

UNIVERSIDADE ANHANGUERA – UNIDERP  
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM PRODUÇÃO E  
GESTÃO AGROINDUSTRIAL

A COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM UMA  
UNIDADE SUCROENERGÉTICA DE MATO GROSSO DO  
SUL – PERSPECTIVAS E VIABILIDADE

José Paulo Leandro  
Engenheiro Eletricista

CAMPO GRANDE – MATO GROSSO DO SUL  
2014

UNIVERSIDADE ANHANGUERA – UNIDERP  
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM PRODUÇÃO E  
GESTÃO AGROINDUSTRIAL

A COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM UMA  
UNIDADE SUCROENERGÉTICA DE MATO GROSSO DO  
SUL – PERSPECTIVAS E VIABILIDADE

José Paulo Leandro

Orientador: Prof. Dr. Celso Correia de Souza

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em nível de Mestrado Profissional em Produção e Gestão Agroindustrial da Universidade Anhanguera – Uniderp, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Produção e Gestão Agroindustrial.

CAMPO GRANDE – MATO GROSSO DO SUL  
Fevereiro – 2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Anhanguera – Uniderp

L475c

Leandro, José Paulo.

A cogeração de energia elétrica em uma unidade sucroenergética de Mato Grosso do Sul – perspectivas e viabilidade. / José Paulo Leandro. -- Campo Grande, 2014.

47f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Anhanguera - Uniderp, 2014.

“Orientação: Prof. Dr. Celso Correia de Souza”

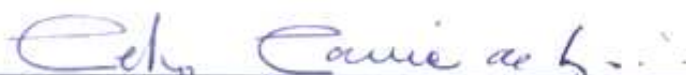
1. Energia elétrica – Mato Grosso do Sul 2. Cogeração de energia elétrica 3. Setor sucroalcooleiro I. Título.

CDD 21.ed. 621.31098171  
338.173610981

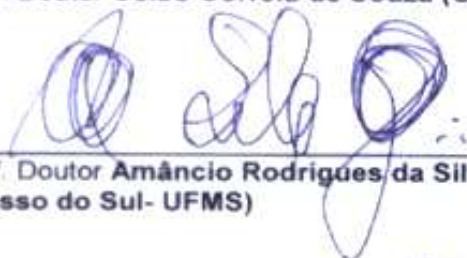
FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: **José Paulo Leandro**

Dissertação defendida e aprovada em 26 de fevereiro de 2014 pela Banca Examinadora:



Prof. Doutor **Celso Correia de Souza** (Orientador)



Prof. Doutor **Amâncio Rodrigues da Silva Junior** (Universidade Federal de Mato Grosso do Sul- UFMS)



Prof. Doutor. **Francisco de Assis Rolim Pereira** (Universidade Anhanguera - Uniderp)

## SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE QUADRO.....	vi
RESUMO GERAL.....	vii
ABSTRACT GERAL.....	viii
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	01
2. REVISÃO GERAL DE LITERATURA.....	03
2.1. A matriz energética brasileira.....	03
2.2. A geração da energia elétrica.....	05
2.3. Cenário do setor de energia elétrica no Brasil.....	06
2.3.1. A energia elétrica em Mato Grosso do Sul.....	07
2.4. Cogeração de energia elétrica.....	08
2.4.1. Sistemas de cogeração e suas aplicações.....	11
2.5. O setor sucroalcooleiro.....	15
2.5.1. A cogeração de energia elétrica no setor.....	17
2.5.2. O processo de cogeração de energia elétrica a partir do bagaço da cana de açúcar.....	18
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS.....	22
4. ARTIGO 1.....	25
RESUMO.....	25
ABSTRACT.....	26
4.1. Introdução.....	27
4.2. Material e Métodos.....	29
4.3. Resultados e Discussão.....	32
4.4. Conclusões.....	43
4.5. Referências Bibliográficas.....	44
APÊNDICE.....	46

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Participação de energia de fonte primária em percentual.....	04
Tabela 2. Produção de energia primária em 10.000 TEP – período de 2007 a 2012 – Brasil.....	15
Tabela 3. Capacidade de moagem da cana de açúcar e produção de seus derivados na safra 2011/2012 em relação às safras anteriores.....	16
Tabela 4. Valores levantados na pesquisa na Unidade de Santa Luzia (MS), 2013.....	33
Tabela 5. Valores médios resultantes dos leilões promovidos pela ANEEL – 2005 a 2013 - Biomassa.....	35
Tabela 6. Variação do custo do MWh por tempo de operação.....	36
Tabela 7. Custos de produção de energia elétrica no Brasil, em 2008.....	37
Tabela 8. Fluxo de caixa do cenário 1.....	39
Tabela 9. Fluxo de caixa do cenário 2.....	40

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1. Oferta interna de energia elétrica em 2012 em %.....	05
Figura 2. Conversão eletromagnética de energia. ....	06
Figura 3. Representação simplificada do sistema de transporte de energia elétrica no Brasil.....	07
Figura 4. Esquema de um sistema de cogeração.....	11
Figura 5. Sistema de turbina a vapor em contrapressão.....	13
Figura 6. Sistema de turbina a vapor em condensação.....	14
Figura 7. Produção de bioenergia em Mato Grosso do Sul em GWh.....	17
Figura 8. Processo de extração e obtenção do bagaço da cana-de-açúcar...	20
Figura 9. Processo de produção de vapor (energia térmica).....	21
Figura 10. Processo de produção de energia elétrica.....	21
Figura 11. Custo de produção do MWh por tempo de operação.....	36
Figura 12. Variação do VPL em relação à tarifa aplicada entre R\$ 130,00 e R\$ 230,00.....	41
Figura 13. Variação do VPL em relação à produção entre 35 a 65 MWh.....	41
Figura 14. Variação de tempo de retorno do investimento em relação à produção em MWh.....	42

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1. Composição da matriz energética do MS em 2013.....	08
--	----



## **A COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM UMA UNIDADE SUCROALCOOLEIRA DE MATO GROSSO DO SUL – PERSPECTIVAS E VIABILIDADE**

**RESUMO:** A preocupação com a questão da sustentabilidade na geração de energia elétrica tem tornado a biomassa como uma das principais fontes energéticas no cenário nacional, hoje ocupando a segunda posição na matriz energética nacional, ficando atrás somente da hidroeletricidade. Das fontes renováveis por biomassa, a cana de açúcar se destaca devido ao grande crescimento da produção de cana no cenário nacional visando a produção de etanol, inclusive, no estado do Mato Grosso do Sul. Este trabalho foi realizado em uma usina sucroalcooleira localizada no município de Nova Alvorada do Sul (MS), e teve como objetivo discutir a viabilidade econômica da cogeração de energia elétrica com a utilização de bagaço da cana de açúcar, para venda de excedentes de energia elétrica para as concessionárias através do Sistema Interligado Nacional (SIN). Os resultados encontrados mostraram que o custo para a produção de 1MWh é de R\$ 97,06, sendo competitivo frente as outras centrais de pequeno porte, tornando-se uma excelente alternativa tanto para a complementaridade financeira da empresa, bem como para o país na produção de energia elétrica, além das vantagens ambientais e socioeconômicas. A viabilidade da cogeração de energia elétrica através do bagaço de cana, resultante deste estudo, indicou que a venda de energia elétrica excedente é viável para a empresa a partir do montante de 40MWh, com um *payback* de 6 anos para o início de retorno dos investimentos realizados em caldeiras e turbogeradores, considerando uma taxa de juros de 8% ao ano, 20 anos de amortização e funcionamento anual da planta de pelo menos 6.240 horas.

**Palavras-Chave:** Cana de açúcar; bagaço de cana; cogeração de energia, sustentabilidade.

## **ELECTRICAL POWER COGENERATION IN AN SUGAR AND ETHANOL PLANT OF MATO GROSSO DO SUL – PERSPECTIVES AND FEASIBILITY**

**ABSTRACT:** The concerns with sustainable energy generation has made the biomass one of the main energy sources in Brazil. The biomass is ranked as the second most used energy source in the Brazilian energy matrix, only behind the hydraulic energy. Sugar cane is an important renewable biomass energy source due to the large development of its production targeting the ethanol industry. This large development takes place in several parts of Brazil, including the state of Mato Grosso do Sul. This thesis presents work carried out in a sugar and ethanol plant located in Mato Grosso do Sul, more precisely in the city of Nova Alvorada do Sul. The goal of this work was to investigate the economic feasibility of generating energy with sugar cane bagasse for the National Interconnect System (*Sistema Interligado Nacional - SIN*) companies. Results have shown that the cost of producing 1 MWh is around \$ 40 USD (\$ 97.06 BRL). This cost can be considered competitive as compared to other small plant alternatives. Because of that the sugar cane bagasse can be considered an excellent alternative for completeness of the financial model of the plant, as well as of the national energy production. Besides the financial virtues there are also environmental and social benefits in exploring the energy generation from sugar cane bagasse. In this work it was also concluded that the excess electrical energy can be used in a viable business model for amounts of 40 MWh and above, with a return of investment (ROI) of 6 years. The investment is necessary to fund mainly the purchase and installation of boilers and generators. The assumptions used for the ROI calculation were an interest rate of 8 % p.a., amortization over 20 years, and operation of the plant of at least 6,240 hours per year.

**Keywords:** Sugarcane; bagasse; cogeneration of energy, sustainability.

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O setor energético brasileiro tem uma grande participação em sua composição de energia proveniente de fontes renováveis que chega a 45,3%. A maior parte deste percentual é proveniente de recursos hídricos cabendo, também, destaque importante à produção com biomassa e etanol e energias eólica e solar.

Segundo dados divulgados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2013), estão previsto grandes investimentos para o setor dentro do Programa Nacional de Aceleração do Crescimento (PAC) que irão proporcionar o aumento na dimensão do sistema de geração bem como no desenvolvimento regional e nacional.

O setor sucroalcooleiro ocupa uma posição de destaque na produção brasileira. As formas de energia que produz são competitivas e com perspectivas de aumentar a produtividade da cana e na cadeia de transformações energéticas (HOLLANDA, 2013).

A cogeração, através da biomassa do bagaço de cana de açúcar, já não é nenhuma novidade. A queima do bagaço em fornalhas de caldeiras de vapor é largamente praticada pelas usinas para suprir o consumo próprio de energia térmica e elétrica na indústria, proporcionando o privilégio da auto suficiência, condições essas inexistentes na maioria das atividades industriais (PELLEGRINI, 2002).

O setor que já ocupa a segunda posição na matriz energética renovável no Brasil (EPE 2013), pode contribuir ainda mais na comercialização de excedentes (quantidade de energia elétrica produzida acima de sua necessidade de consumo interno) através da expansão dos seus sistemas de cogeração, devendo para isso, utilizar tecnologias mais avançadas que favoreçam o melhor aproveitamento do combustível (BALEOTTI, 2008).

Essa venda de excedentes de energia elétrica tem sido percebida como um negócio lucrativo pelos empresários do setor, com prazos de retorno do investimento relativamente baixos, impactos ambientais insignificantes e algumas vantagens regulatórias em relação às fontes convencionais.

A cogeração de energia elétrica é apontada como saída para aumentar a competitividade do setor sucroenergético e viabilizar a retomada dos

investimentos na construção de novas plantas e a ampliação de destilarias de etanol, que estão suspensos desde a crise financeira de 2008 (FIGLIOLINO, 2013).

Este fato tem ganhado força com as novas regulamentações para o setor energético, como a resolução 482 de 17/04/2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que regulamentou a comercialização e distribuição do excedente da produção de energia elétrica através do Sistema Interligado Nacional (SIN) que integra as operadoras das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da Região Norte. Essas ações contribuem para aumentar a viabilidade de vender a produção excedente para as concessionárias locais, priorizando o atendimento das pequenas localidades, reduzindo o custo de transmissão e gerando riquezas.

O Estado de Mato Grosso do Sul está entre os maiores produtores de etanol e açúcar do país, contando com vasta área agrícola favorável ao plantio da cana de açúcar. No Estado, vinte e duas usinas estão em pleno funcionamento sendo que apenas nove delas disponibilizam excedentes de energia elétrica na rede para comercialização (BIOSUL, 2013).

O objetivo deste trabalho foi analisar as perspectivas do setor sucroalcooleiro e a viabilidade econômica na produção de energia elétrica a partir do bagaço da cana de açúcar no Estado de Mato Grosso do Sul.

## **2. REVISÃO GERAL DE LITERATURA**

### **2.1. A matriz energética brasileira**

Entende-se como matriz energética a oferta total de energia disponível a partir dos recursos naturais primários ou de suas transformações em recursos energéticos secundários que atendam as diferentes formas de consumo. (REIS, 2011).

A oferta da energia depende de vários fatores como recursos disponíveis para transformação (conversão de energia primária e/ou secundária em uma ou mais fontes de energia secundária inclusive as correspondentes perdas na transmissão), estratégia de implementação e gerenciamento dos estoques disponíveis bem como as diferentes trocas com outros atores do cenário energético.

Entende-se por energia primária toda a oferta de produtos providos pela natureza e que podem ser utilizados para a produção de energia como o petróleo, gás natural, carvão mineral, bagaço da cana de açúcar, resíduos animais, energia eólica e solar dentre outras. A energia secundária é todo resultado da transformação dos recursos primários que são destinados a diversos setores da economia como gasolina, óleo diesel, óleo combustível, álcool anidro e hidratado etc. (REIS, 2011).

A quantidade de energia ofertada para transformação e/ou consumo final, não deve levar somente em consideração os recursos internos, mas também, as importações e os aspectos reguladores de estoques de acordo com a estratégia energética de um país (REIS, 2011).

Segundo Tolmasquim *et al.* (2007), as pesquisas conduzidas pelo Empresa de Pesquisa Energética (EPE), apontam um forte crescimento na demanda de nos próximos 25 anos. Ressalta ainda que esse crescimento além de sustentável (maior oferta de energia primária proveniente das fontes renováveis) será puxado pelo crescimento da renda per capita e melhor distribuição da renda.

A oferta de energia é composta pela produção primária e pela produção secundária de energia. Para que se possa entender essa composição torna-se importante o conceito de cadeia energética que se define como toda a

atividade necessária à produção, transformação e transporte da energia provida até os centros consumidores. São partes da cadeia energética a produção da energia primária e a energia secundária (REIS, 2011).

Segundo o Balanço Energético Nacional (2013), publicado pela EPE do Ministério de Minas e Energia, a composição da matriz está dividida em dois segmentos: a energia proveniente de fontes não renováveis (petróleo, gás natural, carvão e urânio  $U_{308}$ ) e; a proveniente das fontes renováveis (energia hidráulica, lenha, produtos da cana, energia eólica entre outros).

A participação na matriz energética brasileira por fonte primária no Brasil vem apresentando alterações em sua composição com o avanço da produção proveniente das fontes renováveis destacando-se a produção a partir da cana de açúcar. Os produtos da cana já ocupam uma posição de destaque na matriz energética devido a produção de álcool anidro e hidratado bem como da energia elétrica produzida a partir do bagaço da cana de açúcar (EPE, 2013).

A Tabela 1 mostra a produção de energia primária por fonte em percentual. Importante ressaltar que incluiu toda energia inclusive eletricidade.

Tabela 1. Participação de energia de fonte primária em percentual.

<b>FONTES</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>
Não renováveis	52,7	52,6	54,3	54,0
Petróleo	42,0	42,1	42,5	41,6
Gás natural	8,8	9,0	9,3	9,9
Carvão	1,3	0,8	0,8	1,0
Urânio	0,7	0,7	1,6	1,5
Renováveis	47,3	47,4	45,7	46,0
Energia hidráulica	14,5	13,7	14,4	13,9
Lenha	14,2	10,3	10,1	10,0
Produtos da cana	15,5	19,3	16,9	17,5
Outras renováveis	3,2	4,1	4,4	4,6

FONTE: Adaptado de EPE (2013).

Em relação somente à produção de eletricidade para o consumo final, esta apresentou em 2012 um acréscimo de 3,9% em relação a 2011, atingindo 552,5TWh sendo que 85,9% foram gerados em centrais de serviço público e o restante provido pela autoprodução conforme divulgado pelo Balanço Energético Nacional (BEN) (EPE, 2013).

Na composição da produção interna de eletricidade em centrais de serviço público destaca-se a geração hidráulica que representa 76,9% da produção total conforme se pode observar na Figura 1.

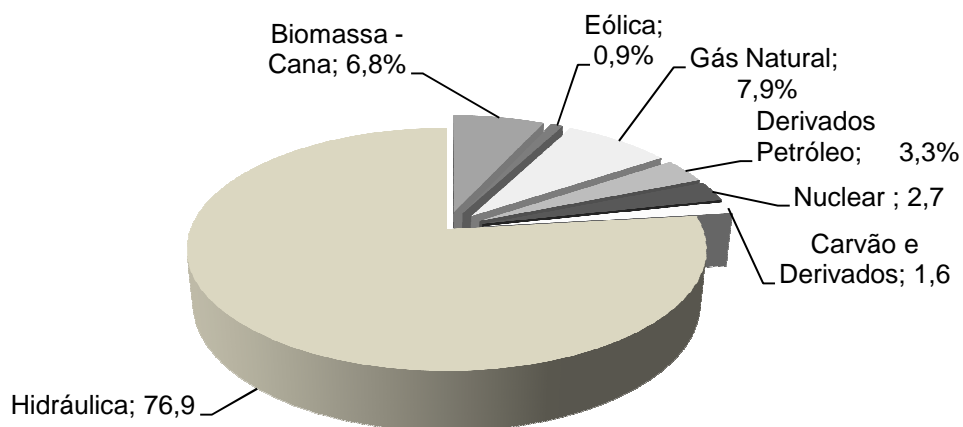


Figura 1. Oferta interna de energia elétrica em 2012, em percentagem (FONTE: Adaptado EPE, 2013).

Em relação ao consumo de energia elétrica, o setor industrial apresentou, em 2012, leve crescimento de 0,3% em relação ao ano anterior e o setor residencial de 2,10% no mesmo período.

A participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira manteve-se entre as mais elevadas do mundo com 44,1% em 2012, enquanto que a taxa mundial alcançou 13,2% em 2010 (EPE, 2013).

## 2.2. A geração da energia elétrica

A energia elétrica pode ser descrita como o resultado de um processo de utilização das propriedades físico-químicas e eletromagnéticas da matéria que devidamente processadas por equipamentos próprios produzem como resultado uma corrente elétrica e um diferencial de tensão nominal. A corrente elétrica é composta de elétrons que se deslocam pelo efeito de uma diferença de potencial. A diferença de potencial é formada através de um campo eletromagnético que faz com que se produza trabalho fazendo com que os elétrons se desloquem (GUSSOW, 2009).

As formas de se produzir energia elétrica podem ser através da transformação de trabalho mecânico como o uso de recursos hídricos, por agentes térmicos produzidos através de uso de combustível fóssil ou através de recursos renováveis como a biomassa. Segundo Toro (1994), a conversão de energia elétrica envolve a troca de energia entre um sistema elétrico e um sistema mecânico, através de um campo magnético de acoplamento conforme mostrado na Figura 2. Os equipamentos (máquinas) que realizam essa função são conhecidos como geradores ou alternadores.

A produção de energia elétrica praticamente é realizada através dessas máquinas que são acopladas ao sistema produtivo através da combustão (motores a combustão) ou geração de vapor (turbinas a vapor). O sistema mecânico ao ser acionado movimenta o rotor de um gerador que através de uma excitação de campo gerando uma diferença de potencial.

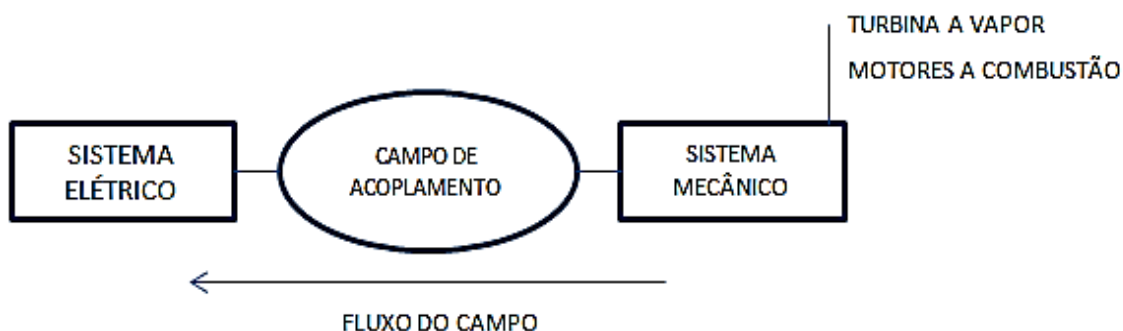


Figura 2. Conversão eletromecânica de energia (FONTE: Adaptado de TORO, 1994, p.108).

### 2.3. Cenário do setor de energia elétrica no Brasil

No Brasil o transporte da produção de eletricidade, tanto das empresas públicas ou de autoprodução são realizadas através de uma rede controlada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). A sua atribuição é o de realizar planejamentos da operação da rede de transmissão, permitir o acesso de novos produtores à rede, controlar e divulgar os dados de produção de eletricidade, consumo, níveis de armazenamento nos reservatórios e afluência às usinas produtoras. Exerce papel fundamental nas ampliações e correções nos sistemas de transmissão preservando o desempenho da rede e a segurança do sistema. Também possibilita o livre acesso aos agentes



conectados à Rede Básica que forma o Sistema Interligado Nacional (SIN) (ONS, 2013).

O SIN é uma rede de transmissão (Figura 3), formada pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. É um sistema hidrotérmico de grande porte com predominância de usinas hidroelétricas de múltiplos proprietários. Apenas 3,4% da produção de eletricidade do país encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados na Amazônia (ONS, 2013).

É através do SIN que as usinas, inclusive, de autoprodutores, entregam a sua capacidade de produção que são posteriormente entregues aos centros consumidores conforme a representação simplificada mostrada na Figura 3.

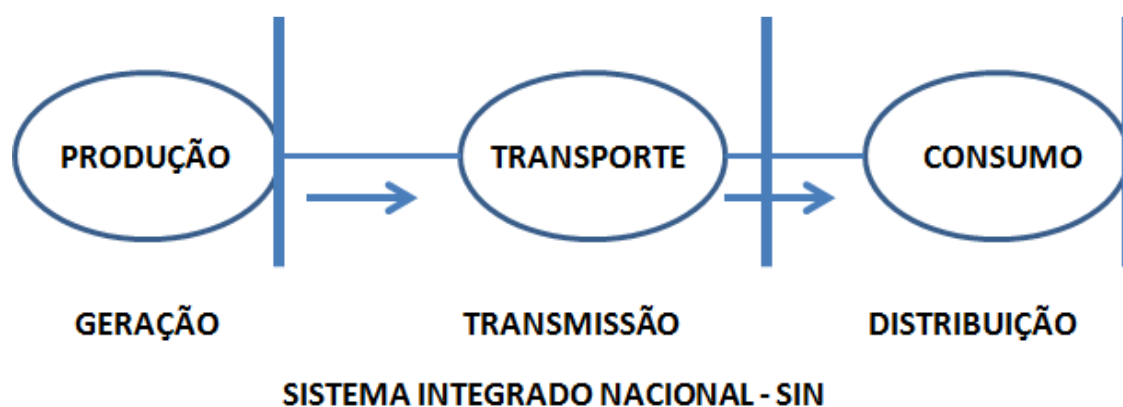


Figura 3. Representação simplificada do sistema de transporte de energia elétrica no Brasil (FONTE: Adaptado de Xavier, 1998).

### 2.3.1. A energia elétrica em Mato Grosso do Sul

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2013), no estado do Mato Grosso do Sul o sistema de suprimento de energia é efetuado pela rede básica constituindo de um sistema de 230 kV de propriedade da ELETROSUL e da Porto Primavera Transmissora (PPTA) contando também com os demais sistemas de transmissão de propriedade da ELETROSUL.

O estado de Mato Grosso do Sul possui uma área de 358 mil Km<sup>2</sup> atendida em grande parte pela concessionária de distribuição ENERSUL e minoritariamente (8%) pela ELEKTRO. A potência instalada é da ordem de 8.781 MW, considerando as centrais localizadas nas fronteiras com os Estados

de Mato Grosso e São Paulo, com a predominância de fontes hidráulicas (80,0%) (EPE, 2013).

A composição da matriz energética do Estado do Mato Grosso do Sul é apresentada no Quadro 1, cuja geração é proveniente de:

- 15 centrais geradoras hidrelétricas (CGH), centrais cuja capacidade instalada é de até 1 MW;
- 10 pequenas centrais hidrelétricas (PCH), centrais cuja capacidade instalada é maior que 1MW e no máximo de 30 MWh, com reservatórios de até 3km<sup>2</sup>;
- 6 centrais hidrelétricas de grande porte (UHE);
- 8 Centrais geradoras solar fotovoltaicas (UFV);
- 36 centrais termelétricas (UTE), centrais que produzem energia elétrica através de vapor ou calor (biomassa, gás natural, óleo combustível, etc.).

Quadro 1. Composição da matriz energética do MS em 2013.

<b>Tipo por tecnologia</b>	<b>Quantidade (un.)</b>	<b>Potência (KW)</b>	<b>(%)</b>
CGH	15	5.959	0,07
PCH	11	215.328	2,45
UHE	6	6.788.800	77,30
UFV	8	27	0,00
UTE	36	1.771.805	20,18
<b>Total</b>	<b>61</b>	<b>8.347.695</b>	<b>100,00</b>

Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica 2022 do Ministério de Minas e Energia, a carga do estado representa cerca de 6% do total da região com um crescimento médio de 3,3% ao ano no período decenal.

#### **2.4. Cogeração de energia elétrica**

A cogeração de energia elétrica é o resultado da produção resultante de duas ou mais fontes - calor de processo e potência mecânica ou elétrica, através de energia disponibilizada por uma fonte primária.

Segundo Clementino (2001) a cogeração de energia permite através de um mesmo elemento energético a obtenção conjunta de energia elétrica, vapor

ou energia mecânica e calor. Justifica a importância da cogeração como um sistema eficiente na utilização de energia renovável e já que pode contribuir para a diminuição do efeito estufa e suas consequências.

Em um “processo industrial de produção, na condição em que há demanda simultânea das utilidades de energia térmica e eletromecânica, a aplicação da cogeração se apresenta como provável alternativa, com a vantagem do uso racional de combustível” BARJA (2006, p.5).

A cogeração já era praticada antes dos anos de 1880 quando o vapor já era considerado fonte primária utilizada nas indústrias e posteriormente no início do século XX para gerarem a sua própria eletricidade através de caldeiras a carvão e turbinas a vapor. Muitas dessas plantas utilizavam o vapor de escape em processos industriais (PALOMINO, 2004).

No Brasil a cogeração já é feita há quase duas décadas, dentro da atividade de autoprodução. A maioria das instalações encontra-se dentro do parque fabril muitas vezes ligada diretamente aos processos industriais (CLEMENTINO, 2001).

Ainda, de acordo com o autor, as principais atividades associadas a cogeração no Brasil são:

- Agricultura: empresas que utilizam de resíduos agrícolas como o bagaço da cana de açúcar e outros;
- Papel: indústrias de papel e celulose que utilizam os resíduos de madeira, lixívia e licor negro;
- Petroquímica: refinarias e polos petroquímicos;
- Química: indústrias químicas;
- Siderurgia: siderúrgicas que utilizam os gases de alto-forno;
- Outros: empreendimentos ligados a hotéis, *Shopping Centers*, bancos e outros estabelecimentos comerciais ou pequenas indústrias.

De acordo com a Associação da Indústria de Cogeração de Energia (COGEN, 2013), as oportunidades criadas nas últimas décadas com a evolução tecnológica e o crescimento do mercado de equipamentos para a geração distribuída tem propiciado o desenvolvimento de pesquisas e investimentos no setor fazendo com que novas implantações de cogeração surgissem ao longo do tempo. São exemplos:

- Motores a combustão (ciclo Otto ou Diesel);
- Caldeiras que produzem vapor para as turbinas a vapor;

- Turbinas a gás natural;
- Caldeiras de recuperação e trocadores de calor;
- Geradores elétricos, transformadores e equipamentos elétricos associados;
- Sistemas de *chillers* de absorção, que utilizam calor (vapor ou água quente para produção de frio (ar condicionado));
- Sistemas de ciclo combinado (turbina de vapor e gás natural) numa mesma central;
- Outros.

No Brasil o sistema de cogeração vem crescendo devido ao seu grande potencial agrícola e ao desenvolvimento e aplicações de novas tecnologias como o biogás e a biomassa. Segundo Goldenberg e Moreira (2005), a utilização dos sistemas de cogeração no Brasil é decorrente da rápida industrialização e experiência histórica com aplicações industriais da energia da biomassa em grande escala.

O sistema de cogeração apresenta a vantagem de possibilitar a produção de energia elétrica dentro do mesmo centro de consumo de forma racional e eficiente. Seus muitos benefícios em relação as formas convencionais de produção de energia são destacados por diversos autores. Em seu trabalho “Cogeração: Uma Abordagem Socioeconômica” Ferrão e Weber (2001) afirmam que uma das vantagens é o fato “de poder utilizar a biomassa como fonte de energia, tornando o sistema uma fonte renovável de energia, e fazendo com que se quebre aos poucos a dependência que o setor energético mundial possui em relação aos combustíveis fósseis.”

Segundo a Associação das Indústrias de Cogeração (COGEN, 2013), as principais vantagens da cogeração podem ser avaliadas pelos seguintes fatores:

- Menor custo de energia (elétrica e térmica);
- Maior confiabilidade de fornecimento de energia;
- Melhor qualidade de energia produzida;
- Menores custos de transmissão e de distribuição de eletricidade;
- Maior eficiência energética;
- Menor emissão de poluentes (vantagens ambientais);

- Criação de novas oportunidades de trabalho e negócios.

Considerando ainda as vantagens que o sistema de cogeração apresenta como forma alternativa e sustentável, pode também destacar as excelentes oportunidades para a aplicação no setor terciário, de modo a fortalecer a geração descentralizada no cenário energético nacional (SILVEIRA, 1994)

#### 2.4.1. Sistemas de cogeração e suas aplicações

Como já citado anteriormente a cogeração é um processo de transformação em duas ou mais fontes de energia pelo uso de um mesmo combustível (fonte primária). Em linhas gerais, é um processo no qual uma mesma fonte de energia primária gera energia transformada, que alimenta máquinas térmicas pela reação da combustão, em energia mecânica de eixo pela geração de vapor, a qual é convertida em energia elétrica através de turbinas e geradores associados e energia térmica (vapor e calor) para serem utilizadas nos processos (VELASQUEZ, 2013).

A Figura 4 apresenta o esquema de um sistema de cogeração de energia elétrica.

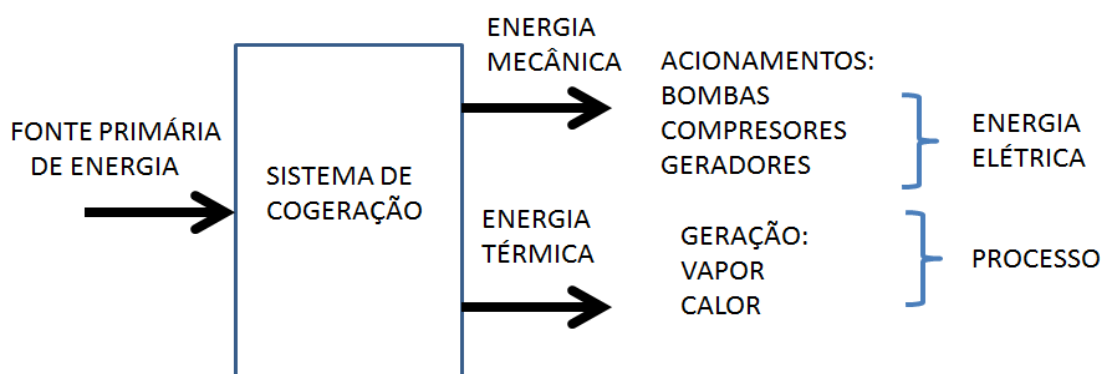


Figura 4. Esquema de um sistema de cogeração (FONTE: Adaptado de Paladino, 2004).

Nos sistemas de cogeração o aproveitamento de energia do combustível empregado (fonte primária de energia) para a geração de energia elétrica e calor de processo chega a 84% enquanto nos sistemas tradicionais apenas 33% são convertidos em energia elétrica (PALOMINO, 2004).

Na cogeração existem diversas combinações de equipamentos que podem se adotados. Algumas alternativas são as turbinas a vapor acopladas à caldeiras convencionais até outros mais complexos, como gaseificadores em conjunto com turbinas a gás (CLEMENTINO, 2001).

Ainda de acordo com o autor, os sistemas de cogeração podem ser classificados de acordo com a ordem de produção de eletricidade e energia térmica:

- Ciclos superiores – Topping Cycles;
- Ciclos inferiores – Bottoming Cycles.

O sistema *topping cycles* são os mais comuns, ocorrem quando um determinado combustível é diretamente utilizado para a geração de energia elétrica no primeiro passo. A partir da queima do combustível é obtido um fluido – vapor, que é utilizado para gerar energia elétrica. O calor residual é utilizado para processos de aquecimentos ou resfriamentos. É a tecnologia mais empregada na maioria das indústrias, considerando-se que grande parte dos processos industriais demanda calor a baixas temperaturas (BARJA, 2006).

Nos ciclos inferiores do *bottoming cycles* ocorre o inverso, ou seja a energia gerada pela queima do combustível é utilizado primeiro nos processos e o residual para energia elétrica.

Outra classificação para os sistemas de cogeração é quanto aos equipamentos utilizados para a produção de energia elétrica:

- Turbina a vapor;
- Turbina a gás;
- Ciclo combinado;
- Motor alternativo.

O sistema comumente utilizado na cogeração no setor sucroalcooleiro, objeto do presente trabalho, utiliza-se da turbina a vapor em contrapressão e condensação, operando em ciclo *Rankine* (ciclo de produção de vapor com combustão externa ao fluido de trabalho). Nesse sistema a energia mecânica é obtida através da turbina por meio de alta pressão, gerado em uma caldeira convencional (BARJA, 2006). A vantagem de se utilizar esse sistema é de poder se utilizar de qualquer tipo de combustível, sólido, líquido ou gasoso para a combustão. Como exemplo pode-se citar o bagaço de cana, lixo, diesel, gás

natural (PALOMINO, 2004). As turbinas a vapor são classificadas como de contrapressão e de condensação.

Nas turbinas a vapor de contrapressão (Figura 4), o vapor que sai da turbina é encaminhado diretamente ao processo (gerador) para a produção de eletricidade, e o vapor de escape utilizado nos demais processos de produção. Neste sistema não há a presença do condensador, sendo possível extrair vapor de estágios intermediários da turbina dependendo da necessidade de uma pressão apropriada para a carga térmica (PALOMINO, 2004).

Nas turbinas de condensação (Figura 5), uma parte do vapor (alta pressão) pode ser extraída em vários pontos da turbina. A produção de vapor é utilizada diretamente nos processos de produção sendo o vapor de escape utilizado nos geradores. Assim, obtêm-se vapor a diversas pressões para processos, enquanto o resto do vapor expande-se até a saída do condensador (PALOMINO, 2004). O vapor de processo condensado é tratado e reutilizado como líquido de processo.

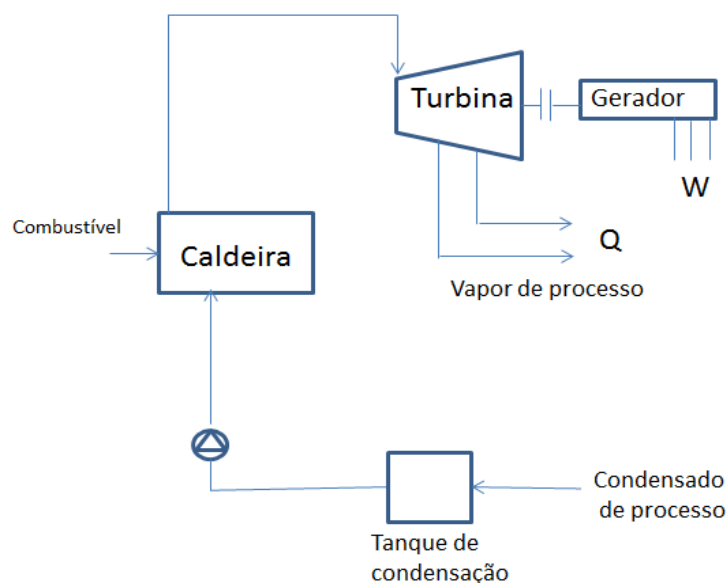


Figura 5. Sistema de turbina a vapor em contrapressão (FONTE: Adaptado de Clementino, 2001).

A Figura 6 apresenta o sistema de turbina a vapor de condensação.

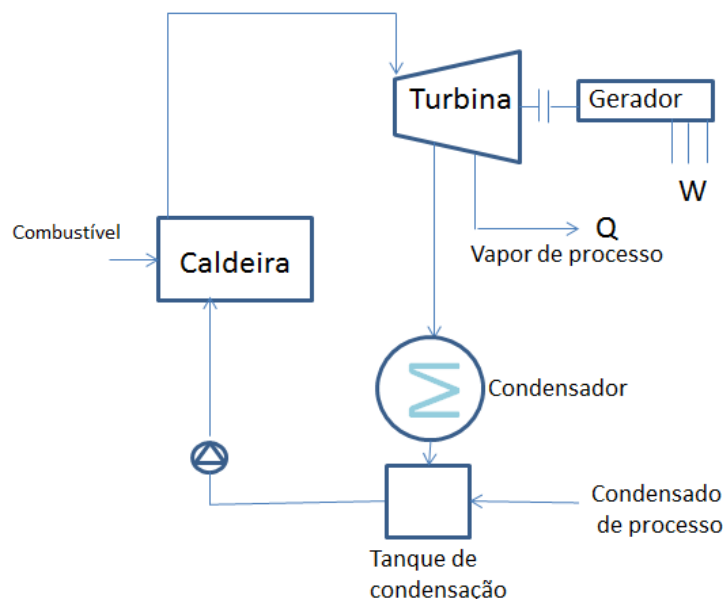


Figura 6. Sistema de turbina a vapor de condensação (FONTE: Adaptado de Clementino, 2001).

Segundo Clementino (2001), o setor sucroalcooleiro é o que apresenta maiores potenciais para cogeração em função da quantidade expressiva de vapor a baixa pressão consumida nos processos de aquecimento, evaporação e destilação, aliada à necessidade de trabalho nos setores de moagem e geração elétrica, fornecido por turbinas de contrapressão.

A turbina a gás é uma máquina composta de uma câmara de combustão e um compressor que, apesar do nome pode usar tipos alternativos de combustíveis. No sistema o combustível é queimado na câmara de combustão e os gases introduzidos na turbina para converterem-se em energia mecânica resultado este que acoplado a um gerador poderá gerar energia elétrica (PALOMINO, 2004).

Segundo Prieto (2003), a evolução tecnológica de seus componentes e a disponibilidade do gás natural tem favorecido a implementação de sistemas de cogeração com turbinas a gás.

A cogeração com ciclo combinado utiliza-se de turbina a vapor e turbina a gás. Nesse tipo de sistema a turbina a vapor é utilizada para produzir o vapor a alta pressão que, através de uma caldeira de recuperação são encaminhados a uma turbina a vapor fazendo com que o rendimento elétrico supere os 60%, contra os 35%, caso tivessem trabalhando separadamente (BARJA, 2006).



Ainda segundo o autor, a cogeração com motores alternativos utilizam-se de motores a combustão interna cuja potência pode variar de alguns quilowatts até 100MW. A sua aplicação é em sistemas de pequeno porte como hospitais, hotéis, condomínios, etc.

## 2.5. O setor sucroalcooleiro

O setor sucroenergético no Brasil vem ganhando destaque no cenário mundial, alcançando a primeira posição mundial como produtor de açúcar o segundo maior produtor de etanol segundo dados divulgados pela União das Indústrias de Cana-de-Açúcar (UNICA, 2013).

A produção de cana de açúcar em 2012 alcançou 593,6 milhões de toneladas, 4,9% superior ao registrado em 2011 onde foi registrado a produção de 565,8 milhões de toneladas (EPE, 2013). Em relação à produção de energia primária à partir dos produtos da cana de açúcar, foi registrado em 2012 um aumento de 4,3% em relação ao período anterior. A Tabela 2 mostra a evolução de produção em TEP (toneladas equivalentes em petróleo) do período de 2007 a 2012.

Tabela 2. Produção de energia primária em 10.000 TEP – período de 2007 a 2012 – Brasil.

Fonte/ano	2007	2008	2009	2010	2011	2012
	Toneladas equivalentes em petróleo (TEP)					
Renováveis	108.947	114.553	112.46	119.973	117.322	118.31
Produtos da Cana de Açúcar	40.458	45.019	44.775	48.852	43.27	45.132

FONTE: (EPE, 2013).

A energia gerada através do processamento da cana de açúcar é consumida em diversos setores da economia como indústrias, transportes, residências e agricultura. Em relação à produção de energia elétrica gerada a partir do bagaço da cana de açúcar (resíduo do processo) em 2012 atingiu aproximadamente 1.400MW distribuídos através do Sistema Integrado Nacional (SIN), o que representa um crescimento médio de 20% em relação a 2011. Essa geração fornecida à rede representaria uma economia de 6% da

água dos reservatórios da Região Sudeste e Centro-Oeste nos períodos de estiagem.

O Estado de Mato Grosso do Sul ocupa hoje a quinta posição entre os estados produtores de açúcar e etanol no país pelo seu alto potencial agrícola principalmente em relação a cana de açúcar. Em relação a bioeletricidade o Estado produziu 1.292 GWh na safra 2012/2013, energia 17% superior em relação a safra anterior, segundo dados divulgados pela Associação de Produtores de Bioenergia de Mato Grosso do Sul (BIOSUL, 2013). O Estado conta com 22 usinas instaladas, sendo que nove delas são responsáveis por produção de energia elétrica disponibilizada na rede do SIN para comercialização sendo que nas demais a energia produzida é consumida localmente nos processos de produção de açúcar e álcool (BIOSUL, 2013).

A capacidade de moagem da cana de açúcar e a produção de seus derivados, em Mato Grosso do Sul, está demonstrado na Tabela 3. Em relação à bioenergia, alcançou em 2012, 1.300 GWh representando um crescimento de 18,8% em relação à safra anterior.

Tabela 3. Capacidade de moagem da cana de açúcar e produção de seus derivados na safra 2011/2012 em relação às safras anteriores.

<b>Período</b>	<b>Cana de açúcar (mil toneladas)</b>	<b>Açúcar (mil toneladas)</b>	<b>Etanol (mil litros)</b>	<b>Bioenergia (GWh)</b>
2009/2010	23.100	746	1.262	660
2010/2011	33.500	1.326	1.848	1.100
2011/2012	33.860	1.588	1.620	1.300

FONTE: BIOSUL (2013).

A Figura 7 apresenta a evolução da produção, em GWh, no período de 2009/2010 à 2012/2013.

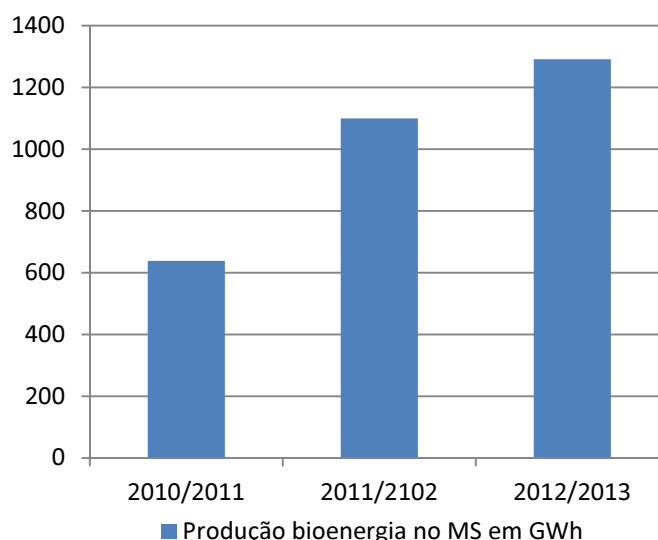


Figura 7. Produção de bioenergia em Mato Grosso do Sul em GWh (FONTE: BIOSUL, 2013).

### 2.5.1. A cogeração de energia elétrica no setor

O setor sucroalcooleiro pelo seu potencial energético tem despertado o interesse de muitos pesquisadores sendo vastas as publicações de trabalhos nessa área.

O setor que é auto-suficiente na produção de energia elétrica, aponta também como importante exportador utilizando-se de sua capacidade excedente. Segundo Souza (2013), a usina sucroalcooleira de São Francisco (SP) foi a pioneira em venda de energia elétrica gerada através do bagaço da cana de açúcar entregues em redes da então Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL).

Os resultados promissores no Estado de São Paulo incentivou o Ministério de Minas e Energia a procurar soluções de fomento para o setor, tanto que em 25 de março de 2001 o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) lançou a Operação Programa para Empreendimentos à Cogeração de Energia Elétrica a partir de Resíduos de Cana de açúcar, destinado a financiamento para novos empreendimentos no setor.

Segundo Ramos *et al.* (2003), apesar dos incentivos governamentais para o setor, a produção de energia elétrica para a venda às concessionárias ainda é incipiente, devendo ter uma expansão forte nos próximos anos. O autor

ainda afirma que existem tecnologia e um grande espaço para o aumento da eficiência desses sistemas (cogeração) voltada para venda de excedentes aumentando assim a contribuição do setor na matriz energética brasileira.

Segundo publicação da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo o bagaço da cana de açúcar é estratégico para a produção de eletricidade, diminuindo o risco de racionamento de energia devido aos baixos níveis dos reservatórios das hidrelétricas. Ressalta ainda que como a produção de energia elétrica no setor se dá basicamente no período de safra (abril a dezembro), há estudos por parte dos órgãos ligados ao setor de estender a produção no período de entressafra o que deverá ser apresentado ao Governo Federal.

Outro fato importante a se considerar é que o setor ainda necessitava de uma resolução para por fim nas questões relativas a interligações, pontos de acesso, ao Sistema Integrado Nacional e o sistema de compensação de energia, o que ocorreu com a Resolução 482 de 17/04/2012 e que dispõe:

Estabelece as condições gerais para o acesso produtores de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências (ANEEL, 2012).

A regulamentação no setor irá incentivar o crescimento de unidades produtoras tornando o setor importante gerador de energia confirmando as previsões da Associação da Indústria de Cogeração de Energia (COGEN).

### **2.5.2. O processo de cogeração de energia elétrica a partir do bagaço da cana de açúcar**

A cogeração de energia elétrica pelas usinas sucroenergéticas é realizada utilizando-se da geração de vapor a alta pressão a partir da queima do bagaço da cana de açúcar em caldeiras associados a produção do etanol e/ou açúcar. As usinas para produzirem o etanol e o açúcar necessitam da geração de vapor (energia térmica), pois o utilizam em processos como a geração de energia mecânica nas moendas, aquecimento e resfriamento do caldo e outros processos. O vapor também movimenta os turbogeradores que transformam energia cinética em eletricidade mantendo a autossuficiência do consumo de energia elétrica em todo o parque fabril.

Segundo Meneguetti *et al.* (2013), o processo completo de produção de uma usina sucroalcooleira pode ser dividido nas seguintes etapas:

- Recepção Recebimento da cana;
- Limpeza da cana;
- Preparo para moagem ou difusão;
- Extração do caldo;
- Produção de energia elétrica (inclusão pelo autor);
- Tratamento do caldo;
- Destilação.

A fase da produção de energia elétrica inicia logo após os processos de moagem e retirada do caldo com a queima do bagaço nas caldeiras. Na primeira fase do processo a cana é pesada e estocada podendo ser descarregada diretamente nas mesas alimentadoras da moenda. A limpeza da cana se dá para retirada de impurezas como ponteiros, folhas, raízes bem como terra proveniente da colheita. A cana é lavada e encaminhada para a fase de moagem (MENEGUETTI *et al.*, 2013).

Nessa fase a cana é picada para romper ao máximo as fibras para um maior aproveitamento do caldo. A lavagem é conduzida através de esteiras rolantes para um conjunto de facas niveladores seguido do picador, do desfibrador e do eletroímã. A função do desfibrador e do picador é para aumentar a densidade, aumentando a capacidade de moagem. O eletroímã visa tirar possíveis materiais ferrosos que podem causar danos à moenda (MENEGUETTI *et al.*, 2013).

Na próxima fase do processo – extração do caldo, a cana é conduzida para serem prensadas em moendas consecutivas com o caldo armazenado em um tanque para tratamento e retirada das impurezas. Segundo Meneguetti *et al.* (2013) a extração por moagem, é obtida por pressão mecânica dos rolos da moenda sobre o colchão de cana desfibrada e adição de água. A este processo dá-se o nome de embebição, cuja função é melhorar o aproveitamento do teor de sacarose da cana.

Nazato *et al.* (2011) explica que o processo de empregar a embebição (adição de água e caldo diluído) sobre o bagaço nas moendas anteriores tem a função de diluir a sacarose resultante da primeira moagem bem como

aumentar a extração nos termos de moenda. A água adicionada é eliminada no processo de aquecimento e centrifugação nos reservatórios para a preparação do mosto.

A Figura 8 mostra o processo de extração e obtenção do bagaço da cana de açúcar utilizado na ETH Bioenergia – Usina Santa Luzia.

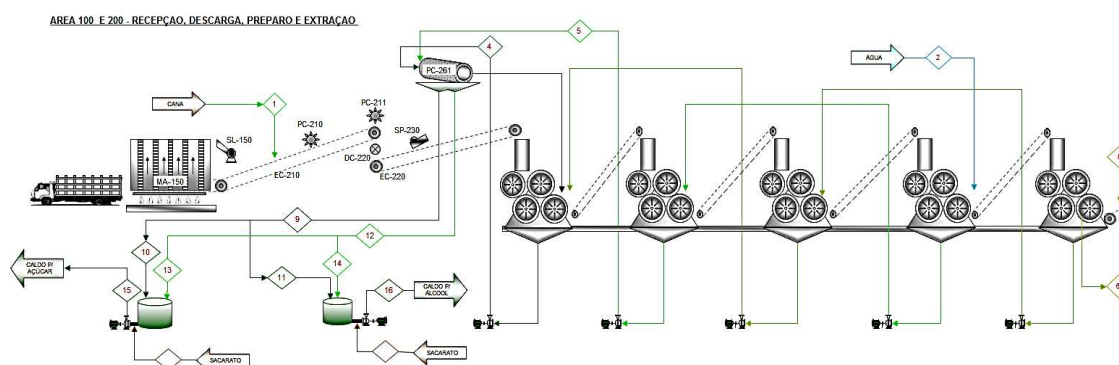


Figura 8. Processo de extração e obtenção do bagaço da cana de açúcar (FONTE: BIOSUL, 2013).

Após a moagem no último ciclo libera o bagaço que é encaminhado para queima nas caldeiras. A moagem de uma tonelada de cana no processo produz 250 quilos de bagaço sendo que para a produção de 1MWH é necessária a queima de 6,5 toneladas de bagaço (EID *et al.*, 1998).

As caldeiras são abastecidas com água proveniente de reservatórios que com o calor produz o vapor necessário para a etapa de geração de energia elétrica e utilizada nos processos seguintes à produção do etanol e do açúcar.

Na caldeira é produzidos vapor a alta pressão ( $21\text{Kgf cm}^{-2}$ ) que é conduzido às turbinas por sua vez transformam energia térmica em energia cinética(mecânica). Essa energia aciona os equipamentos de processo (picadores, desfibradores, moendas, etc.) e também os geradores para a produção de energia elétrica. Nas turbinas é liberado vapor (vapor de escape) que é de baixa pressão ( $1,5\text{kgf cm}^{-2}$ ) e que é utilizado nos processos subsequentes relativos à produção do álcool e do açúcar.

A energia elétrica produzida é encaminhada para a estação que libera para o consumo próprio e através de transformadores elevadores de tensão encaminha o excedente para distribuição comercial nas linhas de transmissão até o ponto de conexão com o Sistema Integrado Nacional (SIN).

A Figura 9 mostra o processo de produção de vapor nas caldeiras através da queima do bagaço da cana de açúcar nas fornalhas.

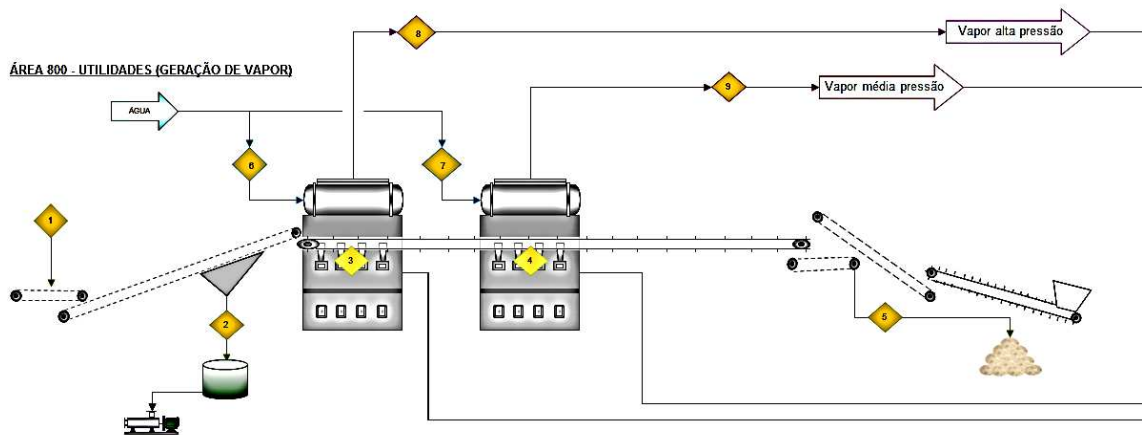


Figura 9. Processo de produção de vapor (energia térmica) (FONTE: BIOSUL, 2013).

Já o processo de produção de energia elétrica é mostrado na Figura 10.

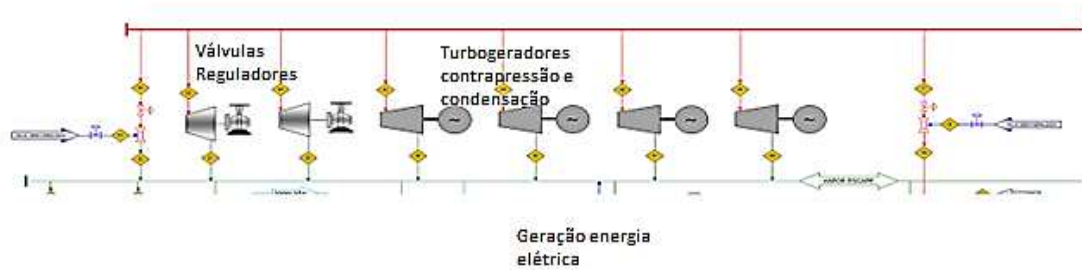


Figura 10. Processo de produção de energia elétrica (FONTE: BIOSUL, 2013).

### 3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS

ANEEL - **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Resolução. Disponível em: <[www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf](http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf)>. Acesso em: 5 fev. 2013.

BALEOTTI, L. O lixo que vira luz. **Revista Alcoolbrás**, São Paulo, 133 ed. rev.: nov. 2008. 34-41 p.

BARJA, G. J. A. **A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico**. 2006. 157f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília, 2006.

BIOSUL. Associação dos Produtores de Bioenergia de Mato Grosso do Sul. **Estatísticas**, Campo Grande, 10 abr. 2013. Disponível em: <<http://www.biosul.com>>. Acesso em: 10 abr. 2013.

CLEMENTINO, L. D. A. **Conservação de energia por meio da co-geração de energia elétrica**. São Paulo: Érica, 2001. 171 p.

COGEN - Associação da Indústria de Cogeração de Energia. **Cogeração e indicadores de gestão, São Paulo, 4 mar. 2013**. Disponível em: <<http://www.cogen.com.br>>. Acesso em: 4 mar. 2013.

EID, F; CHAN, K.; PINTO, S. S. Mudanças tecnológicas e co-geração de energia na indústria sucroalcooleira. **RECITEC**, Recife, v. 2, n. 1, p. 48-57. 1998.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2013 – ano base 2012**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 10 abr. 2013.

FERRÃO, P. D; M., WEBER, F. A. Cogeração: uma abordagem socioeconômica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA (COBENGE), 2001, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2001. p. 8-14.

FIGLIOLINO, F. **Cogeração de energia é aposta de usinas**. [S.l.]: SERMATEC, Sertãozinho, ago 2013. Disponível em: <<http://www.sermateczanionline.com.br/posts/cogerao-de-energia-e-aposta-de-usinas/>>. Acesso em: 20 out. 2013.

GOLDEMBERG, J.; MOREIRA, J. R. Política energética no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 19, n. 55, p. 215-228, dez. 2005.

GUSSOW, M. **Eletricidade Básica**. Tradução: José Lucimar do Nascimento. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. p. 17.

HOLLANDA, J. B. **Uma revolução energética para a cana de açúcar**, 2013. Disponível em: <<http://www.inee.org.br>>. Acesso em: 29 abr. 2013.



MENEGUETTI, C. C.; MEZAROBA, S.; GROFF, M. Processos de produção do álcool etílico de cana de açúcar e os possíveis reaproveitamentos dos resíduos resultantes do sistema. In: ENCONTRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO AGROINDUSTRIAL, 4., 2010, Campo Mourão. **Anais eletrônicos...** Campo Mourão: Universidade Estadual do Paraná, 2010. Disponível em: <[http://www.fecilcam.br/anais\\_iveepa/arquivos/9/9-07.pdf](http://www.fecilcam.br/anais_iveepa/arquivos/9/9-07.pdf)>. Acesso em: 5 maio 2013.

NAZATO, D. F. C.; SILVA, S. C. U.; HARDER, M. N. C. Moenda x Difusor: diferentes pontos de vista sobre o assunto. **Bioenergia em Revista: Diálogos**, Piracicaba, v. 1, n. 1, p. 129-139, jan/jun. 2011.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Atuação do ONS sobre o Sistema Integrado Nacional**. Disponível em: <[www.ons.ogr.br](http://www.ons.ogr.br)> Acesso em: 5 abr. 2013.

PALOMINO, G. R. **Cogeração a partir de gás natural: uma abordagem política, econômica, energética e termoeconômica**. 2004. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2004.

PELLEGRINI, M. C. **Inserção de centrais co-geradoras a bagaço de cana no Parque Energético do Estado de São Paulo: exemplo de aplicação de metodologia para análise dos aspectos locais e de integração energética**. 2002. 188f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, Instituto de Eletrotécnica e Energia, São Paulo, 2002.

RAMOS, R. A. V.; MAIA, C. R. M.; GASCHÉ, J. J. L.; UCHOA, T. B.; BRANCO, F. P. Análise energética e econômica de uma usina sucro-alcooleira com sistema de cogeração de energia em expansão. In: Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica. 5., 2003, São Pedro. **Anais...** São Pedro: s.l. 2003.

REIS, L. B. **Matrizes Energéticas: conceitos e usos em gestão e planejamento**. Barueri: Manole, 2011. 187 p.

SILVEIRA, J. L. **Cogeração disseminada para pequenos usuários: estudo de casos para o setor terciário**. 1994. 216 f. Tese (Doutorado em, Energia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 1994.

SOUZA, Z. J. A Cogeração de energia no setor sucroalcooleiro: desenvolvimento e situação atual. In: ENCONTRO DE ENERGIA O MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Proceeding online...** São Pedro: Scielo, 2002. Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/>>. Acesso em: 10 abr. 2013.

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. Matriz energética brasileira: uma perspectiva. **Novos Estudos-CEBRAP**, v. 79, p. 47-69, nov. 2007.

ÚNICA - União das Indústrias da Cana de açúcar. **UNICADTA**. Disponível em: <<http://unicadata.com.br>>. Acesso em: 10 jan. 2013.

VELAZQUEZ, S.; THALES, S. V.; M. A. Cogeração de energia a partir do aproveitamento do palhico de cana de açúcar. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 7., 2011, São Paulo. **Anais eletrônicos...** São Paulo: Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2011. Disponível em: <[www.mackenzie.br/fileadmin/Pesquisa/pibic/publicacoes/2011f.](http://www.mackenzie.br/fileadmin/Pesquisa/pibic/publicacoes/2011f.)>. Acesso em: 05 maio 2013.

TORO, V. D. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Rio de Janeiro: Prentice Hall do Brasil, 1994. 650 p.

#### 4. ARTIGO 1

### A COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM UMA UNIDADE SUCROALCOOLEIRA DE MATO GROSSO DO SUL – PERSPECTIVAS E VIABILIDADE

**RESUMO:** A preocupação com a questão da sustentabilidade na geração de energia elétrica tem tornado a biomassa como uma das principais fontes energéticas no cenário nacional, hoje ocupando a segunda posição na matriz energética nacional, ficando atrás somente da hidroeletricidade. Das fontes renováveis por biomassa, a cana de açúcar se destaca devido ao grande crescimento da produção de cana no cenário nacional visando a produção de etanol, inclusive, no estado do Mato Grosso do Sul. Este trabalho foi realizado em uma usina sucroalcooleira localizada no município de Nova Alvorada do Sul (MS), e teve como objetivo discutir a viabilidade econômica da cogeração de energia elétrica com a utilização de bagaço da cana de açúcar, para venda de excedentes de energia elétrica para as concessionárias através do Sistema Interligado Nacional (SIN). Os resultados encontrados mostraram que o custo para a produção de 1MWh é de R\$ 97,06, sendo competitivo frente as outras centrais de pequeno porte, tornando-se uma excelente alternativa tanto para a complementaridade financeira da empresa, bem como para o país na produção de energia elétrica, além das vantagens ambientais e socioeconômicas. A viabilidade da cogeração de energia elétrica através do bagaço de cana, resultante deste estudo, indicou que a venda de energia elétrica excedente é viável para a empresa a partir do montante de 40 MWh, com um payback de 6 anos para o início de retorno dos investimentos realizados em caldeiras e turbogeradores, considerando uma taxa de juros de 8% ao ano, 20 anos de amortização e funcionamento anual da planta de pelo menos 6.240 horas.

**Palavras chave:** Cana de açúcar; bagaço de cana; cogeração de energia, sustentabilidade.

## **ELECTRICAL POWER COGENERATION IN AN SUGAR AND ETHANOL PLANT OF MATO GROSSO DO SUL – PERSPECTIVES AND FEASIBILITY**

**ABSTRACT:** The concerns with sustainable energy generation has made the biomass one of the main energy sources in Brazil. The biomass is ranked as the second most used energy source in the Brazilian energy matrix, only behind the hydraulic energy. Sugar cane is an important renewable biomass energy source due to the large development of its production targeting the ethanol industry. This large development takes place in several parts of Brazil, including the state of Mato Grosso do Sul. This thesis presents work carried out in a sugar and ethanol plant located in Mato Grosso do Sul, more precisely in the city of Nova Alvorada do Sul. The goal of this work was to investigate the economic feasibility of generating energy with sugar cane bagasse for the National Interconnect System (*Sistema Interligado Nacional - SIN*) companies. Results have shown that the cost of producing 1 MWh is around \$ 40 USD (\$ 97.06 BRL). This cost can be considered competitive as compared to other small plant alternatives. Because of that the sugar cane bagasse can be considered an excellent alternative for completeness of the financial model of the plant, as well as of the national energy production. Besides the financial virtues there are also environmental and social benefits in exploring the energy generation from sugar cane bagasse. In this work it was also concluded that the excess electrical energy can be used in a viable business model for amounts of 40 MWh and above, with a return of investment (ROI) of 6 years. The investment is necessary to fund mainly the purchase and installation of boilers and generators. The assumptions used for the ROI calculation were an interest rate of 8 % p.a., amortization over 20 years, and operation of the plant of at least 6,240 hours per year.

**Keywords:** Sugarcane; bagasse; cogeneration of energy, sustainability.

#### 4.1. Introdução

O setor energético brasileiro tem uma grande participação em sua composição de energia proveniente de fontes renováveis que, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), representando 46% da matriz energética brasileira. A maior parte deste percentual é proveniente de recursos hídricos, cabendo também destaque importante à produção com biomassa, etanol, energia eólica e solar. O setor conta ainda com a previsão de grandes investimentos dentro do Programa Nacional de Aceleração do Crescimento (PAC), que irão proporcionar o aumento na dimensão do sistema de geração, bem como, no desenvolvimento regional e nacional (EPE, 2013).

Em relação à eletricidade, o Brasil tinha, em 2012, a maior participação do mundo em fontes renováveis, com 44,1%, enquanto que, em 2010, a taxa mundial alcançava 13,2%. Das fontes renováveis, a hidroeletricidade representa 76,9% de participação na matriz energética brasileira, seguido da biomassa (6,8%) (EPE, 2013).

Segundo a Cogen (2013), o setor de produção por biomassa (bagaço da cana de açúcar) já vinha sendo praticado há décadas, principalmente no Estado de São Paulo onde foram evidenciados vários estudos sobre o tema. Porém, o setor ainda carecia de uma legislação própria que assegurasse ao produtor a comercialização dos excedentes favorecendo novos investimentos.

Com a resolução 482 de 17/04/2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), regulamentou a comercialização e distribuição do excedente da produção de energia elétrica através do Sistema Interligado Nacional (SIN) que integra as operadoras das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da Região Norte. Esta resolução regulamenta e favorece o desenvolvimento de produção a partir dos sistemas de cogeração provenientes de fontes renováveis (COGEN, 2013).

O setor sucroalcooleiro ocupa hoje uma posição de destaque no setor produtivo brasileiro. As formas de energia que produz são competitivas e com perspectivas de aumentar a produtividade da cana e na cadeia de transformações energéticas (HOLLANDA, 2013).

Para Pellegrini (2002), a queima do bagaço em fornalhas de caldeiras de vapor é largamente praticada pelas usinas para suprir o consumo próprio de

energia térmica e elétrica na indústria, proporcionando o privilégio da auto-suficiência, condições essas inexistentes na maioria das atividades industriais.

O setor que já ocupava a segunda posição na matriz energética renovável do Brasil pode contribuir ainda mais na comercialização através da expansão dos seus sistemas de cogeração devendo, para isso, utilizar tecnologias mais avançadas que favoreçam o melhor aproveitamento do combustível (BALEOTTI, 2008).

A venda de excedentes de energia elétrica através da cogeração tem sido percebida como um negócio lucrativo pelos empresários do setor, com prazos de retorno do investimento relativamente baixos, impactos ambientais insignificantes e algumas vantagens regulatórias em relação às fontes convencionais (EPE, 2013).

Segundo Figliolino (2013), a cogeração de energia elétrica é apontada como saída para aumentar a competitividade do setor sucroenergético e viabilizar a retomada dos investimentos na construção de novas plantas e a ampliação de destilarias de etanol, que estão suspensas desde a crise financeira de 2008. Este fato tem ganhado força com as novas regulamentações para o setor energético, que contribuem para a viabilidade de vender a produção excedente para as concessionárias locais, priorizando o atendimento das pequenas localidades, reduzindo o custo de transmissão e gerando riquezas.

O Estado de Mato Grosso do Sul está entre os maiores produtores de etanol e açúcar do país, contando com vasta área agrícola favorável ao plantio da cana de açúcar. No Estado, vinte e duas usinas estão em pleno funcionamento sendo que apenas nove delas disponibilizam excedentes de energia elétrica na rede para comercialização (CENTENARO, 2012).

O objetivo deste trabalho foi analisar a viabilidade econômica na produção de energia elétrica a partir do bagaço da cana de açúcar no Estado de Mato Grosso do Sul, comparando os custos de produção com outros sistemas de geração de energia elétrica de mesmo porte.

## 4.2. Material e Métodos

Este trabalho foi desenvolvido na unidade sucroalcooleira denominada Usina Santa Luzia do grupo ETH Bioenergia, localizada no município de Nova Alvorada do Sul em Mato Grosso do Sul, no período de outubro de 2012 a junho de 2013. A abordagem metodológica utilizada foi de caráter exploratório e descritivo através de levantamento de dados junto ao centro de operações avançadas da usina.

A Usina Santa Luzia compõe o pólo de Mato Grosso do Sul do grupo ETH Bioenergia, juntamente com a Usina Eldorado no município de Rio Brillhante que, conjuntamente, possui capacidade de produção de 570 mil MWh trabalhando na inserção de excedentes de energia elétrica na rede do SIN.

A Unidade iniciou a sua operação no Estado em 2009 com um investimento de 660 milhões de reais destinada a produção de etanol e energia elétrica através da queima do bagaço de cana - bioenergia. Possui uma capacidade instalada para a produção anual de 64 milhões de litros de etanol, moagem de 6 milhões de toneladas de cana de açúcar e produção de 518 mil MW ao ano. Em relação à comercialização de eletricidade, a empresa atua como produtor independente de energia elétrica em um mercado de Ambiente de Comercialização Livre.

O Estado é atendido pela Empresa Energética de Mato Grosso do Sul (ENERSUL), concessionária outorgada pela ANEEL para exploração do sistema de energia elétrica. A ENERSUL possui uma potência instalada de 4.600 MWh, com uma matriz energética constituída predominantemente de fontes hidráulicas, em torno de 77%. O suprimento de energia é efetuado pela rede básica constituído por um sistema de 230kV de propriedade da Porto Primavera Transmissora, contando também como sistemas de transmissão de 230kV de propriedade da Eletrosul Centrais Elétricas S/A (ANEEL, 2012).

Para o cálculo da viabilidade econômica da cogeração de energia elétrica, foi utilizada a metodologia descrita por AVACI *et al.* (2013), com as devidas adaptações para o bagaço da cana de açúcar, que afirma que o custo da produção está diretamente relacionado com o capital investido na construção e manutenção dos equipamentos envolvidos diretamente na produção de eletricidade. Para tanto, foram utilizados dois cenários: o cenário 1

em que se supõe que a unidade comercializa toda a sua produção excedente a um custo fixo e, o cenário 2 em que se supõe que apenas a energia gerada para consumo na própria unidade é comercializada a um preço fixo, sem participação da energia excedente. O que se pretende concluir é: a partir de que volume de energia a ser comercializada pela unidade remunera o investimento? O custo de produção é competitivo frente às outras unidades de geração de mesmo porte?

Para compor as demais variáveis para o cálculo foi considerada uma taxa de desconto de 8% (custo do investimento), que é a taxa aplicada aos projetos de biomassa, bem como, a taxa de financiamento usual do Governo Federal nas atividades de produção agrícola (SOUZA *et al.*, 2013). O prazo de amortização para o investimento considerado foi de 20 anos, conforme informação da ETH Bioenergia, prazo este aplicado no projeto da Usina Santa Luzia, objeto deste trabalho.

De acordo com Avaci *et al.* (2013), o fator de recuperação de capital é dado pela equação (1).

$$FRC = \frac{j \times (1 + j)^n}{(1 + j)^{n-1} - 1} \quad (1)$$

Onde:

*FRC* - Fator de recuperação de capital;

*j* - Taxa de desconto (% ano), e;

*n* - Anos para amortização do investimento.

Assim, a determinação do custo da produção de energia elétrica por cogeração, via bagaço de cana, é dado pela equação (2).

$$CE = \frac{CAG + CAB}{PE} \quad (2)$$

Onde:

*CE* - Custo de energia elétrica produzida via bagaço de cana (R\$/kWh);

*CAG* - Custo anualizado do investimento no conjunto motor-gerador (R\$/ano), que se divide na soma de duas parcelas:

$$CAG = CAT + CAC$$

Onde:

*CAT* é o valor devido ao turbogerador e *CAC* o valor devida a caldeira;

*CAB* - Gasto anual com bagaço de cana (R\$/ano);



$PE$  - Produção de eletricidade pela planta de bagaço de cana (kWh/ano).

O custo anualizado do investimento no turbogerador  $CAT$  é determinado pela equação (3).

$$CAT = CIT \times \left( FRC + \frac{OM_1}{100} \right) \quad (3)$$

Onde:

$CIT$  - Custo do investimento no turbogerador (R\$);

$FRC$  - Fator de recuperação de capita e;

$OM_1$  - Custo com operação e manutenção do investimento no turbogerador, com:

$$OM_1 = \frac{OM}{CIT}$$

O custo anualizado do investimento na caldeira  $CAC$  é determinado pela equação (4).

$$CAC = CIC \times \left( FRC + \frac{OM_2}{100} \right) \quad (4)$$

Onde:

$CIC$  - Custo de investimento na caldeira (R\$);

$OM_2$  - Custo com a operação e manutenção em relação ao custo do investimento na caldeira.

$$OM_2 = \frac{OM}{CIC}$$

Já o gasto anual com bagaço de cana é determinado pela equação (5).

$$CAB = CB \times CNB \quad (5)$$

Onde:

$CB$  - Custo por tonelada do bagaço de cana (R\$/t) e;

$CNB$  - Consumo de bagaço de cana pela caldeira (t/ano).

Para calcular a produção de eletricidade ( $PE$ ), tem-se a equação (6):

$$PE = Pot \times T \quad (6)$$

Onde:

$Pot$  - Potência nominal da planta (kW) e;

$T$  - Disponibilidade anual da planta (horas/ano).

Já o custo do bagaço de cana é dado pela equação (7).

$$CB = \frac{CAC}{PAB} \quad (7)$$

Onde:

*CAC* - Custo anualizado da operação da caldeira para a produção de calor, em (R\$ / ano);

*PAB* - Produção anual de bagaço de cana (m<sup>3</sup>/ano).

Das equações (5) e (7), tem-se a equação (8).

$$CAB = CB \times CNB = \frac{CAC}{PAB} \times CNB \quad (8)$$

Para o cálculo da viabilidade econômica foi utilizado o Valor Presente Líquido (VPL) que faz a comparação entre o capital inicial investido e o resultado do somatório do fluxo de caixa no final do período considerado. O investimento será viável caso  $VPL > 0$ , e inviável se  $VPL < 0$ . O VPL é dado pela equação (9).

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} + \frac{VR}{(1+r)^n} \quad (9)$$

Onde:

*I* – Valor do investimento inicial;

*FC<sub>t</sub>* – Valor líquido do fluxo de caixa na data t;

*r* – Taxa de custo do capital;

*VR* – Valor residual do projeto na data do período final de análise.

O tempo de retorno do investimento, período *payback*, é um referencial usado para definir a aceitação ou não do projeto e que torna o VPL nulo ( $VPL = 0$ ).

### 4.3. Resultados e Discussão

A Unidade de Santa Luzia possui capacidade de moagem de 6 milhões de toneladas de cana de açúcar para uma produção de 640 milhões de litros de etanol e geração de 518 mil MW. A produção da energia térmica se dá pela queima do bagaço da cana de açúcar em três caldeiras de 67 bar<sup>1</sup>, a uma temperatura de 520°C e capacidade para 580 toneladas de bagaço por hora operando em ciclo Rankine. Para a produção de energia elétrica utiliza três

turbogeradores com capacidade total de 130MW/h. O valor do investimento total do empreendimento foi de 600 milhões de reais sendo que 161 milhões de reais correspondem ao conjunto de caldeiras e dos turbogeradores.

A unidade que é autossuficiente em energia elétrica tem um custo anual de R\$ 50 mil reais proveniente da energia elétrica adquirida da concessionária local utilizada na entressafra e períodos de manutenção da planta. Os valores de referência do projeto levantadas junto à Usina Santa Luzia (Centro de Operações Especializadas) estão descritos na Tabela 1.

Tabela 4. Valores levantados na pesquisa na Unidade de Santa Luzia (MS) em 2013.

Descrição	Valor	Unidade
Taxa de desconto	8	%
Prazo para amortização do investimento	20	Ano
Custo investimento caldeira-gerador	161.000.000	R\$
Custo operação e manutenção	800.000	R\$ ano
Consumo de bagaço pelo conjunto caldeira-gerador	1.150.288	Toneladas/ano
Disponibilidade da planta	6.240	Horas/ano
Produção de bagaço de cana	1.168.914	Toneladas/ano
Gasto anual com energia elétrica adquirida na rede	50.000	R\$/ano
Gasto com operação e manutenção da planta	800.000	R\$/ano

Fonte: ETH (2013).

Para o cálculo do custo do MWh utilizou-se das equações citadas na metodologia, considerando que o sistema funcione durante a safra da cana (6 meses), operando 12 horas diárias, totalizando 2.160 horas ao ano e as demais variáveis citadas na Tabela 4.

O custo operacional considerado foi de R\$800.000,00 ao ano referente aos custos de operação e manutenção sendo a maior parte relativa ao período de safra. Nos custos são considerados os custos com produtos, peças de reposição, gasto com mão de obra, entre outros.

Para o cálculo do *FRC*, equação (1), considerou-se  $j = 8$  (taxa de desconto) e  $n = 20$  (anos de amortização), encontrando-se o valor de 0,1119. Na determinação do custo de produção *CE* utilizou-se a equação (2), sendo:

$$CE = \frac{CAG + CAB}{PE} = \frac{CAT + CAC + CAB}{PE}$$

Onde:

$CAT$  é dado pela equação (3), ou seja:

$$CAT = CIT \times \left( FRC + \frac{OM_1}{100} \right)$$

Sendo:

$$CIT = 41.000.000; FRC = 0,1119 \text{ e } OM_1 = \frac{OM}{CIT}, OM = 800.000.$$

Assim,

$$CAT = 41.000.000 \times \left( 0,1119 + \frac{800.000}{41.000.000} \times \frac{1}{100} \right) = 4.595.900 (\text{R}\$)$$

E

$$CAC = CIC \times \left( FRC + \frac{OM_2}{100} \right)$$

Com

$$CIC = 121.000.000; FRC = 0,1119 \text{ e } OM_2 = \frac{OM}{CIC}, OM = 800.000$$

Daí:

$$CAC = 121.000.000 \times \left( 0,1119 + \frac{800.000}{121.000.000} \times \frac{1}{100} \right) = 13.547.900 (\text{R}\$)$$

Como

$$CAB = CB \times CNB = \frac{CAC}{PAB} \times CNB$$

Onde:

$$PAB = 1.168.914 \text{t}$$

Desse modo o custo em reais por tonelada de bagaço é dado por:

$$CB = \frac{CAC}{PAB} = \frac{13.547.900}{1.168.914} = 11,59 \text{ (R}\$/\text{t)}$$

O custo anualizado em reais com bagaço  $CAB$  é dado por:

$$CAB = CB \times CNB = 11,59 \times 1.150.288 = 13.331.838 \text{ (R}\$)$$

A produção de energia elétrica é dada pela equação (6), sou seja:

$$PE = Pot \times T$$

Onde  $Pot$  é a potência nominal do sistema, de 130 kW, e  $T$  o tempo de operação do mesmo,  $T = 2.160$  h, operando 12 h por dia durante 6 meses de 30 dias.

$$PE = Pot \times T = 130kW \times 1.440h = 187.200(\text{MWh})$$

Assim, o custo da produção de energia elétrica, em reais, com bagaço de cana é dado por:

$$CE = \frac{4.595.900 + 13.547.900 + 13.331.838}{280.800} = 112,09 \text{ (R\$/MWh)}$$

ou seja, o custo de produção de energia elétrica pelo sistema, utilizando bagaço de cana, é de R\$ 112,09 por MWh.

A Tabela 5 mostra que o valor resultante  $CE$  é plenamente compatível com os valores médios resultantes dos leilões promovidos pela ANEEL, sendo que o último ocorrido em 29/08/2013, esse valor alcançou o preço médio de R\$135,58/MWh.

Tabela 5. Valores médios resultantes dos leilões promovidos pela ANEEL – 2005 a 2013 – Biomassa.

<b>Leilão – Energia Nova</b>	<b>Preço Médio (R\$/MWh)</b>
2005	150,60
2006	135,10
2006	141,50
2008	145,00
2009	144,60
2011	105,02
2013	135,58

FONTE: Adaptado de COGEN (2013).

O valor do custo do MWh obtido representa o valor médio da energia produzida em 2.160 horas/ano, média de 12 horas/dia, operando durante 6 meses ao ano (safra da cana), e que pode sofrer variações em relação a outras unidades produtoras. Para verificar a influência do tempo de operação da usina

com o custo de produção do MWh foi realizado um ensaio considerando uma faixa de 1 a 24 horas/dia.

Tabela 6. Variação do custo do MWh *versus* tempo de operação.

<b>h / dia</b>	<b>Total (h / 6 meses)</b>	<b>Custo (MWh)</b>	<b>h / dia</b>	<b>Total (h / 6 meses)</b>	<b>Custo (MWh)</b>
<b>1</b>	180	1.345,11	<b>13</b>	2.340	103,47
<b>2</b>	360	672,56	<b>14</b>	2.520	96,08
<b>3</b>	540	448,37	<b>15</b>	2.700	89,67
<b>4</b>	720	336,28	<b>16</b>	2.880	84,07
<b>5</b>	900	269,02	<b>17</b>	3.060	79,12
<b>6</b>	1.080	224,19	<b>18</b>	3.240	74,73
<b>7</b>	1.260	192,16	<b>19</b>	3.420	70,80
<b>8</b>	1.440	168,14	<b>20</b>	3.600	67,26
<b>9</b>	1.620	149,46	<b>21</b>	3.780	64,05
<b>10</b>	1.800	134,51	<b>22</b>	3.960	61,14
<b>11</b>	1.980	122,28	<b>23</b>	4.140	58,48
<b>12</b>	2.160	112,09	<b>24</b>	4.320	56,05

Os resultados obtidos mostram que o custo da produção varia com a disponibilidade da planta, uma vez que este fator está diretamente ligado à maior ou menor oferta de energia (Tabela 6). Observa-se que o custo diminui com o tempo de operação, ou seja, a influência dos custos fixos diminui com o aumento do tempo de operação. A Figura 11 apresenta graficamente a relação do custo de produção do MWh pelo tempo de operação.

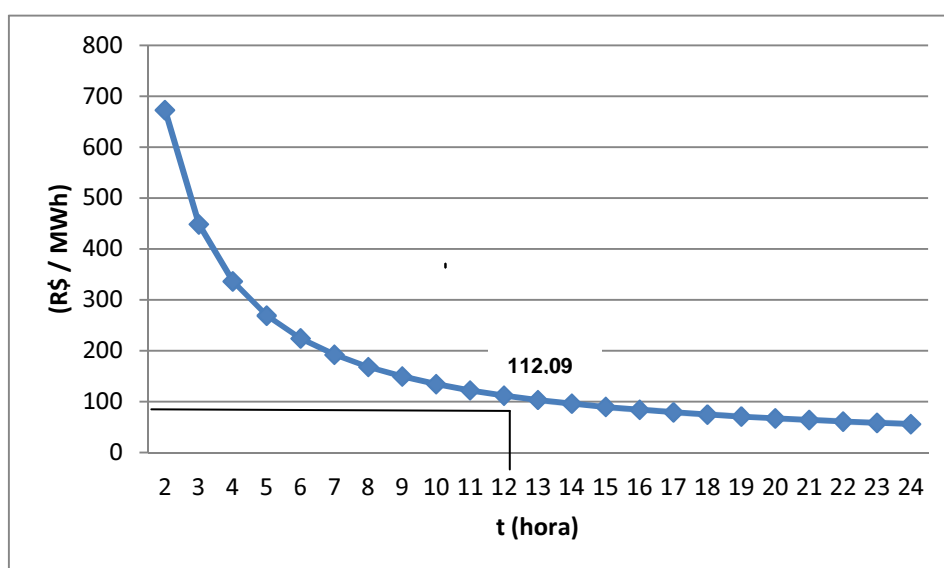


Figura 11. Custo de produção do MWh pelo tempo de operação.

Pela própria característica do setor sucroalcooleiro, a maior produção de energia elétrica se dá no período da safra, sendo que, na entressafra a operação é reduzida e a produção de eletricidade fica abaixo da capacidade. A produção nesse período se houver se dá com a utilização do bagaço estocado. Outro ponto relevante é que a usina utiliza nesse período, para assegurar o contrato de fornecimento de energia elétrica, a produção excedente da usina de Eldorado pertencente ao mesmo grupo.

O custo da produção de energia elétrica com o uso de fontes renováveis, como tratado neste artigo, depende também de vários fatores como a facilidade de acesso ao crédito e fomento por parte do Governo Federal para modernização da planta instalada. A cogeração com a utilização da biomassa é uma das formas mais atrativas devido ao aproveitamento das plantas já instaladas para a produção do álcool e do açúcar. A comparação de custos com outras centrais termoeletricas estão demonstrados na Tabela 7.

Tabela 7. Custos de produção de energia elétrica no Brasil, em 2008.

<b>Fonte</b>	<b>R\$</b>
Óleo diesel	491,61
Óleo combustível	330,11
Eólica	197,95
Gás natural	140,60
Nuclear	138,75
Carvão	135,05
Hidrelétrica	118,42
PCH	116,55
Biomassa (cana de açúcar)	101,75

FONTE: ANEEL (2008).

A atratividade do negócio em relação à produção e exportação de energia elétrica no setor depende dos custos relativos à produção e da receita da venda de excedentes. Para o cálculo da viabilidade econômica do empreendimento relativo à produção de energia elétrica foi utilizado o Valor Presente Líquido (VPL) que representa a comparação entre o custo do investimento e o resultado do caixa relativo ao projeto. O projeto será considerado viável quando  $VPL > 0$  e inviável quando  $VPL < 0$ . O período *payback* define a aceitação ou não do projeto, e que torna o VPL nulo ( $VPL = 0$ ).

Para apuração da viabilidade do investimento, foram considerados dois cenários: Cenário 1 e; Cenário2.

No Cenário 1 considera-se que toda a energia excedente (média de 66MWh) é comercializada a um valor médio de R\$136,77, tendo como base, a média dos valores alcançados nos Leilões de Energia Nova (LEN) (Tabela 7). O valor escolhido é 22,1% superior ao custo de produção, de R\$ 112,09, sendo assim aceitável para a simulação. O tempo de operação neste caso será considerado 2.160 h/ano. Nesse caso, estima-se que a receita resultante da venda remunera o capital investido.

No Cenário 2 considera-se apenas a energia gerada para utilização da própria indústria (média de 33 MWh), supondo-se que seria comercializada a R\$ 136,77. Nesse caso, considerou-se que o investimento foi realizado para a produção de energia equivalente ao consumo da própria usina.

Para o cálculo da remuneração levou-se em consideração a quantidade disponível de energia multiplicada pelo tempo de operação/ano multiplicado pelo valor de R\$ 136,77, ou seja:

$$R(\$) = \text{Energia disponível (MW)} \times 2.160 \text{ (h)} \times 136,77 \text{ (R\$/MWh)}$$

Considerando que o investimento inicial relativo ao custo das caldeiras e geradores foi de R\$161.000.000,00, e que as despesas com amortizações (taxa de 8%aa e prazo de 20 anos para amortização). Além disso, os gastos decorrentes da operação e manutenção da planta foi de R\$ 15.153.800,00.

Para ambos os cenários foram montados os fluxos de caixas apresentados nas Tabelas 8 e 9. O valor residual (VR) considerado na última parcela representa o quanto se pode obter em R\$ no final da vida útil dos equipamentos que torna-se aceitável uma estimativa de 10% (BARJA, 2006).

Para o cenário 1 resultou o fluxo de caixa mostrado na Tabela 8.



Tabela 8. Fluxo de caixa do cenário 1.

<b>Ano</b>	<b>Saída</b>	<b>Entrada</b>	<b>Fluxo Caixa</b>
0	R\$ 161.00.000,00	R\$ 0,00	-R\$ 161.000.000,00
1	R\$ 18.815.900,00	R\$ 56.327.356,00	R\$ 37.511.486,00
2	R\$ 18.815.900,00	R\$ 56.327.356,00	R\$ 37.511.486,00
3	R\$ 18.815.900,00	R\$ 56.327.356,00	R\$ 37.511.486,00
4	R\$ 18.815.900,00	R\$ 56.327.356,00	R\$ 37.511.486,00
5	R\$ 18.815.900,00	R\$ 56.327.356,00	R\$ 37.511.486,00
6	R\$ 18.815.900,00	R\$ 56.327.356,00	R\$ 37.511.486,00
7	R\$ 18.815.900,00	R\$ 56.327.356,00	R\$ 37.511.486,00
8	R\$ 18.815.900,00	R\$ 56.327.356,00	R\$ 37.511.486,00
9	R\$ 18.815.900,00	R\$ 56.327.356,00	R\$ 37.511.486,00
10	R\$ 18.815.900,00	R\$ 56.327.356,00	R\$ 37.511.486,00
11	R\$ 18.815.900,00	R\$ 56.327.356,00	R\$ 37.511.486,00
12	R\$ 18.815.900,00	R\$ 56.327.356,00	R\$ 37.511.486,00
13	R\$ 18.815.900,00	R\$ 56.327.356,00	R\$ 37.511.486,00
14	R\$ 18.815.900,00	R\$ 56.327.356,00	R\$ 37.511.486,00
15	R\$ 18.815.900,00	R\$ 56.327.356,00	R\$ 37.511.486,00
16	R\$ 18.815.900,00	R\$ 56.327.356,00	R\$ 37.511.486,00
17	R\$ 18.815.900,00	R\$ 56.327.356,00	R\$ 37.511.486,00
18	R\$ 18.815.900,00	R\$ 56.327.356,00	R\$ 37.511.486,00
19	R\$ 18.815.900,00	R\$ 56.327.356,00	R\$ 37.511.486,00
20	R\$ 18.815.900,00	R\$ 74.427.238,00	R\$ 53.611.456,00

Para o cenário 1 considerou-se a produção média de 66 MWh comercializada por R\$ 136,77 e com operação de 6.240 horas/ano. O VPL encontrado, equação (9), foi de R\$ 210.747.356 (positivo), o que representa que o projeto é atrativo representando que a venda de excedente representa lucratividade para o negócio. O tempo de retorno do investimento vai variar com o tempo de operação, tarifa de comercialização e produção de energia elétrica excedente.

Para o cenário 2, resultou o fluxo de caixa mostrado na Tabela 9.

Tabela 9. Fluxo de caixa do cenário 2.

<b>Ano</b>	<b>Saída</b>	<b>Entrada</b>	<b>Fluxo Caixa</b>
0	R\$ 161.00.000,00	R\$ 0,00	-R\$ 161.000.000,00
1	R\$ 18.815.900,00	R\$ 28.163.678,00	R\$ 9.347.778,00
2	R\$ 18.815.900,00	R\$ 28.163.678,00	R\$ 9.347.778,00
3	R\$ 18.815.900,00	R\$ 28.163.678,00	R\$ 9.347.778,00
4	R\$ 18.815.900,00	R\$ 28.163.678,00	R\$ 9.347.778,00
5	R\$ 18.815.900,00	R\$ 28.163.678,00	R\$ 9.347.778,00
6	R\$ 18.815.900,00	R\$ 28.163.678,00	R\$ 9.347.778,00
7	R\$ 18.815.900,00	R\$ 28.163.678,00	R\$ 9.347.778,00
8	R\$ 18.815.900,00	R\$ 28.163.678,00	R\$ 9.347.778,00
9	R\$ 18.815.900,00	R\$ 28.163.678,00	R\$ 9.347.778,00
10	R\$ 18.815.900,00	R\$ 28.163.678,00	R\$ 9.347.778,00
11	R\$ 18.815.900,00	R\$ 28.163.678,00	R\$ 9.347.778,00
12	R\$ 18.815.900,00	R\$ 28.163.678,00	R\$ 9.347.778,00
13	R\$ 18.815.900,00	R\$ 28.163.678,00	R\$ 9.347.778,00
14	R\$ 18.815.900,00	R\$ 28.163.678,00	R\$ 9.347.778,00
15	R\$ 18.815.900,00	R\$ 28.163.678,00	R\$ 9.347.778,00
16	R\$ 18.815.900,00	R\$ 28.163.678,00	R\$ 9.347.778,00
17	R\$ 18.815.900,00	R\$ 28.163.678,00	R\$ 9.347.778,00
18	R\$ 18.815.900,00	R\$ 28.163.678,00	R\$ 9.347.778,00
19	R\$ 18.815.900,00	R\$ 28.163.678,00	R\$ 9.347.778,00
20	R\$ 18.815.900,00	R\$ 44.263.778,00	R\$ 25.447.778,00

Para o cenário 2 considerou-se a produção média de 33MWh comercializada a um valor de R\$ 136,77 e com operação de 6240 horas/ano.

O VPL encontrado foi de -R\$65.767.907,00 (negativo) o que significa que o investimento não é atrativo para essa faixa de produção. Porém, vale ressaltar que a energia utilizada nos processos da Usina tem o seu custo rateado com os produtos produzidos, como o etanol, ficando assim, a energia excedente responsável pela lucratividade do investimento.

O importante das análises desses cenários foi mostrar que a venda da energia excedente por si só, pode remunerar o capital independente do consumo de eletricidade pela Usina, porém, vai depender da quantidade de MWh comercializado e da tarifa.

Para se entender o comportamento do VPL em relação ao investimento realizado foram feitas duas simulações:

- Variação do VPL por tarifa aplicada com valores compreendidos entre R\$130,00 a R\$230,00 (Figura 12).

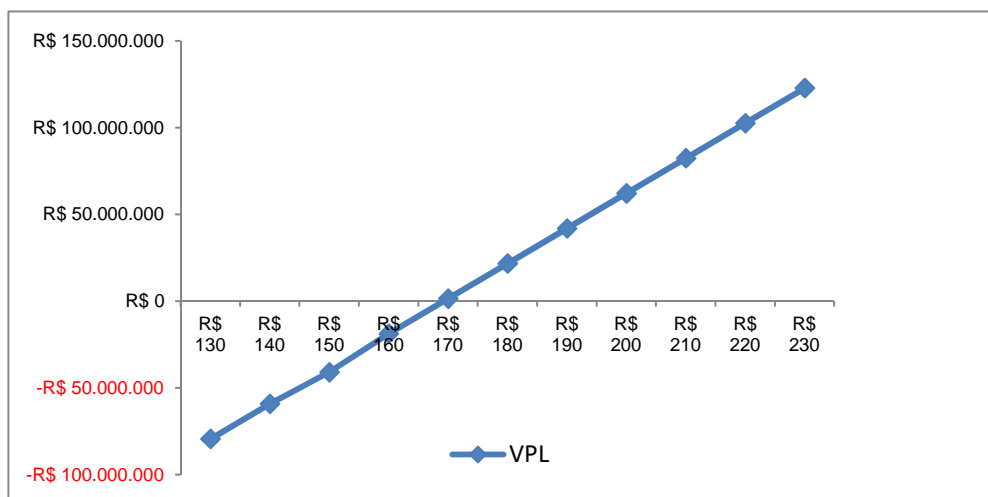


Figura 12. Variação do VPL em relação à tarifa aplicada entre R\$ 130,00 e R\$ 230,00.

- Variação do VPL por produção (MWh) com valores compreendidos entre 35 a 65 MWh (Figura 13).

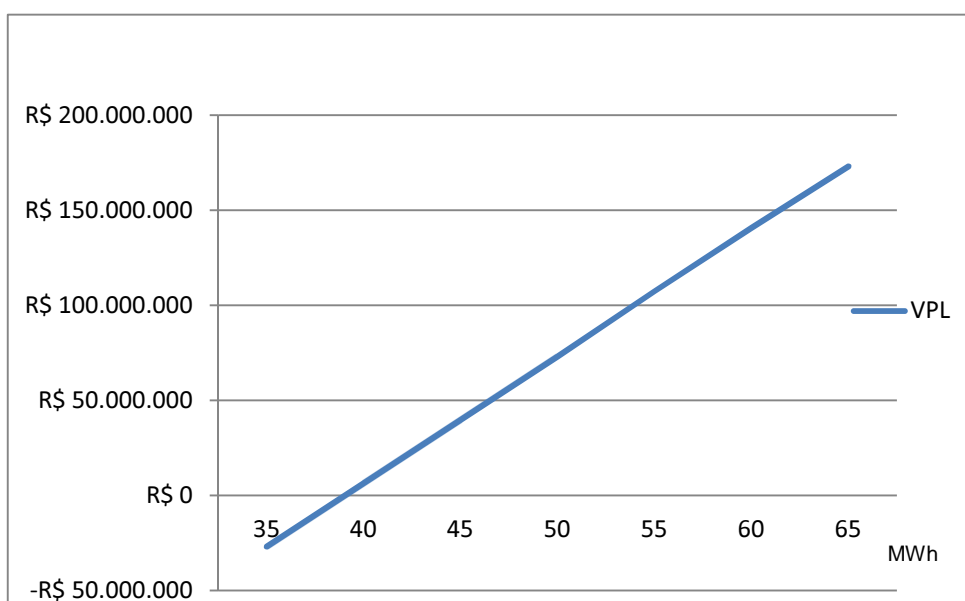


Figura 13. Variação do VPL em relação a produção entre 35 e 65 MWh.

As análises demonstram que a atratividade do projeto, em relação ao investimento realizado, vai depender da oferta de energia para comercialização e das tarifas aplicadas para comercialização do excedente no Ambiente de Comercialização Regulada (ACR) através dos leilões de energia bem como no Ambiente Comercialização Livre (ACL).

Já em relação ao período Payback (Tempo de Retorno Investimento-TRI) foi realizada uma simulação considerando os valores de produção de 30, 40, 50 e 60 MWh com tarifa média de R\$136,77 e operando 6.240 horas/ano. A Figura 14 mostra a variação do TRI onde se pode concluir que quanto maior for a oferta de energia excedente maior será a lucratividade com menor retorno do investimento.

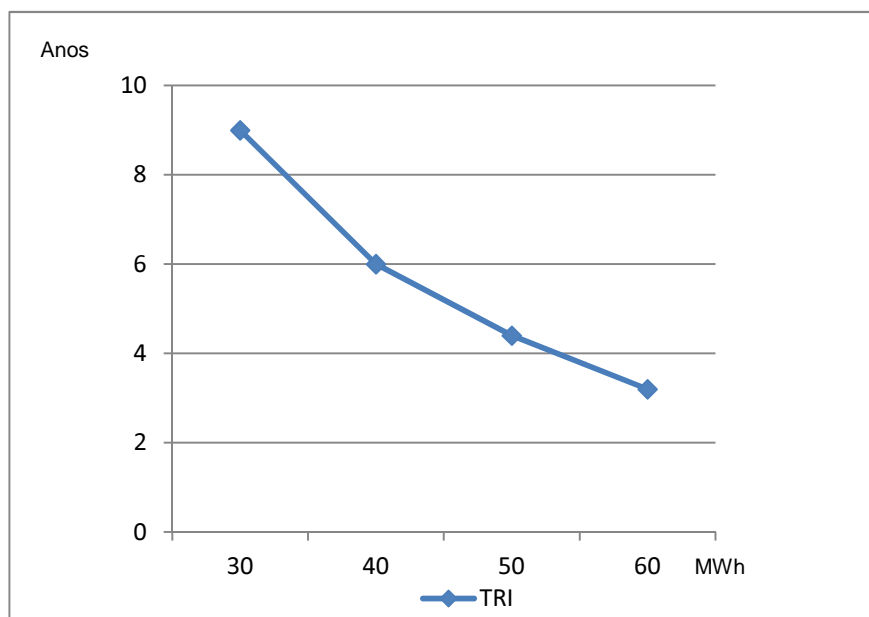


Figura 14. Variação do tempo de retorno do Investimento em relação a produção em MWh.

Outros fatores importantes e que devem ser considerados em complementariedade aos dados apresentados, são as externalidades do setor que apesar de gerar poluentes pelas usinas como resultado dos processamentos contribuiu para a redução de  $\text{CO}_2$  tendo em vista a absorção desse gás no processo de fotossíntese em todo o ciclo o que compreende a preparação do solo até a sua colheita. Considerando o ciclo completo da biomassa, incluindo o seu consumo direto e indireto, a emissão de  $\text{CO}_2$  é extremamente menor que as emissões das termelétricas que utilizam combustíveis fósseis (PELLEGRINI, 2002).

Os resultados apresentados comprovam que a energia elétrica produzida em cogeração no sucroalcooleiro apresentam vantagens ao produtor com a venda de excedentes o que representa receita adicional à produção do etanol e do açúcar. Ainda mais, esta realidade pode ser transformada em

estratégia competitiva pelas concessionárias de energia elétrica, tendo em vista as seguintes vantagens:

- Produção próxima aos centros consumidores
- Tarifas de transmissão reduzidas
- Preços de compra compatíveis aos custos de produção
- Garantia de compra fixada nos leilões de energia pela ANEEL

Além das vantagens citadas acima se pode destacar os ganhos econômicos e sociais como o desenvolvimento na economia do estado produtor (aumento na arrecadação de impostos e dinamização de bens de capital), crescimento da oferta de novos dos serviços especializados e empregos estabilizados na área rural e a segurança ao abastecimento de energia elétrica aos centros consumidores industriais e residenciais da região.

O resultado é uma excelente oportunidade para impulsionar o desenvolvimento do Estado e garantir maior confiabilidade no fornecimento e estimular a produção próxima ao consumo, evitando os custos de transportes de longas distâncias, fator este que implica a majoração do preço da energia ao consumidor final.

A importância do setor sucroalcooleiro, na participação da matriz energética do Estado de Mato Grosso do Sul, foi afirmada com o primeiro passo dado pela ENERSUL, Empresa Concessionária do Estado, que realizou o seu primeiro leilão para compra de energia de usinas sucroalcooleiras fechando contrato de fornecimento por oito anos com as unidades de Caarapó (MS) e Vista Alegre (MS). Foram contratados 23 MWh médios (201.840 MWh/ano) que são suficientes para, caso toda energia fosse destinada ao mercado residencial atenderia mais de um milhão de moradias. A tarifa média por MWh, cobrada no Centro Oeste, é de R\$204,47 (Classe industrial) e R\$ 295,86 (Classe residencial).

#### **4.4. Conclusões**

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que a cogeração de energia elétrica por bagaço de cana de açúcar é uma forma viável e atrativa para o suprimento de energia elétrica para os centros consumidores. O custo de produção do MWh encontrado de R\$ 121,46, comparado aos de outras

centrais termelétricas de pequeno porte, mostra que esta geração de energia é bastante competitiva além das vantagens ambientais. A viabilidade do sistema resultante deste estudo de caso indicou que a produção de energia excedente é viável a partir da comercialização de 40 MWh com um payback de 6 anos para os investimentos realizados em caldeiras e turbogeradores. Verificou-se também que para produção abaixo dos 40 MWh o preço para comercialização do MWh, para tornar o investimento atrativo, deve estar acima de R\$ 170,00 (25% superior ao valor utilizado nas análises de viabilidade econômica). Porém os resultados dependem do dimensionamento do sistema e da necessidade de consumo interno de energia elétrica pela própria usina.

Assim, o sistema de cogeração por bagaço de cana de açúcar pode ser considerado um excelente investimento tanto para o produtor que realiza um ganho financeiro com a comercialização de excedentes de energia produzida bem como para o Estado produtor que promove o desenvolvimento regional e social.

#### 4.5. Referências Bibliográficas

ANEEL - **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Resolução. Disponível em: <[www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf](http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf)>. Acesso em: 5 fev. 2013.

AVACI, A. B.; SOUZA, S. N. M.; WEERNCKE, L. Financial economic scenario for microgeneration energy from swine culture-originated biogas. **Renewable and sustainable energy reviews**, Elsevier, v. 25, p. 272-276, set. 2013.

BALEOTTI, L. O lixo que vira luz. São Paulo: **Revista Alcoolbrás**, São Paulo, 133 ed. ver.: nov. 2008, 34-41 p.

BARJA, G. J. A. **A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico**. 2006. 157f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília, 2006.

CENTENARO, M. Análise da evolução da indústria sucroenergética de Mato Grosso do Sul. In: ENCONTRO CIENTÍFICO DE ADMINISTRAÇÃO, ECONOMIA E CONTABILIDADE, N.1, 2012, Dourados. **Anais...** Dourados: Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, 2012.

COGEN - Associação da Indústria de Cogeração de Energia. **Cogeração e indicadores de gestão**. São Paulo. 2013. Disponível em: <<http://www.cogen.com.br>>. Acesso em: 4 mar. 2013.

EPE - **Empresa de Pesquisa Energética, Balanço Energético Nacional 2013 – ano base 2012**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 10 abr. 2013.

FIGLIOLINO, F. **Cogeração de energia é aposta de Usinas**. SERMATEC, Sertãozinho, ago. 2013. Disponível em: <<http://www.sermateczanionline.com.br/posts/cogeracao-de-energia-e-aposta-de-usinas/>>. Acesso em 20 out. 2013.

HOLLANDA, J. B. **Uma revolução energética para a cana de açúcar**, 2013. Disponível em: <<http://www.inee.org.br>>. Acesso em: 29 abr. 2013.

PELLEGRINI, M. C. **Inserção de centrais co-geradoras a bagaço de cana no Parque Energético do Estado de São Paulo: exemplo de aplicação de metodologia para análise dos aspectos locacionais e de integração energética**. 2002. 188 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, Instituto de Eletrotécnica e Energia, São Paulo, 2002.

SOUZA, S. N.; MELEGARI, P.; WILLIAM, C.; PAVAN, A. A. Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5., 2004, Campinas. **Proceedings online...** Campinas: 1996. Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/>>. Acesso em: 19 mar. 2013.

## **APÊNDICES**



Apêndice 1A. Custo de produção de energia elétrica – Bagaço da cana de açúcar.

<b>CÁLCULO DO CUSTO DO MWh</b>	<b>VALORES</b>	<b>VARIÁVEIS</b>	
Ce (Custo de energia elétrica produzida bagaço) (R\$)	121,46	CAG= CAB= PE=	84.537.900 13.993.412 811.2
CAG (Custo anualizado investimento motor gerador) (R\$)	84.537.900	GIG= FRC= OM1=	41.000.000 0,1119 1,95 OM1 = OM/CI % SENDO CI= 41.000.000 OM= 800.000
CAB (GASTO ANUAL COM BAGAÇO (R\$/ano) - (R\$)	13.993.412	CB= CNB=	12,17 1.150.288
PE (Produção eletricidade pela planta (KWh/ano)	811.2	POT= T=	130 6.24
CAB1 (Gasto anual com bagaço) ( R\$/ano)	14.220.000	CIB= FRC= OM2=	120.000.000 0,1119 0,67 OM2 = OM/CI% SENDO CI= 120.000.000 OM= 800.000
CIG (Custo do investimento motor gerador - (R\$)	41.000.000		
OM1( Custo operação e manutenção (%/ano)	1,95		
CB ( Custo do bagaço) \ (ton/ano)	12,17	CAB1= PAB=	14.220.000 1.168.914
CNB (Consumo de bagaço) (ton/ano)	1.150.288		
FRC ( Fator de Recuperação de Capital)	0,1119		
OM2( Custo operação e manutenção (%/ano)	0,67		
CB ( Custo do bagaço) \ (ton/ano)	12,17		
CIB (Custo investimento em caldeiras) (R\$)	120.000.000		
PAB( Produção anual de bagaço) (t/ano)	1.168.914		