indução (MWh/safra)	243.123
Consumo Elétrico Específico Da Usina (kwh/tc)	33
Potência média necessária à usina (Parasitas Inclusos) (MWh)	20,6
Energia Elétrica Necessária à Usina (MWh/safra)	99.000
Potência Excedente Disponível Para Exportação (MWh)	30
Limite Exportação Rede Concessionária (MWh)	30
Energia Excedente Disponível Para Exportação (MWh/safra)	144.123

Tabela 18 - Geração de energia

Fonte: Autor, 2015

Para resultado da energia excedente foram levados em conta os valores do consumo da usina no período da safra a da entre safra.

5) GERAÇÃO DE ENERGIA ADICIONAL NA ENTRE SAFRA COM O EXCEDENTE DE BAGAÇO		
Sobra De Bagaço		32.164
Capacidade Geração (MWh)		31,4
Consumo Elétrico Parasita (MWh)	15%	4,7
Geração Para Exportação Na Rede Concessionária (MWh)		26,7
Consumo Específico Do Turbo Gerador Contra-Pressão (TVh/MWh)		6,4
Consumo Medio de Vapor 67 kgf/cm ² (TVh)		200,0
Consumo Medio de Bagaço pela Caldeira 2 67 kgf/cm ² (tb/h)		90,9
Período De Operação na Entre Safra (h/entre safra)		353,8
Período De Operação na Entre Safra (dias/entre safra)		14,7
Consumo Elétrico Parasita na Entre Safra (MWh/entre safra)		1.666
Energia Gerada na Entre Safra (MWh/ entre safra)		9.443
Energia Excedente Disponível Para Exportação (MWh/ entre safra)		7.777

Tabela 19 - Geração de energia SAFRA e ENTRE SAFRA

Fonte: Autor, 2015

Consideramos para a capacidade de geração elétrica o valor de 31,4 MWh no período da entre safra, como já explicado anteriormente trata-se da demanda da fábrica e o total a ser exportado respeitando o valor limite do incentivo estipulado pelo o governo.

Os valores obtidos para a geração de energia elétrica foram satisfatórios, tanto para a geração na Safra 44.123 MWh, como para a Entre Safra 7.777 MWh, totalizando um excedente de 151.900 MWh.

A figura 48 ilustra o sistema contemplando as duas caldeiras e os respectivos valores encontrados conforme as tabelas acima.

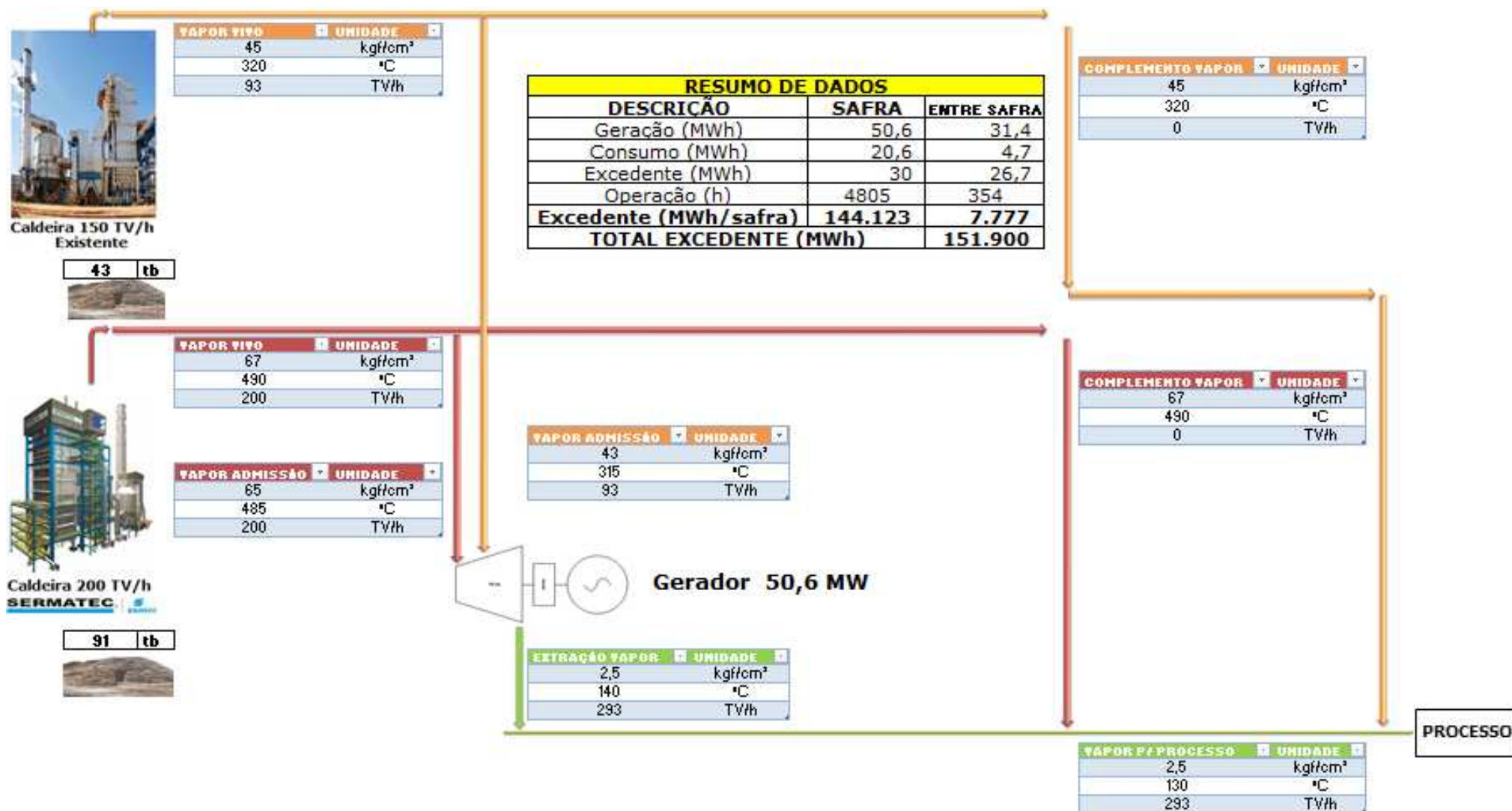


Figura 48 - Balanço Térmico – Simulação
Fonte: Autor, 2015

4.4 Análise econômica (Payback, VPL e TIR)

Para fazer a análise da viabilidade econômica, iremos considerar dois cenários, sendo o primeiro com o valor estimado do MWh do mercado regulado, ou seja, R\$ 209,91 MWh, e para o segundo cenário utilizaremos o valor do mercado livre R\$ 388,48 MWh. Estipulamos os seguintes valores como premissas:

1. Total do investimento – R\$ 131.880.000
2. Financiamento do valor para investimento – 20%
3. Tempo de obras – 2 anos
4. Custos operacionais para geração da energia elétrica – R\$ 50 / MWh
5. Despesas administrativas – R\$ 1.500.000 / ano
6. Produção anual de energia elétrica excedente – 152 GWh

CENÁRIO 1		R\$ mil			
Usina de Açúcar e Alcool - Venda Excedente Mercado Regulado		Ano 01	Ano 02	Ano 03	Ano 35
Produção Anual (GWh) Mil unidades		-	-	152	152
(-)	131.880 INVESTIMENTO (R\$ Mil)	(65.940)	(65.940)	-	
(+)	20,0% FINANCIAMENTO	13.188	13.188	-	
(+)	209,91 RECEITA BRUTA (preço de lance x quantidade)	-	-	31.906	31.906
(-)	9,25% IMPOSTOS DIRETOS	-	-	(2.951)	(2.951)
(-)	50,00 CUSTO OPERACIONAL	-	-	(7.600)	(7.600)
(-)	1.500 SG&A	-	-	(1.500)	(1.500)
(=)	EBITDA	-	-	19.855	19.855
(-)	5,00% DEPRECIAÇÃO	-	-	(6.594)	-
(-)	DESPESAS FINANCEIRAS	-	-	(1)	
(=)	LAIR (=LUCRO TRIBUTÁVEL)	(52.752)	(52.752)	13.260	19.855
(-)	34,00% IR + CSSL	-	-	(4.508)	(6.751)
(=)	LUCRO LÍQUIDO	(52.752)	(52.752)	8.752	13.104
(+)	DEPRECIAÇÃO	-	-	6.594	-
(-)	AMORTIZAÇÃO FINANCIAMENTO	-	-	(26.376)	-
(=)	FLUXO DE CAIXA LIVRE DO ACIONISTA	(52.752)	(52.752)	(11.030)	13.104

TAXA DE DESCONTO	10%
VALOR PRESENTE LÍQUIDO	(R\$ 90.313,69)
TAXA INTERNA DE RETORNO	3,50%
PAY BACK SIMPLES	15,07

Tabela 20 - Viabilidade econômica - Venda de energia elétrica no mercado regulado
Fonte: Autor, 2015

CENÁRIO 2		R\$ mil			
Usina de Açúcar e Álcool - Venda Excedente Mercado Livre		Ano 01	Ano 02	Ano 03	Ano 35
Produção Anual (GWh) Mil unidades		-	-	152	152
(-)	131.880 INVESTIMENTO (R\$ Mil)	(65.940)	(65.940)	-	
(+)	20,0% FINANCIAMENTO	13.188	13.188	-	
(+)	388,48 RECEITA BRUTA (preço de lance x quantidade)	-	-	59.049	59.049
(-)	9,25% IMPOSTOS DIRETOS	-	-	(5.462)	(5.462)
(-)	50,00 CUSTO OPERACIONAL	-	-	(7.600)	(7.600)
(-)	1.500 SG&A	-	-	(1.500)	(1.500)
(=)	EBITDA	-	-	44.487	44.487
(-)	5,00% DEPRECIAÇÃO	-	-	(6.594)	-
(-)	DESPESAS FINANCEIRAS	-	-	(1)	
(=)	LAIR (=LUCRO TRIBUTÁVEL)	(52.752)	(52.752)	37.892	44.487
(-)	34,00% IR + CSSL	-	-	(12.883)	(15.126)
(=)	LUCRO LÍQUIDO	(52.752)	(52.752)	25.009	29.361
(+)	DEPRECIAÇÃO	-	-	6.594	-
(-)	AMORTIZAÇÃO FINANCIAMENTO	-	-	(26.376)	-
(=)	FLUXO DE CAIXA LIVRE DO ACIONISTA	(52.752)	(52.752)	5.227	29.361

TAXA DE DESCONTO	10%
VALOR PRESENTE LÍQUIDO	R\$ 51.114,56
TAXA INTERNA DE RETORNO	13,57%
PAY BACK SIMPLES	5,27

Tabela 21 - Viabilidade econômica - Venda de energia elétrica no mercado livre

Fonte: FONTE PRÓPRIA, 2015.

É possível observar que no Cenário 1 (mercado regulado) o projeto não é viável, pois o retorno do investimento está muito longo valor próximo dos 15 anos. Comparado com o Cenário 2, a TIR foi apenas de 3,50% contra 13,57%. Outro fator para reprovação foi o VPL negativo, representando que o projeto não pagará.

Já para o Cenário 2 o investimento torna-se viável, pois temos um Pay back em torno dos cinco anos. Com uma boa taxa interna de retorno de 13,57% comparado com ao cenário 1. Porém o valor do MWh do mercado livre pode sofrer alterações no decorrer do tempo, sua variação ocorre frente a oferta e a procura. Como já comentado anteriormente, para as usinas sucroalcooleiras a venda de energia elétrica se tornou um negócio, tornando-se parte integrante de seus produtos finais.

5. CONCLUSÕES

Como exposto no presente trabalho as usinas de açúcar e álcool demonstraram o seu potencial perante aos desafios no decorrer de sua história. Podemos citar várias vantagens da bioeletricidade, porém daremos foco em algumas. A diversificação da matriz energética brasileira é algo necessário, pois nos últimos anos a crise hídrica tem se agravado cada vez mais, existe um risco real de um severo racionamento. No período da seca do país, entre maio e novembro, as usinas sucroalcooleiras estão a todo vapor produzindo álcool e açúcar, gerando então o resíduo do processo, o bagaço de cana, combustível responsável pela a geração de eletricidade, sendo essa injetada ao SIN causando um efeito de complementariedade. Segundo a UNICA no ano de 2014 a geração da biomassa ajudou a poupar 14% dos reservatórios das hidroelétricas, isso representa 7% do consumo total do país. A região Sudeste e Centro-Oeste consome 60% de toda eletricidade disponível no SIN, as usinas de açúcar e álcool estão próximas dos centros de cargas facilitando a transmissão, não dependendo de grandes investimentos como ocorre para os parques eólicos, que muitas vezes ficam prontas, porém não possuem linhas de transmissão para injetarem a energia gerada. Isso dá por uma dura realidade no Brasil, proveniente de uma lentidão do governo na liberação de concessões para construção destas.

Podemos falar dos benefícios trazidos pela construção de novas usinas. A geração de empregos é uma delas, em média por usina são gerados 200 empregos diretos e indiretos, fora o giro da economia causado nas cidades em torno. A cidade de Sertãozinho é um grande exemplo, as maiorias dos fornecedores para o ramo sucroalcooleiro estão instaladas lá. Hoje por causa da crise no setor, a cidade está sendo seriamente afetada.

Diante de políticas públicas errôneas e tortuosas o setor sucroalcooleiro hoje passa por uma crise que está levando ao fechamento de várias usinas. Os principais fatores para isso foram, no caso do álcool a fixação do preço da gasolina, não tornam o etanol atraente para o consumidor, que por sua vez é menos eficiente que a gasolina. O desinteresse do governo pela o “combustível limpo” o álcool, se deu pela a descoberta do Pré Sal. Uma possível solução seria destinar parte do mercado

dos combustíveis para o álcool, ou seja, seu preço não estaria à mercê do preço da gasolina. O meio ambiente será o melhor beneficiado nesse contexto.

Para a bioeletricidade a falta de incentivo do governo principalmente nos leilões de energia, há necessidade de se fazer uma análise das externalidades da biomassa para melhora do preço-teto nos leilões. A separação da geração térmica à biomassa da geração eólica será de fundamental importância, pois os custos de investimentos e manutenções são totalmente diferentes, fatores que influenciam na viabilidade dos projetos. Com base nos cálculos de viabilidade econômica realizados anteriormente, os valores atraentes para os investidores da energia estão próximos dos R\$ 330 por MWh. O último leilão de fontes renováveis nº2/2015 realizado no dia 27 de abril teve o preço teto de R\$ 209,91/MWh para as termelétricas movidas a biomassa, demonstrando uma leve melhora para o setor. Em nosso cenário atual, apenas 40% das usinas exportam energia para o SIN, desta forma o potencial desse segmento é enorme.

No caso da bioeletricidade, de acordo com as simulações realizadas podemos concluir que a venda de energia no mercado livre é viável e rentável para os investidores. Pensando dessa forma, podemos até criar uma situação futura, caso o valor da energia chegue à R\$800 MWh por exemplo, teremos um Pay Back de no máximo 2,5 anos com uma taxa de retorno de 37,45%. Tornando assim esse projeto muito mais atrativo para os investidores se caracterizando investimento de curto prazo com um rápido retorno e mais rentável comparado aos outros cenários apresentados anteriormente. Em contrapartida o mercado livre possui o preço muito volátil do valor MWh, aumentando o risco financeiro, fator esse determinante nas tomadas de decisão dos acionistas.

Para o mercado regulado, conforme a simulação demonstra, o projeto torna-se inviável. Pois os valores do MWh são baixos em relação aos custos operacionais que contemplam a manutenção da usina e o investimento inicial realizado.

Para estudos futuros podemos nos aprofundar nas eficiências dos sistemas de cogeração em usinas sucroalcooleiras, fazendo análises detalhadas dos ciclos termodinâmicos visando o máximo de aproveitamento do vapor gerado. Não só no âmbito da cogeração, pode ser feita análises críticas sobre as cargas elétricas e

térmicas da uma determinada usina, sugerindo trocas e melhores planos de manutenção para os equipamentos de todo o processo.

Outro assunto importante a ser estudado é a integração da cogeração a partir da queima do bagaço da cana ao SIN, principais desafios encontrados como, processos burocráticos, ambientais, políticos e econômicos. Propondo assim, possíveis soluções para os problemas encontrados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRÉ RICARDO ALCARDE; **Artigo – Extração**. 2015. Disponível em:

http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_103_22122006154841.html

ANDREOS, RONALDO; **Estudo de viabilidade técnico-econômica de pequenas centrais de cogeração a gás natural no setor terciário do estado de São Paulo**.

São Paulo: Universidade de São Paulo, 2013.

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução nº235 de 14/11/06**.

Brasília: ANEEL, 2006. Disponível em <http://www.aneel.gov.br>.

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Banco de Informações de Geração**

Brasília: ANEEL, 2015. Disponível em <http://www.aneel.gov.br>.

Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **História**.

São Paulo: CCEE, 2015. Disponível em <http://www.ccee.org.br>.

CARLOS EDUARDO FREITAS VIAN; **Artigo – Qualidade de matéria prima**. 2015.

Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_138_22122006154842.html

CLAUDINEI ANDREOLI, **Artigo- Convergência de Agricultura e Energia: I.**

Produção de Biomassa Celulósica para Biocombustíveis e Eletricidade. 2008.

Disponível em:

http://ecen.com/eee66/eee66p/convergencia_de_agricultura_e_energia.htm#_ftn1

DANTAS, DJOLSE NASCIMENTO; **Uso da biomassa da cana-de-açúcar para geração de energia elétrica: análise energética, exergética e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista**. São Paulo:

Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

DOMINGUES JUNIOR, Silvio da Costa; **Estudo de tecnologias que proporcionam elevados índices de eficiência energética em motores a gás natural para aplicação em centrais de cogeração**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2013.

Empresa de Pesquisas Energéticas. **Leilão de Energia de Reserva negocia 2.379 MW de térmicas à biomassa.**

Rio de Janeiro: EPE, 2008. Disponível em <http://www.epe.gov.br>.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Desenvolvimento de plásticos biodegradáveis.** IPT, 2015. Disponível em <http://www.ipt.br>.

Instituto de Pesquisas Econômica Aplicada. **Brasil ocupa 3º lugar em número de projetos via MDL.** Brasília: IPEA, 2011. Disponível em <http://www.ipea.gov.br>.

JONAS LIASCH; **Artigo – Motores aeronáuticos movidos a etanol.** 2014.

Disponível em: <http://culturaaeronautica.blogspot.com.br/2014/09/motores-aeronauticos-movidos-etanol.html>

José Antônio Perrella Balestieri; **Livro Cogeração – geração combinada de eletricidade e calor.** Editora da UFSC, 2002. 279 p.

Marcos Fava Neves, Marco Antônio Conejero ; **Livro Estratégias para a Cana no Brasil.** Editora Atlas, 2009. 1ºEd. 312 p.

Ministério de Minas e Energia. **Matriz Energética Nacional 2030.**

Brasília: MME, 2007. Disponível em <http://www.mme.gov.br>.

Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2050.**

Brasília: MME, 2007. Disponível em <http://www.mme.gov.br>.

NAZATO; D.F.C. SILVA; S.C.U.FERRAZ; M.N.C. HARDER; **Moenda x Difusor: diferentes pontos de vista sobre o assunto.** São Paulo: Faculdade de Tecnologia de Piracicaba, 2011.

NOVA CANA; **Artigo - Como é feito o processamento da cana-de-açúcar nas**

usinas. 2015. Disponível em: <http://www.novacana.com/usina/como-e-feito-processamento-cana-de-acucar>

PITANGUEIRAS AÇÚCAR E ÁLCOOL; **Galeria de fotos.** 2015. Disponível em <http://correio.pitaa.com.br>

SANTOS, FERNANDO ALVES DOS; **Análise da aplicação da biomassa da cana como fonte de energia elétrica: usina de açúcar, etanol e bioeletricidade.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

Secretária de Energia do Estado de São Paulo, **Balanço Energético do Estado de São Paulo 2014**.

São Paulo, 2013. Disponível em <http://www.energia.sp.gov.br>.

SIMÕES-MOREIRA, JR.; ANDREOS, R; **Apostila do curso de especialização em energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética**. Apostila - ERG-003, 2014.

SIMÕES-MOREIRA; **Aplicações da Termodinâmica, Apostila do curso de especialização em energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética**, ERG-009, 2011.

União da Indústria de Cana de Açúcar. **Histórico de Produção e Moagem**. UNICA, 2015. Disponível em <http://www.unica.com.br>.

União dos produtores de Bioenergia. **A História da Cana-de-açúcar - Da Antiguidade aos Dias Atuais**. UDOP, 2015. Disponível em <http://www.udop.com.br>.

Vários Autores; **Livro Alternativas Energéticas para São Paulo – Cogeração a Bagaço de cana e incineração de resíduos sólidos**. Editora Assembleia Legislativa de São Paulo, 2007. 312 p.