



**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

HENRIQUE VANDERLEI SOARES

**VIABILIDADE DE GERAÇÃO DE UMA USINA  
SUCROALCOOLEIRA**

Campina Grande, Paraíba  
Março de 2015

HENRIQUE VANDERLEI SOARES

VIABILIDADE DE GERAÇÃO DE UMA USINA  
SUCROALCOOLEIRA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Geração e venda de Energia

Orientador:

Professor Karcus Colaço Dantas.

Campina Grande, Paraíba  
Março de 2015

HENRIQUE VANDERLEI SOARES

VIABILIDADE DE GERAÇÃO DE UMA USINA  
SUCROALCOOLEIRA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade  
Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal de Campina Grande como parte dos requisitos  
necessários para a obtenção do grau de Bacharel em  
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Geração e venda de Energia

Aprovado em        /        /

**Professor Avaliador**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor Karcus Colaço Dantas**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à meus pais, minha namorada, meus irmãos e familiares que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar sempre presente em todos os momentos, guiando-me e confortando-me.

Aos meus pais Hélio e Alexlene, pelo amor incondicional, incentivo, dedicação, confiança e por me ensinarem a ser perseverante,

A minha namorada, pelo carinho, compreensão e por se fazer presente nesta jornada, incentivando-me a prosseguir.

Ao engenheiro Mauricio de Veras por me dar a oportunidade de estágio e todo acompanhamento possível.

A todo o pessoal da manutenção elétrica da Usina Caete S.A, principalmente a Jose Umberto, Javier, Ronaldo e Jadson por me proporcionaram momentos agradáveis nesses meses de estágio.

Ao professor Karcus Dantas que me orientou nesse trabalho e deu todo o apoio para seguir em frente.

E, por último, a todos os meus amigos de Campina Grande pelos excelentes momentos que vivi.

*“A persistência é o caminho do êxito.”*

Charles Chaplin

## RESUMO

O objetivo do presente trabalho é avaliar a viabilidade do fornecimento de energia elétrica através do processo de cogeração com bagaço de cana-de-açúcar na matriz energética brasileira. A cogeração é antiga no Brasil e que vem sendo usada há muito tempo, como forma de suprir as atividades das usinas produtoras de álcool e açúcar, já que seu principal insumo é o bagaço proveniente do processamento da cana. O setor sucroenergético projeta um grande crescimento da demanda de açúcar e etanol, significando também em aumento do bagaço disponível para produção de energia. O processo de cogeração a partir do bagaço da cana é eficiente e sustentável em termos ambientais, com grande potencial para complementar o parque hidroelétrico nacional, que dentro do cenário atual tem uma grande dependência na geração das usinas hidrelétricas, que ficam a mercê dos níveis pluviométricos e da topografia correta. O presente trabalho, realiza um estudo de caso de uma usina sucroalcooleira do estado de Alagoas onde se avalia o uso do bagaço da cana-de-açúcar na cogeração de energia elétrica, mostrando a importância para o setor sucroalcooleiro da comercialização do excedente de energia gerada.

**Palavras-chave:** Cogeração, comercialização de energia, eficiência turbina, eficiência caldeira.

## ABSTRACT

This work has the objective to evaluate the feasibility of electric energy supply by the process of cogenerating with sugarcane bagasse. It will be observed the advantages of this activity for the Brazilian energetic matrix and society and environment and the entrepreneur. The cogenerating process by the sugarcane is efficient and sustainable considering environmental matters. It has big potential to complement the national energetic park, which is in current scenario, highly dependent on hydroelectric power plants, which are dependent on rainfall levels and correct topography. The cogeneration is not a new method in Brazil. It has been used for many years as an alternative to supply energy for the plants of sugar and ethanol, as long as their main input it is the bagasse previous from the sugarcane processing. The sugar and ethanol sector projects a high raise on the demand of sugar and ethanol, which means also a raise on sugarcane bagasse for energy production. This current work realizes a case study of a sugar and ethanol plant in Alagoas state, Brazil. It is evaluated the use of sugarcane bagasse on cogeneration of electric energy by its combustion. It is also shown the importance for the sugar and ethanol sector to sell the extra amount of energy produced to the energetic market.

**Keywords:** Cogeneration process, efficiency steam generator, efficiency turbine, sale of electricity.



## SUMÁRIO

1	Introdução .....	1
2	Fundamentação teórica .....	2
2.1	Cogeração de energia elétrica .....	2
2.1.1	Preparo e Moenda.....	2
2.1.2	Caldeira e turbina .....	3
2.1.2.1	Caldeira.....	4
2.1.2.1	Turbina .....	4
2.1.3	Geradores Síncronos .....	6
2.2	Ambientes de Comercialização de energia .....	6
3	Cogeração de energia na Usina avaliada .....	8
3.1	Preparo de cana e moenda.....	8
3.2	Caldeira .....	9
3.2.1	Malhas de controle .....	10
3.2.1.1	Controle de pressão .....	10
3.2.1.2	Controle do nível da caldeira.....	10
3.2.1.3	Controle do Desaerador .....	11
3.2.1.4	Sistema de ar e gases .....	12
3.2.2	Quantidade de vapor gerado Caldeira 1 .....	13
3.2.3	Quantidade de vapor gerado na caldeira 3 .....	17
3.3	Turbinas à vapor .....	18
3.3.1.1	Turbo gerador 4 .....	18
3.3.1.1	Turbo gerador 3 .....	20
3.3.1.1	Turbo gerador 3 .....	22
3.4	Geradores .....	24
3.4.1	Características .....	25
3.4.1.1	Temperatura Ambiente .....	25
3.4.1.2	Altitude .....	25
3.4.1.3	Grau de proteção.....	26
3.4.1.4	Vibração.....	27

3.4.1.5	Sistema de refrigeração .....	28
3.4.1.6	Classe de isolamento e proteção térmica .....	28
3.4.1.7	Aterramento .....	29
3.4.1.8	Sistema de excitação.....	30
3.4.2	Gerador 4.....	31
3.4.3	Gerador 3.....	32
3.4.4	Gerador 2.....	33
4	Requisitos e contratos de energia.....	34
4.1	Requisitos de qualidade .....	34
4.2	Requisitos de medição e faturamento .....	36
4.2.1	Medidor de energia.....	37
4.3	Comercialização de energia .....	38
4.4	Contratos de irrigação .....	40
5	Análise de viabilidade.....	41
5.1	Quantidade de biomassa .....	42
5.2	Consumo de biomassa na caldeira 1 .....	43
5.2.1	Turbinas de contrapressão.....	44
5.2.1.1	Turbinas da moenda.....	44
5.2.1.2	Turbinas do preparo.....	44
5.2.1.3	Turbogerador G3 .....	47
5.2.1.4	Turbogerador G2 .....	47
5.3	Vazão de vapor na caldeira 3 .....	48
5.3.1.1	Turbogerador G4 .....	49
5.4	Geradores síncronos.....	50
5.4.1.1	gerador G2 .....	51
5.4.1.2	gerador G3 .....	51
5.4.1.3	gerador G4 .....	52
5.5	Consumo da indústria .....	53
5.6	Despesas da irrigação.....	55
5.7	Venda de energia .....	56
5.8	Viabilidade.....	57
6	Conclusão.....	59
	Referência Bibliográfica.....	60
	APÊNDICE A .....	62
	Anexo A.....	63

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Cogeração de energia .....	1
Figura 2: Ciclo Rankine.....	3
Figura 3: Moenda .....	9
Figura 4: Controle de nível tubulão .....	11
Figura 5: Desaerador da caldeira de 42 bar .....	12
Figura 6: Sistema de ar e gases caldeira 67 bar .....	13
Figura 7: Cálculo do PCI.....	14
Figura 8: Ábaco de eficiência da caldeira .....	15
Figura 9: Planilha fornecida pelo fabricante.....	17
Figura 10: Turbo geradores .....	18
Figura 11: Curva vazão x potência tbg 4 .....	20
Figura 12: Curva vazão x potência do TBG 2 .....	22
Figura 13: Curva vazãoX potencia do tBG 3 .....	24
Figura 14: Variação da potência com altitude e temperatura .....	26
Figura 15: Refrigeração DO G2 .....	28
Figura 16: Excitação bruchless.....	30
Figura 17: Painel de medição e faturamento .....	37
Figura 18: Medidor de energia .....	38
Figura 19: PLD .....	40
Figura 20: Desconto de irrigação.....	41
Figura 21: Redutoras das caldeiras .....	43
Figura 22: Comportamento da turbina da moenda e a esquerda zoom da escala .....	44
Figura 23: Comportamento turbina preparo de cana .....	45
Figura 24: Aproximação por triângulos .....	45
Figura 25: Aproximação cana inteira .....	46
Figura 26: Tempo do TBG 4 com extração habilitada .....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ambientes de comercialização de energia.....	7
Tabela 2: Característica da caldeira de 42 bar .....	16
Tabela 3: Característica caldeira 67 bar .....	18
Tabela 4: Sobrecarga de acordo com a temperatura.....	25
Tabela 5: Grau de proteção.....	27
Tabela 6: Limites de vibração .....	28
Tabela 7: Variação da temperatura .....	29
Tabela 8: Dados gerador G4.....	32
Tabela 9: Dados g3 .....	33
Tabela 10: Dados g2.....	34
Tabela 11: Faixa de tensão .....	35
Tabela 12: Flutuação de tensão .....	35
Tabela 13: Nível de DHT .....	35
Tabela 14: Distorção harmônica individual de tensão.....	36
Tabela 15: Contrato de venda de energia .....	39
Tabela 16: MUSD contratado.....	40
Tabela 17: Cana esmagada no mês de novembro.....	42
Tabela 18: Consumo de vapor de 26 bar .....	49
Tabela 19: Potência dos turbogeradores .....	50
Tabela 20: Subgrupo.....	53
Tabela 21: Consumo mês de novembro .....	55
Tabela 22: Produção e consumo.....	55

# 1 INTRODUÇÃO

De acordo com dados do balanço energético nacional mais recente, datado de 2014, o consumo de energia elétrica está em crescimento - aumento de 2,2 % no consumo de energia elétrica no ano de 2014 em relação a 2013. Somado a isso, a seca que atinge grande parte do Brasil dificulta a produção de energia elétrica uma vez que a principal fonte no Brasil são as hidrelétricas. Nesse contexto, uma alternativa promissora é a cogeração através do bagaço da cana-de-açúcar, que geram energia pra consumo próprio e comercializa o excedente. O presente trabalho mostra como ocorre o processo da cogeração em usinas sucroalcooleiras que utiliza o calor no processo para produzir açúcar e álcool e utiliza a energia eletromecânica na produção de energia elétrica.

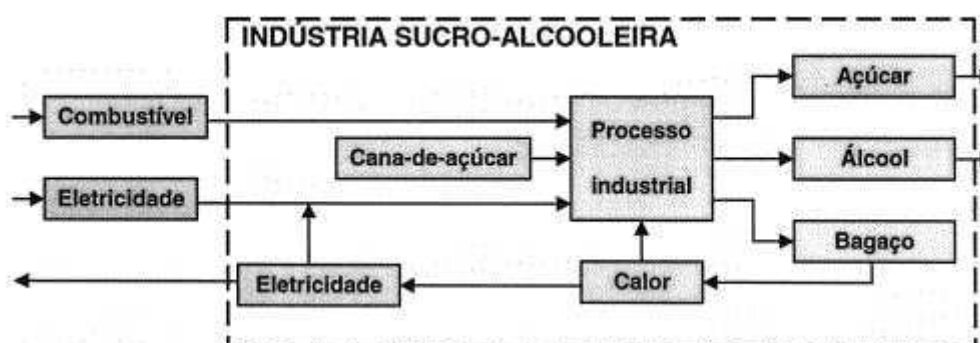


FIGURA 1: COGERAÇÃO DE ENERGIA

(FONTE: : [HTTP://PROVAS-BIOLOGIA-ENEM.BLOGSPOT.COM.BR/2013/08/PROVA-BIOLOGIA-ENEM-2004.HTML](http://provas-biologia-enem.blogspot.com.br/2013/08/prova-biologia-enem-2004.html))

O trabalho ainda abordará ainda requisitos que tais empresas acessantes ao sistema elétrico tem que cumprir, ao negociar contratos de venda de energia. Por fim é analisado a viabilidade econômica para uma usina sucroalcooleira, a partir do rendimento da moagem, da eficiência das caldeiras, turbinas e geradores da planta. É incluído ainda estudos de contrato do uso do sistema de distribuição, contratos de venda de energia no ambiente de contratação livre(ACL) e de curto prazo.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada uma breve revisão sobre cogeração de energia, abordando seus principais equipamentos - caldeira, turbina e gerador. Serão abordados também os meios e métodos para a comercialização da energia.

### 2.1 COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

As necessidades energéticas de uma destilaria e uma fabricação de açúcar autônomas, relacionadas às demandas de calor, eletricidade e energia mecânica, são atendidas pela planta de cogeração que consome a biomassa residual gerada no processo [1]. Essa biomassa é consumida em caldeiras que fornecem vapor aos turbogeradores em alta pressão e a transforma em energia mecânica e em vapor a baixa pressão, normalmente a 2,5 bar, que são usados como fonte de calor para processos de tratamento e evaporação do caldo e destilação do etanol.

#### 2.1.1 PREPARO E MOENDA

Esta seção da fábrica tem a finalidade de condicionar a cana (limpeza e abertura das células) e extrair o caldo com um mínimo de perda de açúcares da cana, bem como reduzir a umidade final do bagaço[2]. O processo de preparo tem início com os tombadores que descarregam a cana na mesa de alimentação sendo a cana transportada por esteiras até os equipamentos de preparo; picadores, niveladores e desfibradores.

Na saída do desfibrador, a altura do colchão de cana é uniformizada e segue para o processo de moagem. A moagem é um processo de extração do caldo que consiste em fazer a cana passar por rolos, com uma pressão pré-estabelecida extraindo o caldo, como também produzindo bagaço, no final do processo, com um grau de umidade que permita sua utilização como combustível nas caldeiras.

### 2.1.2 CALDEIRA E TURBINA

O processo de obtenção de vapor é feito em um ciclo, que converte calor em trabalho. As plantas de cogeração mais comuns são concebidas com caldeira e turbina a vapor, utilizando o ciclo termodinâmico de Rankine. O combustível, fonte de toda a energia produzida pela planta, é introduzido para queima numa caldeira e o vapor gerado, de alta pressão, é levado a uma turbina a vapor, de contrapressão ou de condensação com extração, que aciona o gerador elétrico.

A figura 2 ilustra o funcionamento de geradores de vapor, ou caldeiras, sendo estes responsáveis por fornecer o vapor em alta pressão que são utilizados pelo processo. Para serem utilizados, no entanto é necessário um rebaixamento da pressão que se dá por meio das turbinas ou de válvulas condicionadoras de vapor. Durante o processo essa pressão vai a pressões e temperaturas menores até que condensa, voltando novamente a alimentar as caldeiras.

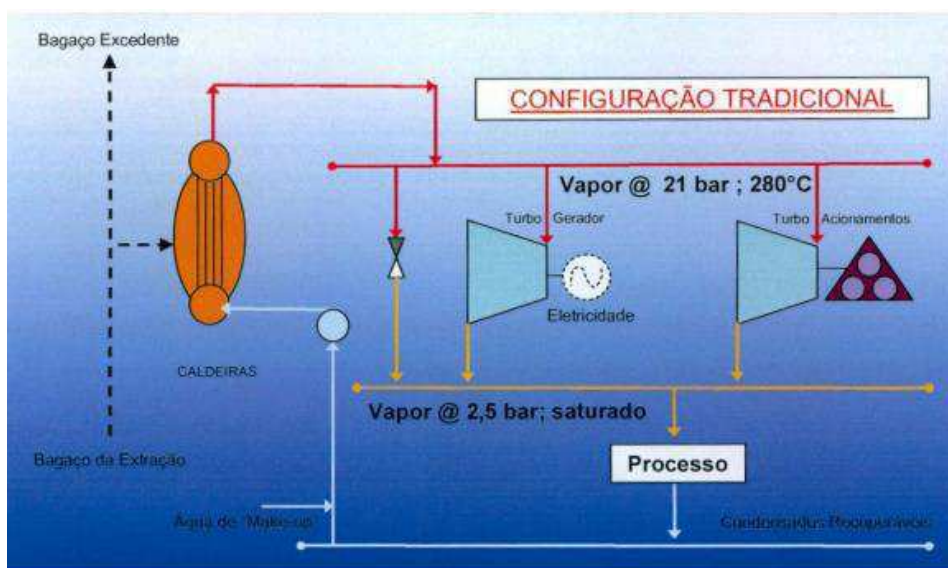


FIGURA 2: CICLO RANKINE

(FONTE:[http://www.ariae.org/download/cursos/vi\\_curso\\_ariae/pdf93.pdf](http://www.ariae.org/download/cursos/vi_curso_ariae/pdf93.pdf))

As turbinas ao receber o vapor de alta pressão além de rebaixar o vapor ainda é responsável por girar os eixos das turbinas que encontram-se acopladas aos Geradores através dos redutores de velocidade.

### 2.1.2.1 CALDEIRA

Uma caldeira é que um recipiente metálico cuja função é a produção de vapor através do aquecimento da água. As caldeiras, em geral, são empregadas para alimentar máquinas térmicas como turbinas.

Os sistemas de cogeração mais eficientes em operação no setor de cana-de-açúcar nacional são ciclos a vapor que trabalham com vapor vivo a 65 bar de pressão (variando entre 60 e 65 bar na maioria dos casos) e 480°C de temperatura. Existem diversas consultas de usinas para viabilizar sistemas que operem a mais de 80 bar de pressão, embora as vendas ainda se concentrem em sistemas de 42 e 65 bar. Outro fator a ser considerado para o aumento da eficiência na conversão elétrica é a temperatura do vapor gerado nas caldeiras. Em caldeiras de 65 bar a temperatura máxima chega a 520°C e essa limitação é devido a temperatura suportável pelas chapas de inox.

No que se refere à capacidade de geração de vapor das caldeiras que alimentam plantas sucro-alcooleiras, a maior parte das vendas destina-se a caldeiras de capacidade de geração de vapor de 150 a 250 t/h e eficiência próxima de 85% (base poder calorífico inferior(PCI)).

### 2.1.2.1 TURBINA

Turbinas a vapor são máquinas térmicas que utilizam a energia do vapor sob forma de energia cinética. Ela é a responsável por transformar toda energia térmica e de pressão contida no vapor em energia mecânica. Essa transformação deve ser feita em duas etapas.

Na primeira etapa, a energia do vapor é transformada em energia cinética. Para isso o vapor é obrigado a escoar através de pequenos orifícios, de formato especial, denominados expansores, onde, devido à pequena área de passagem, adquire alta velocidade, aumentando sua energia cinética, mas diminuindo, em consequência, sua entalpia (energia). Em um expansor, além do aumento de velocidade e da diminuição da entalpia, ocorrem também queda na pressão, queda na temperatura e aumento no volume específico do vapor.



Na segunda etapa da transformação, a energia cinética obtida no expensor é transformada em trabalho mecânico, onde a força de ação do jato de vapor irá deslocar o rotor.

Sabe-se, da 2ª Lei da Termodinâmica, que somente parte da energia contida no vapor que chega à máquina poderá ser convertida em trabalho (a chamada exergia). A parte restante da energia, que não pode ser transformada em trabalho (a anergia), permanece no vapor descarregado pela máquina. No caso de plantas sucroalcooleiras, a anergia, conhecido na planta como vapor de escape, é tão importante quanto a exergia visto que ela fornece toda energia térmica usada pra fabricação de açúcar e etanol.

Da segunda lei da termodinâmica temos:

$$w = (h_1 - h_2) + \left( \frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \right) + z_1 - z_2 \quad (1)$$

onde

$h_1$ : entalpia do vapor na entrada da máquina:  $\left[ \frac{KJ}{KW} \right]$

$h_2$ : entalpia do vapor na saída ou descarga da máquina:  $\left[ \frac{KJ}{KW} \right]$

$\frac{V_1^2}{2g}$  : é a energia cinética

$z_1$  é a energia potencial

$w$  : entalpia

Pelo fato de não haver grandes variações de energia cinética e potencial, temos que:

$$w = (h_1 - h_2) \quad (2)$$

A potência da turbina à vapor pode ser definida como sendo:

$$W = m (h_1 - h_2) \quad (3)$$

onde,  $m$  é a vazão em massa de vapor.

### 2.1.3 GERADORES SÍNCRONOS

Os geradores são máquinas síncronas constituídas pelo rotor e estator. No rotor está montado o enrolamento indutor que ao ser percorrido por uma corrente contínua cria um campo magnético intenso. No estator são montados os enrolamentos induzidos onde é realizada a conversão eletromecânica de energia.

No funcionamento como gerador, os condutores são fixos na armadura e o campo magnético é forçado pela máquina primária a se mover. Por sua vez, a máquina primária é acoplada mecanicamente ao rotor onde estão alojados os pólos e exerce sobre eles uma força fazendo-os girar. O movimento relativo entre o campo e o condutor faz com que surja uma tensão nos terminais do gerador. Ao ser ligado a uma carga a tensão induzida faz com que circule corrente pelo gerador e pela carga. A potência mecânica transferida pela máquina primária é assim convertida em energia elétrica (descontadas as perdas). O enrolamento de campo (alojado nos pólos) é alimentado por uma fonte de corrente contínua por meio de anéis deslizantes. Existem sistemas em que não existem anéis e escovas, sendo que a tensão contínua necessária ao enrolamento de campo é fornecida por meio de um sistema de excitação estático (brushless), formado por uma ou mais excitatrizes montadas no eixo e por dispositivos a base de semicondutores. O gerador síncrono produz uma tensão do tipo alternada senoidal, podendo ser monofásica ou trifásica. [3]

O que caracteriza as máquinas síncronas é porque a frequência elétrica produzida está sincronizada com a velocidade do gerador. Tal frequência pode ser dada por:

$$f = \frac{n_s \cdot P}{120} \quad (4)$$

onde:

$f$ : frequência da rede

$n_s$ : velocidade do rotor

$P$ : número de polos

## 2.2 AMBIENTES DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA

A comercialização de energia no Brasil é realizada em duas esferas de mercado: o Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e o Ambiente de Contratação Livre (ACL). Todos os contratos, sejam do ACR ou do ACL, têm de ser registrados na CCEE, e servem de base para a contabilização e liquidação das diferenças no mercado de curto prazo. [4]. A seguir temos uma tabela onde se compara o ACR e o ACL.

	Ambiente livre	Ambiente regulado
Participantes	Geradoras, comercializadoras, consumidores livres e especiais	Geradoras, distribuidoras e comercializadoras. As comercializadoras podem negociar energia somente nos leilões de energia existente -- (Ajuste e A--1)
Contratação	Livre negociação entre os compradores e vendedores	Realizada por meio de leilões de energia promovidos pela CCEE, sob delegação da Aneel.
Tipo de contrato	Acordo livremente estabelecido entre as partes	Regulado pela Aneel, denominado Contrato de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado (CCEAR)
Preço	Acordado entre comprador e vendedor	Estabelecido no leilão

TABELA 1: AMBIENTES DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA

Todos os contratos de compra e venda de energia devem ser registrados na CCEE- tanto no ACR como no ACL - que realiza a medição dos montantes produzidos/consumidos por cada agente. As diferenças apuradas são contabilizadas para posterior liquidação financeira no Mercado de Curto Prazo e valoradas ao preço da liquidação da diferença (PLD).

Assim, o Mercado de Curto Prazo pode ser definido como o segmento da CCEE onde são contabilizadas as diferenças entre os montantes de energia elétrica contratados pelos agentes e os montantes de geração e de consumo efetivamente verificados e atribuídos aos respectivos agentes[4]. Nesse mercado não existe contrato, ocorrendo a contratação multilateral conforme as regras de comercialização.

Neste estudo, analisaremos uma usina sucroalcooleira, que comercializa sua energia excedente estabelecendo contratos nos ambientes de contratação livre e mercado de curto prazo.

### 3 COGERAÇÃO DE ENERGIA NA USINA AVALIADA

O processo de cogeração adotado nas usinas sucroalcooleiras utiliza o bagaço da cana que são resíduos no processo de fabricação de açúcar e álcool como combustível para as caldeiras que acionam as turbinas à vapor. Esta por sua vez são utilizadas para acionar os geradores. A bioeletricidade, como é chamada a energia produzida a partir da biomassa, é então um terceiro produto a ser negociado por estas usinas com as concessionárias de energia.

O processo de venda de energia das usinas sucroalcooleiras inicia-se no campo, com a retirada da cana e finaliza-se com a venda de energia a um preço estabelecido em contrato. Nesse capítulo analisaremos o processo de cogeração em uma usina de açúcar e álcool, abordando desde o preparo da cana até a produção de energia.

#### 3.1 PREPARO DE CANA E MOENDA

O cana que chega nos caminhões, depois de pesada, é retirada através de tombadores e segue para ser lavada por água proveniente do tratamento de efluentes. Esse processo de lavagem da cana é responsável por retirar as primeiras sujeiras da cana como areia, por exemplo. Depois de ter sido lavada a cana segue por uma esteira metálica passando por um desfibrador, dois picadores até chegar nos ternos da moenda onde de fato a moagem ocorre.

A moagem se dá em seis ternos onde destes 5 são turbinas e um motor de 700 cv. Existem ao longo do caminho bombas de embebição pra melhorar o rendimento da moagem. Estas bombas fazem com que o caldo que foi extraído do sexto terno passe para o quinto, do quinto passe pelo quarta e assim sucessivamente até que o caldo que chegue a segunda turbina (Caldo secundário) seja bombeado para o processo de fabricação de açúcar. No último terno o que sobra é o bagaço que segue pra caldeira.



FIGURA 3: MOENDA

A capacidade de moagem de uma usina típica é de 12 milhões de toneladas por dia. Desta maneira temos:

$$\text{Capacidade de moagem por dia} = 12.000 \text{ toneladas}$$

$$\begin{aligned} \text{Capacidade de moagem por hora} &= \frac{12.000 \text{ toneladas}}{24} \quad (5) \\ &= 500 \text{ ton/h} \end{aligned}$$

Segundo dados da empresa, através de análises laboratoriais, verifica-se que apenas 30% da cana é constituído de fibra. No nosso estudo a fibra é o que de fato interessa uma vez que este será o combustível a ser queimado na caldeira.

$$\text{Quantidade de fibra} = \frac{30}{100} \times 500 = 150 \text{ ton/h} \quad (6)$$

A partir desse momento, sempre que nos referirmos a bagaço, ficará subentendido que é a fibra que o bagaço contém.

## 3.2 CALDEIRA

A usina tem em suas instalações duas caldeiras, uma de 42 bar do tipo grelha rotativa e outra de 67 bar onde a queima ocorre por suspensão. Tais caldeiras são as

responsáveis por todo o fornecimento de vapor para as máquinas térmicas (turbina das moendas e turbo geradores).

### 3.2.1 MALHAS DE CONTROLE

#### 3.2.1.1 CONTROLE DE PRESSÃO

O conhecimento das pressões em uma caldeira é obrigatório, não só sob o ponto de vista de segurança como também para uma operação econômica e segura. Cada caldeira tem uma capacidade de pressão determinada, que, por norma deve ter um instrumento de indicação extremamente visível, com escala também extremamente visível, e situar-se em local de fácil observação do operador. A pressão máxima de funcionamento da caldeira deverá estar sempre marcada sobre a escala do manômetro, com um traço feito à tinta vermelha, para servir de alerta ao operador para controle da pressão. [5]

Estas caldeiras contam com transmissores de pressão, denominado de master, e a partir deles ocorrem a dosagem de bagaço. Dessa maneira, caso a pressão esteja com um valor inferior ao set-point, o controlador PID(proporcional-integrativo-derivativo) enviará um sinal pra aumentar a rotação dos dosadores de bagaço.

#### 3.2.1.2 CONTROLE DO NÍVEL DA CALDEIRA

A circulação de água é fundamental para a operação e funcionamento contínuo da caldeira aquatubular. É ela que permite o fluxo mássico do vapor para o tubulão superior, e sua conseqüente separação e acúmulo, bem como a renovação da massa de água aquecida que irá se vaporizar.

Dessa maneira, o controle de nível deve manter o tubulão idealmente em 50% de sua capacidade. Para isso ele tem dois sensores de nível, um com funcionamento redundante, que é responsável pela medição do nível e uma válvula de controle como elemento final de controle. Dessa maneira temos três possibilidades:

- i. Nível abaixo de 50% - Quando isso ocorre a válvula de controle tende a abrir, para manter o nível em 50% necessitando para isso de uma vazão de água que seja capaz de gerar o vapor e ainda elevar o nível do tubulão.

- ii. Nível em 50% - Quando isso ocorre, a válvula de controle tende a se estabilizar para manter o nível contante.
- iii. Nível acima de 50% - - Quando isso ocorre a válvula de controle tende a fechar para manter o nível em 50% para que a vazão de vapor seja superior a de água e conseqüentemente o nível decresça.

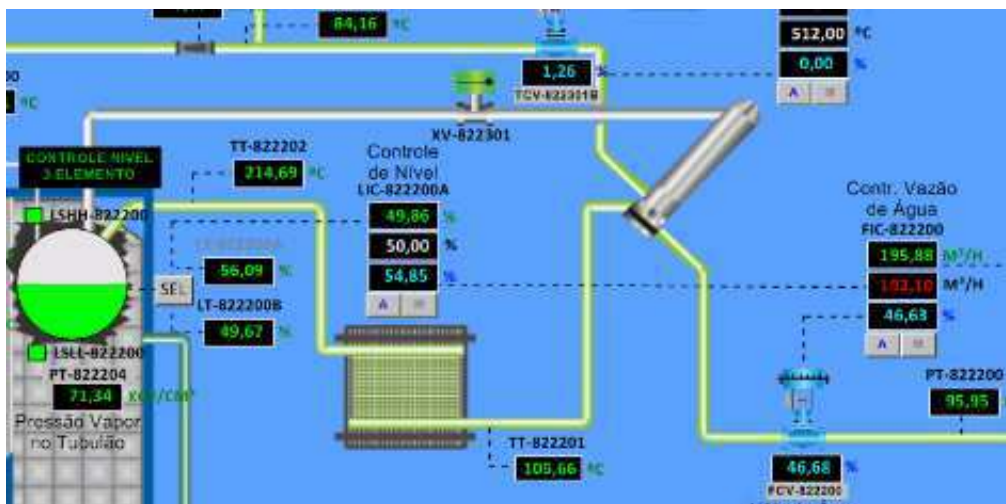


FIGURA 4: CONTROLE DE NÍVEL TUBULÃO

### 3.2.1.3 CONTROLE DO DESAERADOR

Um desaerador é um dispositivo que elimina gases dissolvidos, tais como o dióxido de carbono e oxigênio. Tais equipamentos recebem água do sistema de tratamento e a enviam a caldeira. A desaeração é feita com o propósito de prevenir a corrosão ajudando a reduzir a manutenção na planta.

O desaerador utilizado para as caldeiras 1 e 3 são do tipo pulverização onde são gerados sprays de água. Em muitos casos, o pulverizador é introduzido primeiro para uma seção pré-aquecida, o que eleva a temperatura para ajudar na libertação de oxigênio e outros gases. Estes gases são libertados por meio de um respiradouro na parte superior. Um tanque de armazenamento é posicionado abaixo da desaerador para receber a água de alimentação processada. [6]

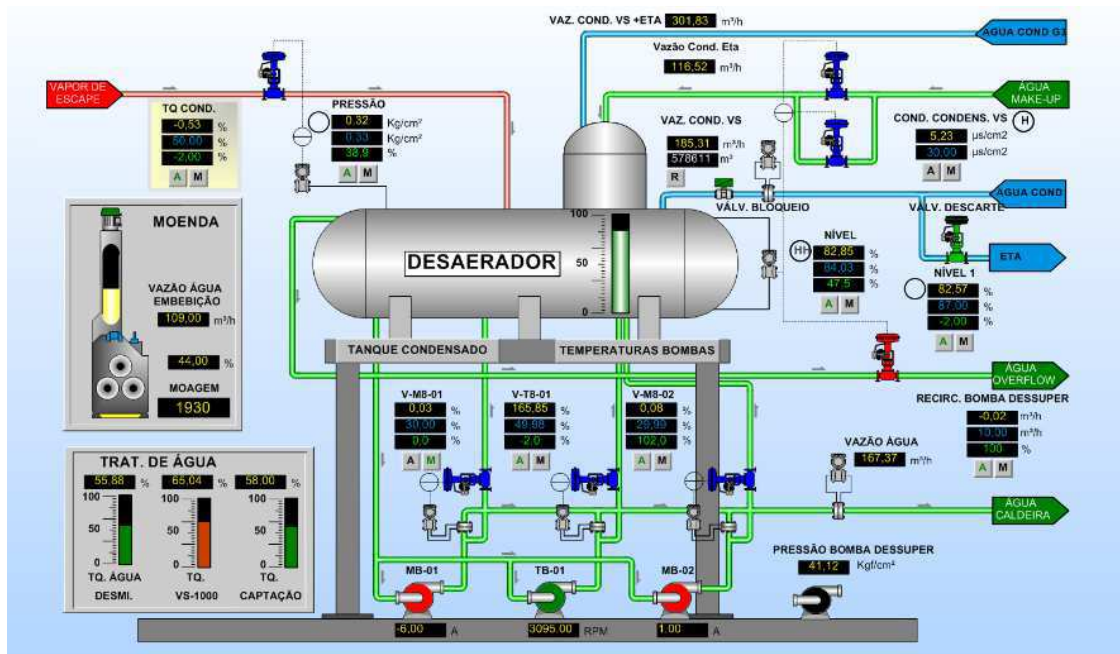


FIGURA 5: DESAERADOR DA CALDEIRA DE 42 BAR

### 3.2.1.4 SISTEMA DE AR E GASES

Nas caldeiras ainda existem controles específicos que melhoram a eficiência da caldeira. Um controle de extrema importância é o da temperatura de saída dos gases de combustão. Para o controle dessa malha existem o ar primário e o ar secundário. O ar primário, que contém oxigênio, sendo responsável por elevar a temperatura da fornalha. Já o ar secundário é um ar pobre, que não contém oxigênio, dessa maneira sua função é apenas de gerar a turbulência bem como resfriar a caldeira.

Os gases ao sair da caldeira atingem temperatura de aproximadamente 400°C e troca calor com a água de alimentação e o ar primário aumentando a eficiência da caldeira.



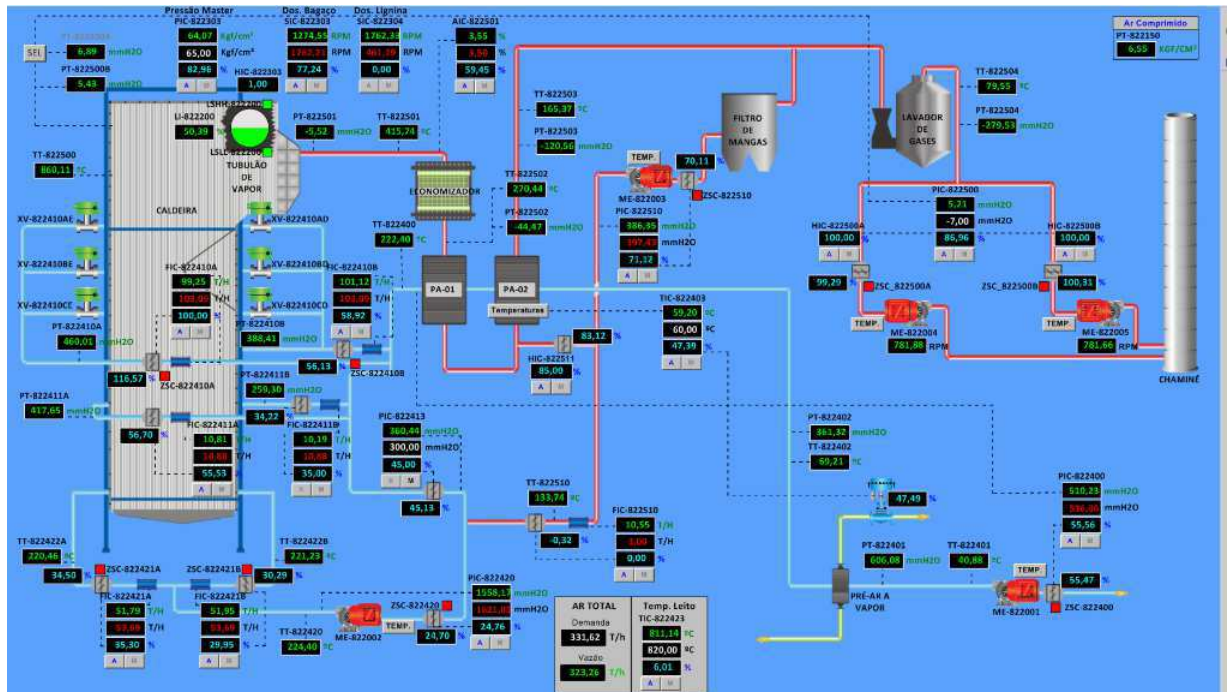


FIGURA 6: SISTEMA DE AR E GASES CALDEIRA 67 BAR

### 3.2.2 QUANTIDADE DE VAPOR GERADO CALDEIRA 1

Os controles mostrados acima são de fundamental importância quando se necessita determinar o rendimento das caldeiras. O PCI do bagaço pode ser obtido através do ábaco uma vez que são conhecidos os parâmetros abaixo:

- i. Sacarose do bagaço = 2,5
- ii. Umidade do bagaço = 50%

Observando esses parâmetros, podemos utilizar o ábaco pra termos uma ideia do valor do PCI.

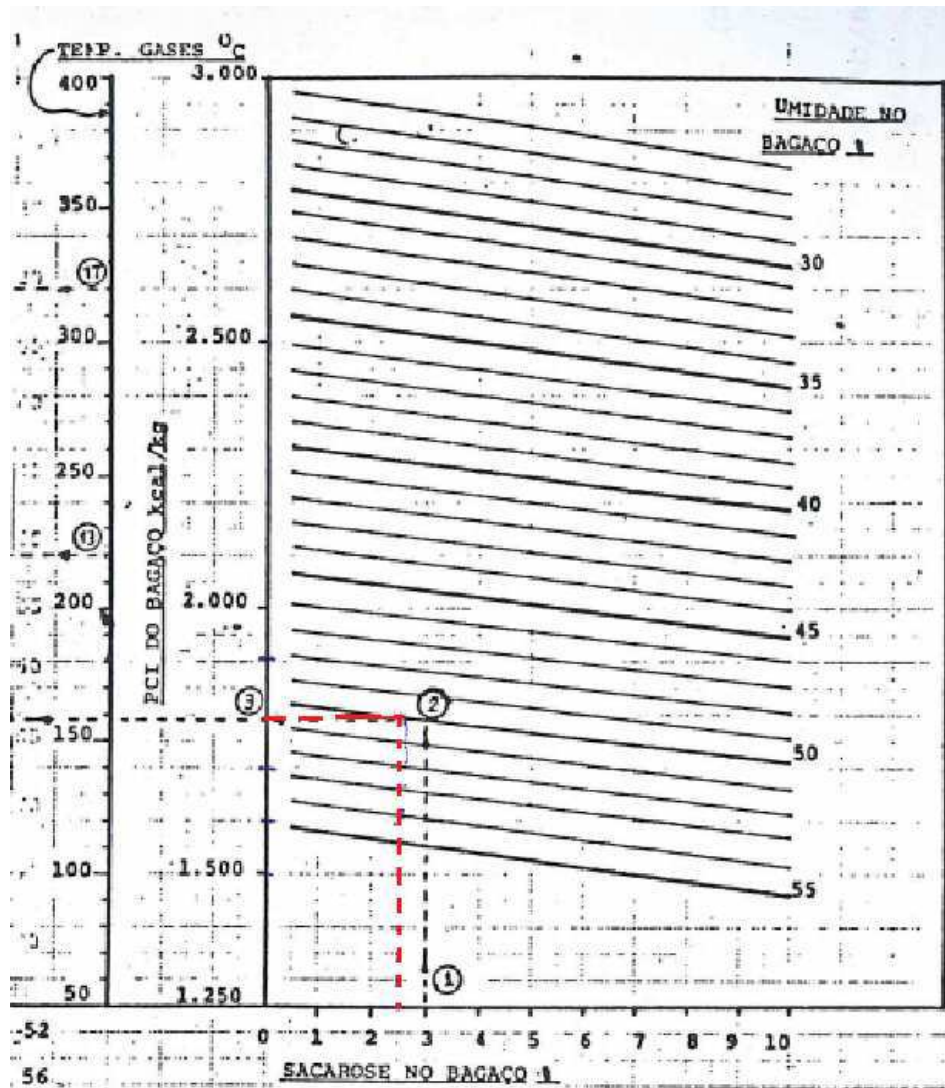


FIGURA 7: CÁLCULO DO PCI

O PCI observado é aproximadamente:

$$PCI = 1800 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \quad (7)$$

#### 1) Rendimento ao PCI

O valor do rendimento da caldeira pode ser obtido também pelo ábaco necessitando apenas o conhecimento prévio dos seguintes parâmetros:

Excesso de ar = 30%

Temperatura dos gases = 200°C

Tipo de caldeira: Grelha rotativa

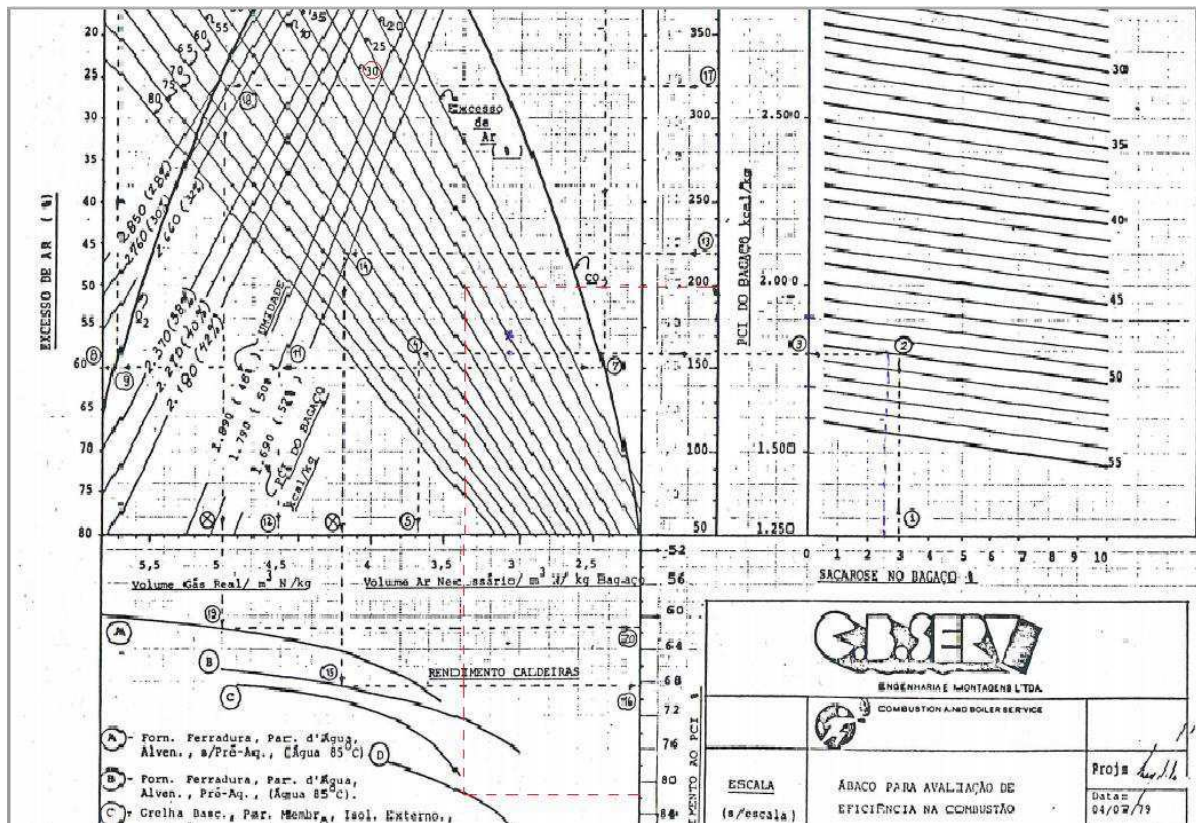


FIGURA 8: ÁBACO DE EFICIÊNCIA DA CALDEIRA

A partir do ábaco podemos observar que o rendimento dessa caldeira é de aproximadamente:

$$\eta = 82\%$$

2) Vapor gerado

Para determinação desse parâmetro temos que conhecer a entalpia do vapor à pressão e temperatura de operação. A partir da tabela termodinâmica podemos observar:

$$iv = 3419,41 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Sendo  $1\text{J} = 0,239 \text{ cal}$ , temos que

$$iv = 3419,41 \times 0,239 = 817,239 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \quad (8)$$

Dessa maneira, sabendo que:

$$temp_{agua_{alim}} = 105^{\circ}C$$

e que

$$qv = \frac{PCI * \eta}{iv - tag} \quad (9)$$

onde

qv : quantidade de vapor e kg de vapor por kg de bagaço

PCI: Poder calorífico inferior em kcal/kg

$\eta$ : rendimento

tag: temperatura da água de alimentação em °C

Dessa maneira temos que:

$$qv = \frac{1800 \times 0,82}{817,239 - 105} \quad (10)$$

$$qv = 2,07 \frac{kgv}{kgb}$$

As características da caldeira 1, podem ser vista abaixo:

Características caldeira 42 bar	
Pressão de operação	42 bar
Temperatura do vapor	420°C
Temp. Água de alimentação	105°C
Combustível	Bagaço
Umidade do combustível	50%
Excesso de ar	30%
Circulação de água	Natural

TABELA 2: CARACTERÍSTICA DA CALDEIRA DE 42 BAR

### 3.2.3 QUANTIDADE DE VAPOR GERADO NA CALDEIRA 3

Nessa caldeira, para determinar a eficiência foi utilizada uma planilha excel do fabricante. A partir de dados do fabricante obtivemos a relação de tonelada de vapor por tonelada de bagaço.

$$\frac{Ton_{vapor}}{Ton_{baga}} = \frac{200000}{91550} = 2,18 \quad (11)$$

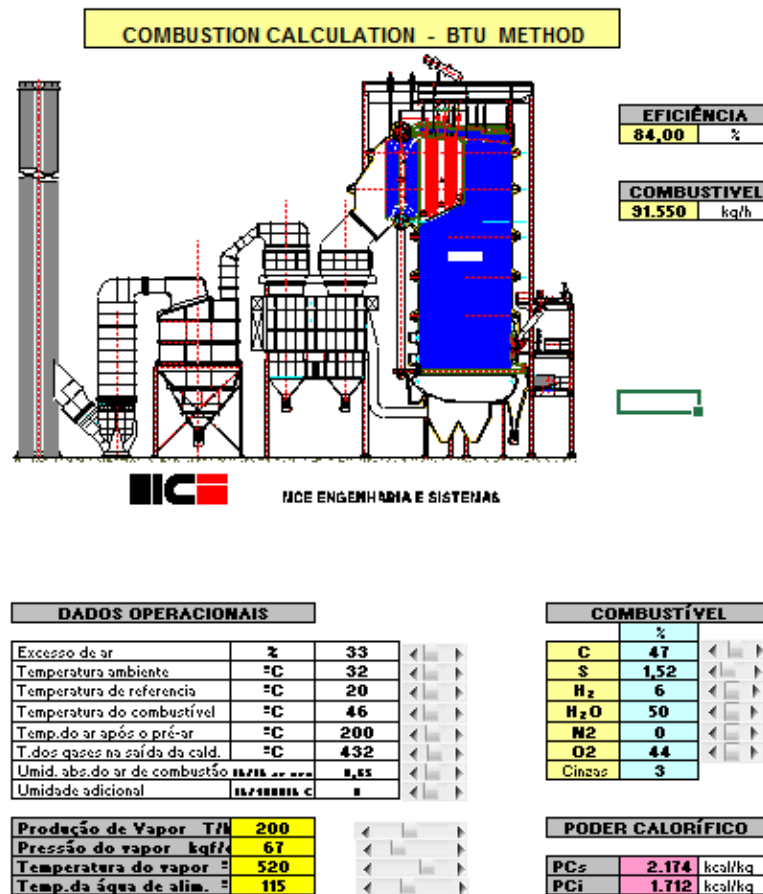


FIGURA 9: PLANILHA FORNECIDA PELO FABRICANTE

As características da caldeira 3, podem ser vista abaixo:

Características caldeira 67 bar	
Pressão de operação	67 bar
Temperatura do vapor	520°C
Temp. Água de alimentação	115°C
Combustível	Bagaço



Umidade do combustível	50%
Excesso de ar	33%
Circulação de água	Natural

TABELA 3: CARACTERÍSTICA CALDEIRA 67 BAR

### 3.3 TURBINAS À VAPOR

Na planta em estudo existem 12 turbinas, sendo estas responsáveis por cargas de suma importância na planta, como alimentação de água da caldeira e desaerador, turbinas utilizadas na preparação da cana e moenda e os turbogeradores. Será dado ênfase aos turbogeradores os quais podem ser vistos na figura 10.



FIGURA 10: TURBO GERADORES

#### 3.3.1.1 TURBO GERADOR 4

A eficiência é estudada para um caso prático, onde os seguintes dados de operação foram visualizados:

Pressão de admissão = 65,04 bar

Temperatura do vapor de admissão = 504°C

Pressão vapor de escape = -0,68 bar

Temperatura vapor de escape = 74,51°C

Vazão vapor de admissão = 47,99 ton/h

Potencia no eixo da turbina = 9,24MW

Dessa maneira, observando a entalpia na entrada e na saída da máquina temos:

$$h_1 = 3426,86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 = 2634,63 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

onde  $h_1$  é a entalpia na entrada da máquina e  $h_2$  a entalpia na saída da máquina.

A energia interna contida na máquina é dada por:

$$W = m(h_1 - h_2) \quad (12)$$

$$W = \frac{47,99 \cdot 10^3}{3600} (3426,86 - 2634,63) \quad (13)$$

$$W = 10,56 \text{ MW}$$

Observando a potência no eixo, temos que:

$$Eficiencia = \frac{Pot_{eixo}}{Ener_{int}} \quad (14)$$

$$Eficiencia = \frac{9,24}{10,56}$$

$$Eficiencia = 87,49\%$$

Essa eficiência baixa se deve a falhas nos injetores que não estão conseguindo manter o vácuo estabelecido no projeto de -0,99 bar.

Para análise dos turbo geradores feito no capítulo a frente será utilizada o gráfico fornecido pelo fabricante que apresenta respostas concisas para as condições de projeto especificadas. Apesar das condições no turbo gerador não serem exatamente as de projeto, os erros são baixos e por esse motivo optou-se por utilizar a curva do fabricante que pode ser vista na figura 11:

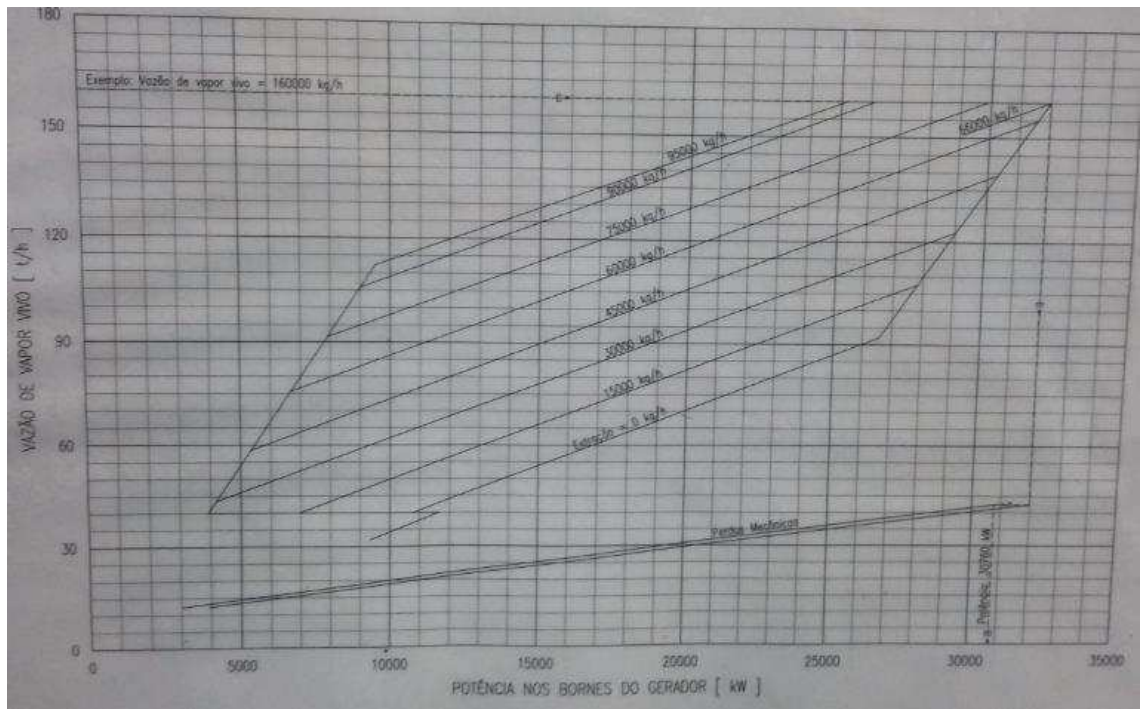


FIGURA 11: CURVA VAZÃO X POTÊNCIA TBG 4

### 3.3.1.1 TURBO GERADOR 3

A turbina do gerador G3 como dito anteriormente, é uma turbina de contrapressão, alimentada em 65,2 bar a uma temperatura de 515°C e uma pressão de escape de 2,5 bar absoluto.

A eficiência da turbina será estudada para a situação real, onde temos

Pressão de admissão = 63,2

Temperatura de admissão = 503,9°C

Pressão de escape = 1,43 bar

Temperatura de escape = 186,7°C

Vazão mássica de vapor = 64,74 ton/h

Potencia no eixo = 10,01 MW



Dessa maneira, observando a entalpia na entrada e na saída da máquina temos:

$$h_1 = 3427,39 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 = 2841,57 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

onde  $h_1$  é a entalpia na entrada da máquina e  $h_2$  a entalpia na saída da máquina.

A energia interna contida na máquina é dada por:

$$W = m(h_1 - h_2) \quad (15)$$

$$W = \frac{64,74 \cdot 10^3}{3600} (3427,39 - 2841,57)$$

$$W = 10,53 \text{MW}$$

Observando a potência no eixo, temos que:

$$Eficiencia = \frac{Pot_{eixo}}{Ener_{int}} \quad (16)$$

$$Eficiencia = \frac{10,01}{10,53}$$

$$Eficiencia = 95,01\%$$

Para análise dos turbo geradores feito no capítulo a frente será utilizada o gráfico fornecido pelo fabricante que apresenta respostas concisas para as condições de projeto especificadas. Apesar das condições nos turbogeradores não serem exatamente as de

projeto, os erros são baixos e por esse motivo optou-se por utilizar a curva do fabricante, a qual pode ser vista na figura 12:

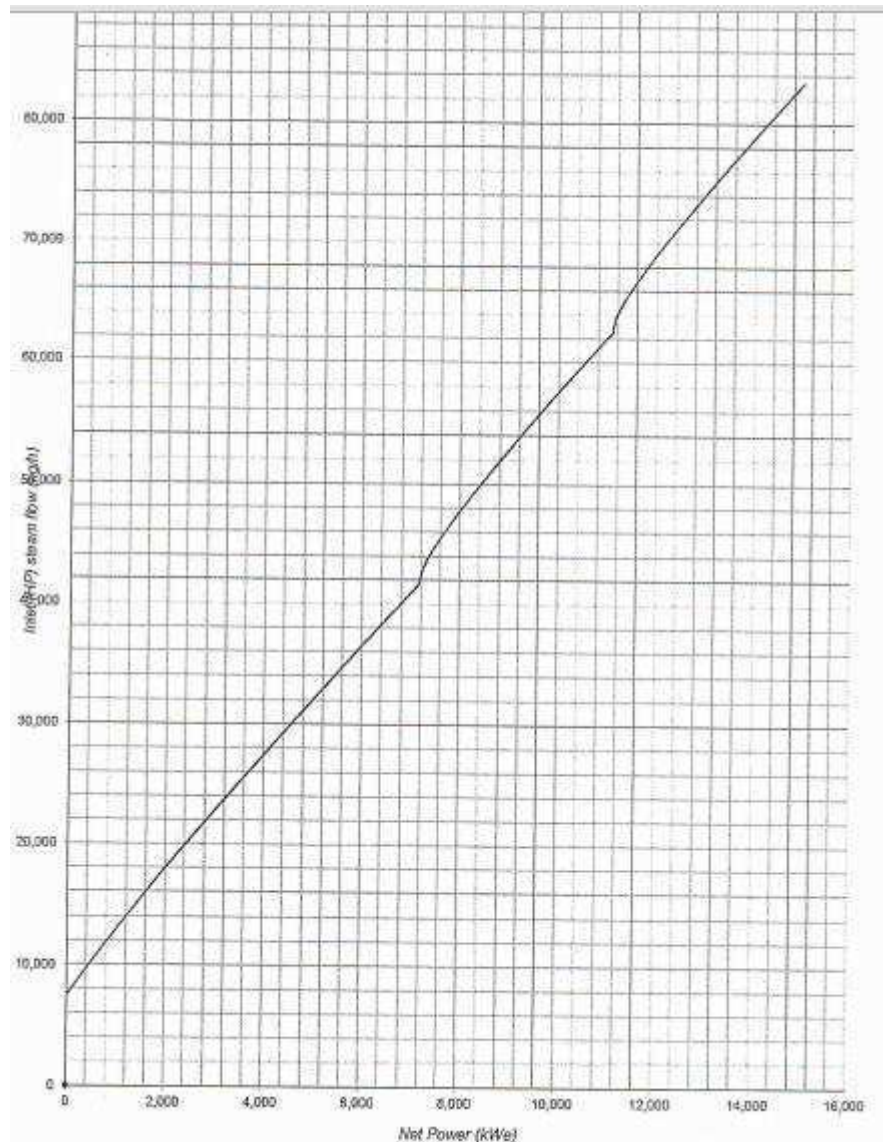


FIGURA 12: CURVA VAZÃO X POTÊNCIA DO TBG 2

### 3.3.1.1 TURBO GERADOR 3

A turbina do gerador 2, assim como a turbina do gerador 3, é uma turbina de contrapressão. Nessa turbina a pressão de admissão ocorre a 42 bar e temperatura de 495°C e sua pressão de escape ocorre a 2,5 bar. Assim como o G3 necessita da selagem para que o vapor do interior da turbina não sai da mesma.

A eficiência da turbina será estudada para um caso real, onde os seguintes dados foram obtidos:

P admissão = 42,4 bar

P escape = 1,5 bar

Temperatura admissão = 426,3°C

Temperatura de escape = 185,8°C

Vazão mássica de vapor = 66,66 ton/h

Potencia no eixo = 7,44

Dessa maneira, observando a entalpia na entrada e na saída da máquina temos:

$$h_1 = 3271,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 = 2839,35 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

onde  $h_1$  é a entalpia na entrada da máquina e  $h_2$  a entalpia na saída da máquina.

A energia interna contida na máquina é dada por:

$$W = m(h_1 - h_2) \quad (17)$$

$$W = \frac{66,66 \cdot 10^3}{3600} (3271,4 - 2839,35)$$

$$W = 8 \text{ MW}$$

Observando a potência no eixo, temos que:

$$Eficiencia = \frac{Pot_{eixo}}{Ener_{int}} \quad (18)$$

$$Eficiencia = \frac{7,44}{8}$$

$$Eficiencia = 92,99\%$$

Para análise dos turbo geradores feito no capítulo a frente será utilizada o gráfico fornecido pelo fabricante que apresenta respostas concisas para as condições de projeto especificadas. Apesar das condições nos turbogeradores não serem exatamente as de projeto, os erros são baixos e por esse motivo optou-se por utilizar a curva do fabricante abaixo.

Como a empresa não apresentou a curva vazão X potencia do turbo gerador 3, nesse caso observou-se alguns pontos e através do MatLab plotou-se a curva. Essa curva foi aproximada por uma reta que servirá de base para nossos cálculos futuros. A curva pode ser vista na figura 13 e o código no apêndice ao final.

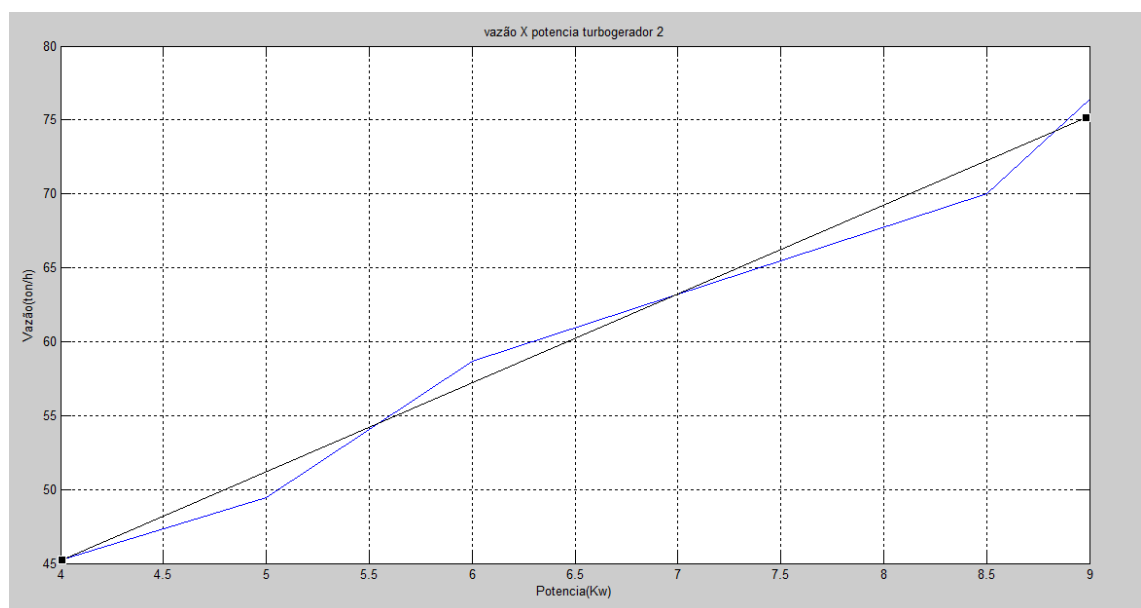


FIGURA 13: CURVA VAZÃO X POTENCIA DO TBG 3

### 3.4 GERADORES

Em plantas sucroalcooleiras os conjuntos turbina-gerador são dimensionados para fornecerem energia elétrica tanto para a operação interna da usina como para a venda de energia elétrica. No caso em estudo, a planta contém três geradores operando em paralelo com a concessionária, designados por geradores G2, G3 e G4. Por operarem em condições similares apresentam características semelhantes. Algumas delas podem ser vista abaixo.

### 3.4.1 CARACTERÍSTICAS

#### 3.4.1.1 TEMPERATURA AMBIENTE

Os geradores, foram projetados, como pode ser visto nos dados de placa, para trabalhar em local onde a temperatura ambiente esteja em torno de 40°C. Caso operem constantemente em uma temperatura superior, o enrolamento pode atingir temperaturas prejudiciais a isolação reduzindo a vida útil do equipamento.

NORMA	TEMPERATURA AMBIENTE °C	SOBRECARGA ADMISSÍVEL SEM AQUECIMENTO PREJUDICIAL	
		%	TEMPO
VDE 0530	40	50	15seg
Germanischer Lloyd	45	50	2min
IEC	50	50	15seg
	40		
Lloyds Register	45	50 (com $\cos\phi = 0,8$ )	15seg
ABS	50	50	2min
DNV	45	15 % (com $\cos\phi = 0,6$ )	2min
BV	50	50	15seg
RINA	50	50	15seg
Seeregister de UdSSR	45	50	2min

TABELA 4: SOBRECARGA DE ACORDO COM A TEMPERATURA

#### 3.4.1.2 ALTITUDE

Os geradores G2,G3 e G4 foram projetados para trabalhar em altitudes até 1000m. Caso estes geradores trabalhassem em uma altitude superior a estabelecida, estes apresentariam aquecimento causado pela rareficação do ar e conseqüentemente diminuição do poder de refrigeração. Com essa diminuição da troca de calor geraria redução das perdas e conseqüentemente redução da potência uma vez que o aquecimento das maquinas e diretamente proporcional as perdas e estas variam aproximadamente numa razão quadrática com a potência.

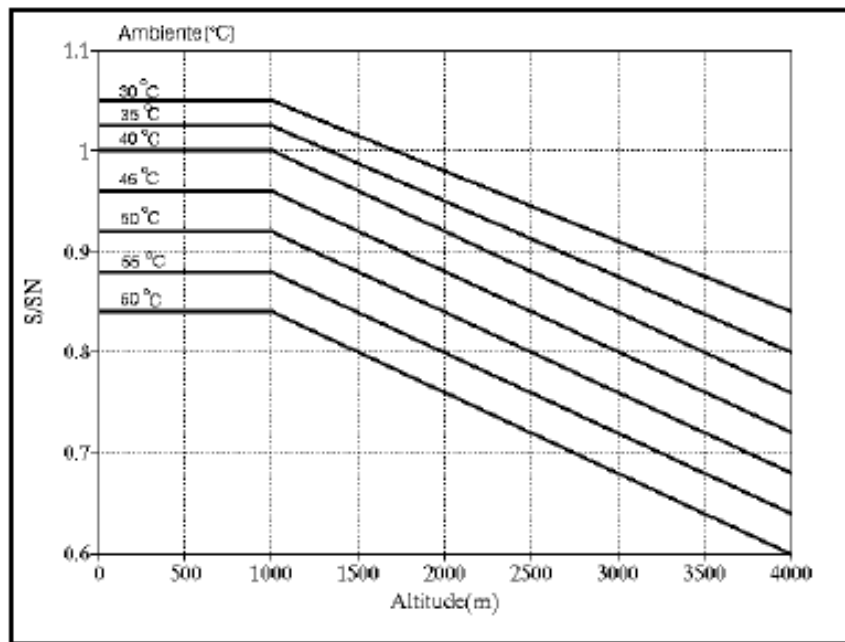


FIGURA 14: VARIAÇÃO DA POTÊNCIA COM ALTITUDE E TEMPERATURA

#### 3.4.1.3 GRAU DE PROTEÇÃO

Os invólucros dos equipamentos elétricos devem fornecer um determinado grau de proteção de acordo com o ambiente em que irá operar. As normas IEC 60034-5 e ABNT-NBR 6146 definem os graus de proteção dos equipamentos elétricos por meio das letras características IP seguidas por dois algarismos. [9]

GERADOR	CLASSE DE PROTEÇÃO	1º ALGARISMO		2º ALGARISMO
		PROTEÇÃO CONTRA CONTATO	PROTEÇÃO CONTRA PENETRAÇÃO DE CORPOS SÓLIDOS ESTRANHOS	PROTEÇÃO CONTRA PENETRAÇÃO DE ÁGUA
A B E R T O	IP00	Não tem	Não tem	Não tem
	IP02	Não tem	Não tem	Pingos de água até uma inclinação de 15° com a vertical
	IP11	Toque accidental com a mão	De dimensões acima de 50mm	Pingos de água na vertical
	IP12			Pingos de água até uma inclinação de 15° com a vertical
	IP13			Pingos de água até uma inclinação de 60° com a vertical
	IP21	Toque com os dedos	De dimensões acima de 12mm	Pingos de água na vertical
	IP22			Pingos de água até uma inclinação de 15° com a vertical
	IP23			Pingos de água até uma inclinação de 60° com a vertical
F E C H A D O	IP44	Toque com ferramentas	Corpos estranhos sólidos acima de 1mm	Respingo de todas as direções
	IP54	Proteção completa contra toque	Proteção contra acúmulo de poeiras nocivas	Respingo de todas as direções
	IP55			Jatos de água de todas as direções

TABELA 5: GRAU DE PROTEÇÃO

#### 3.4.1.4 VIBRAÇÃO

A norma IEC 60034-14 define os limites de vibração em máquinas elétricas. De acordo com esta norma temos:

GRAU DE VIBRAÇÃO	MONTAGEM	VALORES LIMITES DA AMPLITUDE DE VIBRAÇÃO EM DESLOCAMENTO , VELOCIDADE E ACELERAÇÃO								
		CARCAÇAS 56 A 132			CARCAÇAS 132 A 280			CARCAÇAS 280 E ACIMA		
		Desloc. ( $\mu\text{m}$ )	Veloc. (mm/s)	Acel. ( $\text{mm/s}^2$ )	Desloc. ( $\mu\text{m}$ )	Veloc. (mm/s)	Acel. ( $\text{mm/s}^2$ )	Desloc. ( $\mu\text{m}$ )	Veloc. (mm/s)	Acel. ( $\text{mm/s}^2$ )
A Normal	Suspensão livre	25	1.6	2.5	35	2.2	3.5	45	2.8	4.4
	Rígida	21	1.3	2.0	29	1.8	2.8	37	2.3	3.6
B Especial	Suspensão livre	11	0.7	1.1	18	1.1	1.7	29	1.8	2.8
	Rígida	-	-	-	14	0.9	1.4	24	1.5	2.4

TABELA 6: LIMITES DE VIBRAÇÃO

onde grau A são para máquinas sem grande requisitos de vibração e B são pra máquinas de importantes requisitos.

#### 3.4.1.5 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

As perdas são inevitáveis em geradores e o calor gerado por elas deve ser dissipado, ou seja, transferido para o elemento de resfriamento do gerador[10]. Nos geradores em estudo essa refrigeração é dada através do ar e da água em um sistema onde o ar quente que circula dentro da máquina é forçado a entrar em contato com a água, normalmente encima do gerador, trocando calor e refrigerando o gerador.



FIGURA 15: REFRIGERAÇÃO DO G2

#### 3.4.1.6 CLASSE DE ISOLAÇÃO E PROTEÇÃO TÉRMICA



A proteção térmica é realizada por termoresistores que são sensores de temperatura que variam sua resistência linearmente com a grandeza a ser medida. Os termoresistores utilizados para este fim é o PT100 por sua simplicidade e por apresentar alto grau de precisão. A partir da classe de temperatura do gerador podemos obter as variações admissíveis de temperatura.

NORMA	MÁXIMA TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	MÁXIMA SOBREELEVAÇÃO DE TEMPERATURA PERMITIDA POR CLASSE DE ISOLAMENTO. $\Delta T$ EM °C ( MÉTODOS DA VARIAÇÃO DE RESISTÊNCIA)				
		A	E	B	F	H
Brasil ARNT NRR - 5117	40	60	75	80	105	125
Norma Internacional IEC 34 - 1	40	60	75	80	100	125

TABELA 7: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA

Por se tratar de transformadores de classe F, a máxima variação de temperatura é de 105°C.

#### 3.4.1.7 ATERRAMENTO

Quando ligamos cargas monofásicas em geradores trifásicos, principalmente se estas cargas forem desequilibradas, teremos uma influência considerável da terceira harmônica. Por consequência, teremos circulação de corrente de sequência zero pelo circuito. Para conseguirmos eliminar ou diminuir este efeito, utiliza-se um resistor de aterramento.

Através da inserção de resistores de baixa resistência é possível limitar essa corrente como desejável. Esse método tem como principal desvantagem o fato que após a abertura do dispositivo principal de desconexão da máquina, a corrente continua fluindo para a falta e por meio do enrolamento do gerador. Isso ocorre pois, mesmo após o gerador ter sido desconectado, o campo da máquina permanece magnetizado e o rotor gira por vários segundos, induzindo tensão no enrolamento do estator. A tensão induzida no enrolamento com defeito pode ser grande o suficiente para que uma corrente significativa circule durante um período de tempo relativamente longo, até que a tensão induzida caia a zero. Dependendo do porte da máquina síncrona, a corrente se extingue na faixa de 5 segundos a 10 segundos[11]. Dessa maneira o resistor de

aterramento deve ser especificado para suportar essa corrente por um tempo determinado.

Sabendo que:

$$V_f = \frac{V_{ll}}{\sqrt{3}} = \frac{13800}{\sqrt{3}} = 7967,43 \text{ V} \quad (19)$$

$$R_{at} = \frac{V_f}{I_{max}} = \frac{7967,43}{200} = 39,837 \Omega \sim 40 \Omega$$

O tempo definido foi ajustado para  $t=10s$ .

#### 3.4.1.8 SISTEMA DE EXCITAÇÃO

A função do sistema de excitação é estabelecer a tensão interna do gerador síncrono. Em consequência, o sistema de excitação é responsável não somente pela tensão de saída da máquina, mas também pelo fator de potência e pela magnitude da corrente gerada[12]. O modelo clássico de excitação em geradores era através dos geradores corrente contínua montado no eixo do gerador. Atualmente utiliza-se um sistema de excitação sem escovas e anéis coletores, chamada excitação brushless.

Esse tipo de excitação, usado nos três geradores, pode ser visto de forma simplificada no esquema apresentado na figura 16.

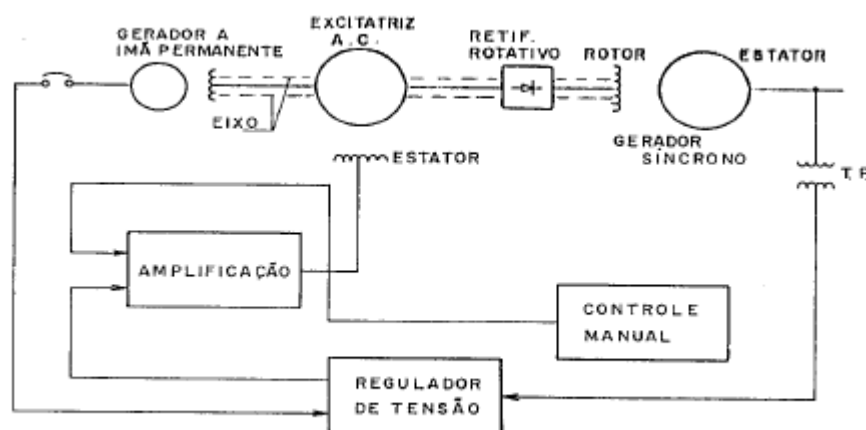


FIGURA 16: EXCITAÇÃO BRUSHLESS

(FONTE: <http://www.labspot.ufsc.br/~simoed/dincont/dc-cap5.pdf>)

O sistema mostrado consiste de uma excitatriz de corrente alternada e um retificador rotativo montado no mesmo eixo do turbo-gerador. Também montado no mesmo eixo está um gerador a ímã permanente, cujo sinal de saída é retificado e comparado, no regulador de tensão, com o sinal retificado da tensão terminal. O erro resultante alimenta o campo da excitatriz de corrente alternada, a qual se assemelha a uma máquina de corrente contínua sem comutador, com enrolamento de campo no estator e armadura no rotor. A saída da armadura rotativa da excitatriz de corrente alternada é conduzida ao longo do eixo para o retificador rotativo, a saída do qual, por sua vez, alimenta o campo do gerador, ainda ao longo do eixo[5].

#### 3.4.2 GERADOR 4

O gerador G4, é um gerador WEG, da linha ST40 1250. É um gerador para aplicações específicas e acionado por uma turbina de condensação de 32MW. Como pode ser visto G4 é um gerador trifásico com tensão terminal de 13800 V e fator de potência de 0,8. A escolha da turbina de 32MW se justifica uma vez que a potência ativa possível é dada por:

$$P(kW) = S(VA) * f.p \quad (20)$$

$$P = 40 * 0,8 = 32MW$$

$$I = \frac{40.10^6}{\sqrt{3} * 13,8.10^3} = 1675,46 A \quad (21)$$

Da mesma forma, sabendo que a frequência do sistema é de 60Hz, a rotação da máquina é justificada.

$$v_s = \frac{120 * f}{n^{\circ}} \quad (22)$$

$$v_s = \frac{120 * 60}{4} = 1800 \text{ rpm}$$

GERADOR WEG MODELO ST40 1250	
Potencia(MVA)	40
Nr de fases	3
Nr de polos	4
Rotação(rpm)	1800
frequência(Hz)	60
Isolação	F
Tensão de armadura(V)	13800
Corrente nominal(A)	1673
fator de potencia	0,8
Temp. ambiente(°C)	40
Altitude(m)	1000
Variação de temperatura	Classe B
IP	54
Massa(ton)	65,3
Rotação(rpm)	Brushless
Ruído(dB)	87
Rendimento(%)	97,7

TABELA 8: DADOS GERADOR G4

### 3.4.3 GERADOR 3

O gerador G3, é um gerador WEG, da linha SPW 100. É um gerador para aplicações específicas e acionado por uma turbina de contrapressão de 15MW. Os dados do gerador podem ser vistos na tabela 9.

GERADOR WEG MODELO SPW 100	
Potencia(MVA)	21
Nr de fases	3
Nr de polos	4
Rotação(rpm)	1800
frequência(Hz)	60
Isolação	F
Tensão de armadura(V)	13800
Corrente nominal(A)	878,6
fator de potencia	0,85
Temp. ambiente(°C)	40
Altitude(m)	1000
Variação de temperatura	Classe B
IP	54

Massa(ton)	38
Rotação(rpm)	Brushless
Tensão de excitação(V)	68
Corrente de excitação(A)	17,7
Rendimento(%)	97,5

TABELA 9: DADOS G3

Devido as características do sistema elétrico, e pelo fato dos geradores G3 e G4 estarem no mesmo barramento, estes apresentam características de numero de fases, número de pólos, rotação, frequência similares. Ainda por questões de ocuparem o mesmo lugar, características como temperatura ambiente, altitude, grau de proteção são também iguais.

$$P(kW) = S(VA) * f.p \quad (23)$$

$$P = 21 * 0,85 = 17,85MW$$

$$I = \frac{21.10^6}{\sqrt{3} * 13,8.10^3} = 879,61 A$$

#### 3.4.4 GERADOR 2

O gerador G2, é um gerador TOSHIBA, da linha TABL. É um gerador para aplicações específicas e acionado por uma turbina de contrapressão de 15MW. Os dados do gerador podem ser vistos abaixo.

GERADOR TOSHIBA TABL	
Potencia(kVA)	18750
Nr. de fases	3
Nr. de polos	4
Rotação(rpm)	1800
frequência(Hz)	60
Classe de Isolação	F
Tensão de armadura(V)	13800
Corrente nominal(A)	784
Fator de potencia	0,85
Temp. ambiente(°C)	40

Altitude(m)	1000
IP	54
Rotação(rpm)	1800
Tensão de excitação(V)	95
Corrente de excitação(A)	515
Rendimento (%)	97%

TABELA 10: DADOS G2

A potencia ativa fornecida pelo gerador é:

$$P(kW) = S(VA) * f.p \quad (24)$$

$$P = 21 * 0,85 = 17,85MW$$

e sua corrente, pode ser verificada da seguinte forma:

$$I = \frac{21.10^6}{\sqrt{3} * 13,8.10^3} = 879,61 A \quad (25)$$

Os geradores descritos acima apresentam sua curva de capacidade que determina os limites de operação dos geradores. Abaixo apresenta-se a curva de capacidade do gerador G3.

## 4 REQUISITOS E CONTRATOS DE ENERGIA

Neste capítulo será abordado os requisitos que a usina avaliada deve atender, no que se refere a qualidade e medição de energia, além dos contratos de compra e venda de energia que esta realiza.

### 4.1 REQUISITOS DE QUALIDADE

O primeiro requisito de qualidade se refere ao nível de tensão, sendo estabelecido limites rígido de operação:

Tensão Normal (kV)	FAIXA ADEQUADA DE TENSÃO			
	kV		pu	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
69	65,55	72,45	0,95	1,05
138	131,1	144,9	0,95	1,05

TABELA 11: FAIXA DE TENSÃO

Ainda referindo-se sobre a tensão, o acessante de geração em 69 kV deve ainda garantir que a sua operação bem como outros efeitos dentro de suas instalações, não provoque no ponto de conexão a superação do limite individual de 2,0 % de desequilíbrio de tensão. Deve ainda adotar medidas necessárias para que a flutuação de tensão decorrente da operação de seus equipamentos, não ultrapassem os limites inferior, designados por PST (Probability short time) e PLT(Probability long time) .

PST D 95%	PLT S 95%
0,8 pu	0,6 pu

TABELA 12: FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

O autoprodutor de energia elétrica deve garantir ainda que, ao conectar suas instalações no sistema de 69 kV não sejam violados os valores de distorção harmônica total e individual no ponto.

TENSÃO NOMINAL NO PONTO DE CONEXÃO	DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE TENSÃO (DHT) [%]
13,8 kV <Vn ≤ 69 kV	6
69 kV <Vn ≤ 230 kV	3

TABELA 13: NÍVEL DE DHT

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]		
	Harmônica	13,8 kV <Vn ≤ 69 kV	69 kV <Vn < 230 kV
Ímpares não múltiplas de 3	5	4,5	2,5
	7	4	2

	11	3	1,5
	13	2,5	1,5
	17	1,5	1
	19	1,5	1
	23	1,5	1
	25	1,5	1
	>25	1	0,5
ímpares múltiplas de 3	3	4	2
	9	1,5	1
	15	0,5	0,5
	21	0,5	0,5
	>21	0,5	0,5
Pares	2	1,5	1
	4	1	0,5
	6	0,5	0,5
	8	0,5	0,5
	10	0,5	0,5
	12	0,5	0,5
	>12	0,5	0,5

TABELA 14: DISTORÇÃO HARMÔNICA INDIVIDUAL DE TENSÃO

## 4.2 REQUISITOS DE MEDIÇÃO E FATURAMENTO

Para a conexão de acessantes de geração com tensão em 69kV, o Sistema de Medição de Faturamento deverá obedecer às especificações do Módulo 12.2, dos Procedimentos de Rede. De acordo com este procedimento "cada circuito definido como Ponto de Medição, deve corresponder um sistema de medição para faturamento (SMF) independente", sendo o circuito composto por transformadores de instrumentos, medidores, canal de comunicação com a CCEE e o sistema de coleta de dados

O painel foi projetado e executado de acordo com o padrão da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) sendo o responsável por registrar as medidas de demanda ativa, tensão, corrente, demanda, potência ativa, reativa e energia.



Como definido no procedimento deve ser instalado em cubículo separado, localizado na sala de controle contendo lacre.

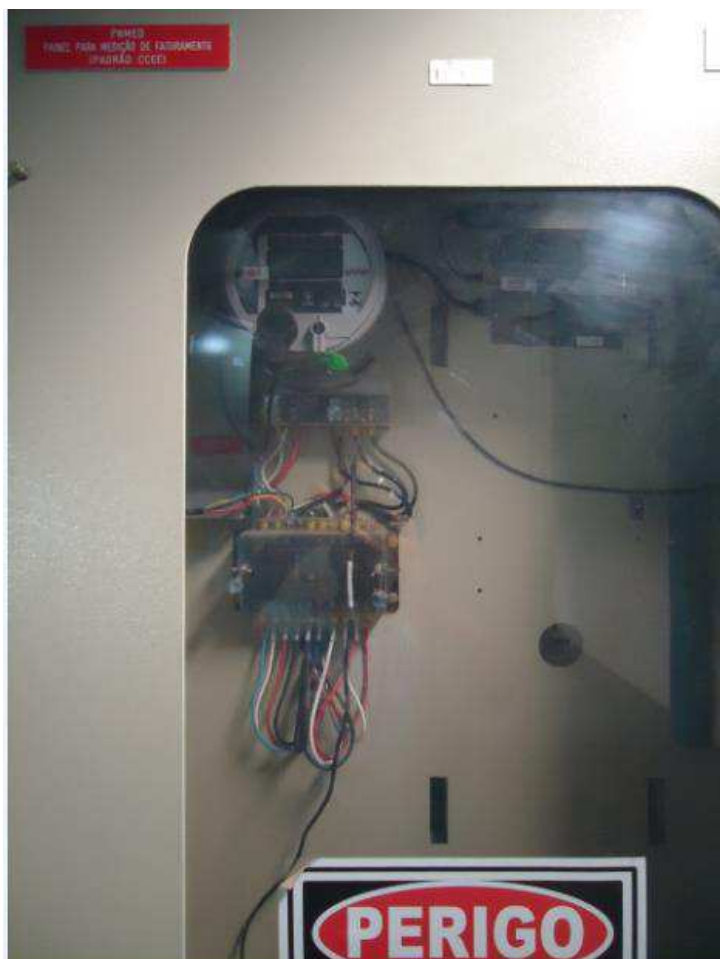


FIGURA 17: PAINEL DE MEDIÇÃO E FATURAMENTO

#### 4.2.1 MEDIDOR DE ENERGIA

O medidor utilizado para medição de energia é do fabricante Elster, capaz de realizar medição e o registro energia ativa e energia reativa com resolução de 3 casas decimais, tensão e corrente RMS por fase, demanda, de forma bidirecional, com as unidades de medida programáveis ( Wh, kWh, MWh, V, kV, A, kA, etc ). Tais medidores possuem ainda uma saída específica para as medições instantâneas (potências ativa e reativa, fator de potência, corrente, tensão, frequência, etc.).



FIGURA 18: MEDIDOR DE ENERGIA

O medidor da figura 18 está de acordo com o procedimento, tendo certificação do INMETRO, classe de exatidão de 0,3 e apresentando memória de massa capaz de armazenar dados pelo período de 32 dias.

### 4.3 COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA

Grande parte das usinas sucroalcooleiras gera energia elétrica pra seu consumo e vende o excedente que por sua vez pode ser comercializado de várias formas. No que diz respeito ao setor elétrico tais usinas podem ser classificadas como auto-produtor (AP) ou produtor independente de energia. Auto produtor são empresas que produzem energia exclusiva para o seu consumo enquanto que produtor independente de energia são empresas que tem autorização para vender toda ou parte da energia produzida. Nesse cenário a Usina em estudo, pode ser considerada como produtor independente pois vendem o excedente de sua produção.

Para que se estabeleça a venda e compra de energia, há dois ambientes. O ambiente de contratação regulada (ACR) e o ambiente de contratação livre. No ambiente de contratação regulada o processo de compra e venda de energia se dá mediante leilão, com participação da ANEEL e da Câmara de comercialização de energia elétrica (CCEE). Já no ambiente de contratação livre (ACL), as contratações são livremente negociadas, ou seja, as partes tem autonomia para ajustar preços, prazos,

montantes entre outras. Esta negociação deve está presente no Contrato de Compra e Venda de Energia(CCVEE).

As usinas também podem vender sua energia excedente no mercado curto prazo, onde os preços refletem a oferta e a procura do momento. No Brasil essa demanda costuma ser maior nos meses em que o regime pluviométrico é menor.

Para que seja possível a venda de energia, a usina geradora deve está interligada ao sistema de distribuição ou de transmissão. Para realizar essa conexão, o acessante e a concessionaria devem celebrar dois contratos, um contrato de conexão ao sistema de distribuição(CCD), o qual a concessionaria estabelece as condições para a conexão do acessante a suas instalações e o MUSD (Montante de Uso do Sistema de Distribuição), que estabelece a demanda máxima contratada.

No caso da usina em estudo, temos a seguinte situação:

O contrato de compra e venda de energia foi firmado entre a empresa em estudo e outra do estado de Pernambuco. O disposto do contrato pode ser visto de forma reduzida na tabela 15:

Contrato de venda de energia	
Combustível	Bagaço da Cana
Energia contratada(mês)	9000MW
Preço contratual	85% do Valor Normativo(VN)

TABELA 15: CONTRATO DE VENDA DE ENERGIA

O valor adotado para estudo como preço contratual será de 220 R\$/MW.h , que condiz em média com a realidade das termelétricas à bagaço. Ainda por esse contrato, a unidade geradora tem obrigação de fornecer apenas 60% do contratado.

Todos os contratos de compra e venda de energia são celebrados no ambiente da CCEE, responsável pelas medições dos montantes produzidos. As diferenças observadas, tanto positivas quanto negativas são contabilizadas e liquidadas no mercado de curto prazo. A tarifa é verificada online pelo sítio da CCEE observando o preço de liquidação das diferenças(PLD). Dessa maneira, todo o excesso do que for produzido pela empresa é vendido no mercado de curto prazo. A figura 19 mostra a tarifa cobrada por região nos últimos meses.

Mês	Submercado			
	SE/CO	S	NE	N
02/2015	388,48	388,48	388,48	388,48
01/2015	388,48	388,48	388,48	388,48
12/2014	601,21	601,21	601,21	601,21
11/2014	804,54	804,54	804,54	804,54
10/2014	776,88	731,53	776,88	776,88
09/2014	728,95	728,95	728,95	728,95

FIGURA 19: PLD

(FONTE: [http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico](http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico))

O contrato do uso do sistema de distribuição, estabelece a demanda máxima através do MUSD contrato podendo o acessante a qualquer momento solicitar o acréscimo. Pelo contrato temos:

Montante de uso contratado(kW)		
Período	MUSD(Kw)	
	Horaio de Ponta	Horario fora ponta
MUSD como à consumidora	10	10
MUSD como à fornecedora	23,287MW	

TABELA 16: MUSD CONTRATADO

A tarifa do uso do sistema de distribuição é definida pela ANEEL, tomando como base o MUSD contratado. Ainda segundo o contrato, para valores superior a 5% do MUSD contratado, a título de penalidade será cobrado multa de ultrapassagem igual a três vezes a tarifa de uso estabelecida.

#### 4.4 CONTRATOS DE IRRIGAÇÃO

De acordo com a resolução normativa N°414/2010, seção XI, art 107 temos:

*"A distribuidora deve conceder desconto especial na tarifa de fornecimento relativa ao consumo de energia elétrica ativa, exclusivamente na carga destinada à irrigação vinculada à atividade de agropecuária e na carga de aquicultura, desde que:*  
*I - a unidade consumidora seja atendida por meio do SIN; II - o consumidor efetue a*

*solicitação por escrito; e III - o consumidor não possua débitos vencidos junto à distribuidora, relativos à unidade consumidora beneficiada com o desconto".*

Ainda nessa mesma seção no artigo 108, definem-se as cargas para aplicação do desconto, onde temos:

*"II - irrigação: cargas destinadas ao bombeamento e aplicação da água no solo mediante o uso de técnicas específicas."*

Os percentuais de descontos podem ser visto na tabela 20:

Regiões do País	Grupo A	Grupo B
"Nordeste e demais municípios da área de atuação da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE, conforme o art. 2º do Anexo I do Decreto no 6.219, de 2007.	90%	73%
Norte, Centro-Oeste e demais Municípios do Estado de Minas Gerais	80%	67%
Demais Regiões	70%	60%

FIGURA 20: DESCONTO DE IRRIGAÇÃO

Dessa maneira, a Usina em estudo, tem um consumo médio de 20 MW, sendo que deste 6MW são da irrigação o qual tem subestação própria e usufruem desse benefício.

Segundo relatório da ANEEL, a tarifa média de fornecimento é 0,25356 por MWh para o horário fora de ponta. Dessa maneira a tarifa no horário reservado é dado por:

$$tar_{res} = 0,1 * 0,25356$$

$$tar_{res} = 0,025356 \frac{R\$}{MW}$$

## 5 ANÁLISE DE VIABILIDADE

Nesta etapa, analisaremos a viabilidade de uma usina sucro-alcooleira, que utiliza a cana de açúcar como matéria prima, gerando o bagaço como resíduo de sua produção, como fonte geradora de energia elétrica. Esta análise é feita a partir da capacidade de moagem da usina sendo possível observar os benefícios desse processo tanto para o empreendedor quanto para a sociedade e o sistema elétrico.

## 5.1 QUANTIDADE DE BIOMASSA

Todo caminhão que chega a fábrica, seja de terceirizados ou da empresa, são pesados e seguem para o pátio da usina onde descarregará a cana. De acordo com dados da usina, o consumo de cana para o mês de novembro pode ser visto na tabela 17.

Dados do bagaço		
	Cana esmagada(Ce)	Umidade
Novembro	297187,7	49,6781

TABELA 17: CANA ESMAGADA NO MÊS DE NOVEMBRO

A partir da tabela 17, mostrada acima temos:

$$C_{e_{nov}} = 297187,7 \text{ ton}$$

Dessa maneira, por hora no mês temos:

$$C_e = \frac{297187,7}{24 * 30} = \quad (26)$$

$$C_e = 412,761 \text{ ton/h}$$

De acordo com análises laboratoriais, constata-se que as fibras compõem cerca de 30% da cana, sendo que as fibras são o que de fato fornecem energia as fornalhas:

$$Fibras = 0,3 * 412,761 \quad (27)$$

$$Fibras = 123,83 \frac{\text{ton}}{\text{h}}$$

## 5.2 CONSUMO DE BIOMASSA NA CALDEIRA 1

Considerando a eficiência das caldeiras como mostrado no capítulo anterior temos:

$$Eficiencia_{caldeira2} = 2,07 \frac{ton_{vapor}}{ton_{bag}}$$

$$Eficiencia_{caldeira3} = 2,2 \frac{ton_{vapor}}{ton_{bag}}$$

Na planta em estudo, temos linhas de vapor de diferentes pressões. Cada linha, tem sua pressão definida ao passar por uma fase do processo.

- i. Linha de 67 bar – Saída da caldeira 3
- ii. Linha de 42 bar – Saída da caldeira 1
- iii. Linha de 26 bar – Extração do turbo-gerador 4
- iv. Linha de 1,5bar – Escape das turbinas de contrapressão.

Ainda há no processo, válvulas condicionadoras de vapor, que rebaixam a pressão do vapor. Nesse estudo essas válvulas serão consideradas como fechadas, ou seja, com todos os equipamentos em funcionamento.

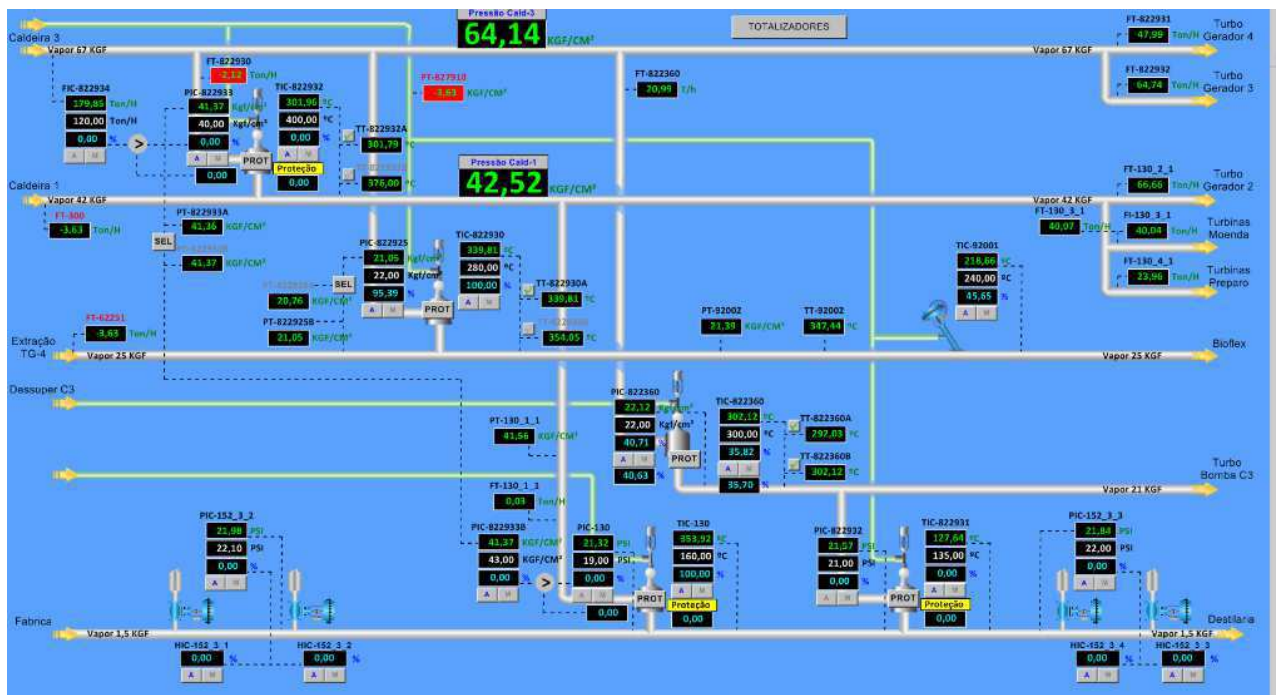


FIGURA 21: REDUTORAS DAS CALDEIRAS



Assim, sabendo o consumo de vapor das turbinas do turbogerador 3, das turbinas da moenda e preparo, podemos determinar o consumo de bagaço da caldeira 1.

### 5.2.1 TURBINAS DE CONTRAPRESSÃO

A caldeira 1, fornece energia na forma de vapor as turbinas da moenda, turbinas de preparo e o turbo gerador 2. Esses, como dito anteriormente, além de produzir potência mecânica no eixo rebaixam a pressão a 1,5 bar.

#### 5.2.1.1 TURBINAS DA MOENDA

A partir da figura 22, podemos observar que o consumo de vapor das turbinas da moenda pouco oscila, mantendo-se na proximidade de 39 ton/h.

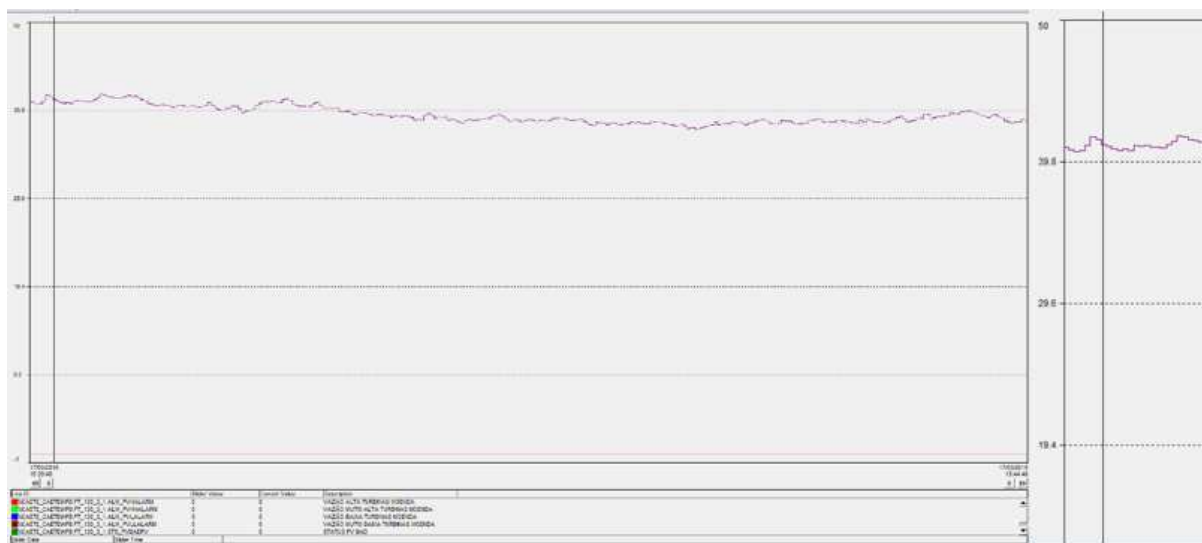


FIGURA 22: COMPORTAMENTO DA TURBINA DA MOENDA E A ESQUERDA ZOOM DA ESCALA

#### 5.2.1.2 TURBINAS DO PREPARO

O consumo das turbinas de preparo apresenta consumo de forma irregular por depender de muitas variáveis. A principal variável é o tipo de cana – cana com corte mecanizado ou manual.





FIGURA 23: COMPORTAMENTO TURBINA PREPARO DE CANA

Como pode ser visto na figura 23, o comportamento da turbina modifica-se dependendo da cana que estas recebem sendo variáveis importante a umidade, a quantidade de fibra e principalmente o tipo de cana. Observando a figura acima, para análises destas turbinas temos dois cenários. No primeiro cenário foi destacado em vermelho e refere-se ao comportamento da turbina na presença de cana picada. Para essas situações, pode-se tirar a média. Para isso, podemos aproximar por:

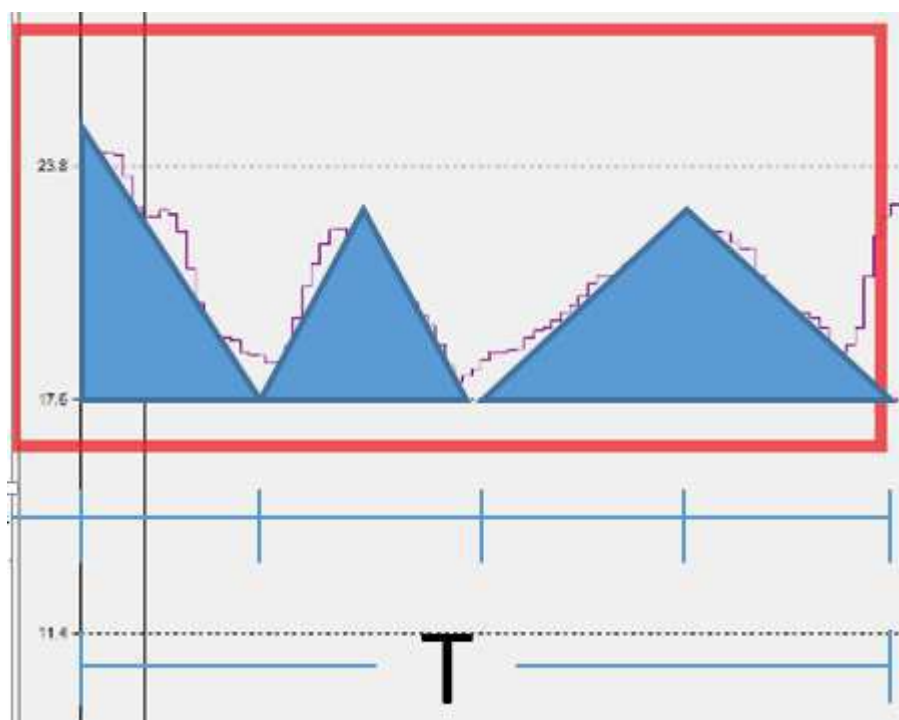


FIGURA 24: APROXIMAÇÃO POR TRIÂNGULOS

$$vazao_{picada} = \frac{\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3}{T} = \quad (28)$$

$$vazao_{picada} = \frac{(24 - 17,6) * \frac{T}{4}}{2} + \frac{(23 - 17,6) * \frac{T}{4}}{2} + \frac{(22 - 17,6) * \frac{T}{2}}{2} =$$

$$vazao_{picada} = \frac{0,675T + 0,8T + 1,1T}{T} + 17,6 = 20,175 \text{ ton/h}$$

O segundo cenário destacado em azul, refere-se ao comportamento da turbina na presença de cana com corte manual, ou inteira. Para essas situações realizou-se uma aproximação a partir do gráfico.



FIGURA 25: APROXIMAÇÃO CANA INTEIRA

$$vazao_{inteira} = \frac{25,5 + 26 + 23}{2} = 24,83 \frac{\text{ton}}{\text{h}}$$

De acordo com dados laboratoriais, cerca de 75% da cana que chega ao pátio da usina tem seu corte mecanizado enquanto que os outros 25% são cortados manualmente.

Dessa maneira, podemos tirar o consumo médio por hora das turbinas de vapor como:

$$vazao_{preparo} = 0,75 * vazao_{picada} + 0,25 * vazao_{inteira} \quad (29)$$

Assim sendo, o consumo médio por hora das turbinas de preparo pode ser dado por:

$$vazao_{preparo} = 0,75 * 20,17 + 0,25 * 24,83$$

$$vazao_{preparo} = 21,335 \frac{ton}{h}$$

#### 5.2.1.3 TURBOGERADOR G3

Como as turbogeradores de contrapressão tem função de reduzir a pressão a níveis utilizados no processo, então os turbogeradores 2 e 3 devem fornecer vapor adicionalmente as turbinas de preparo e moenda, de modo que o consumo no processo seja subsidiado. Dessa maneira, sendo o turbogerador 3 mais eficiente que o turbogerador 2 então, por estratégia, ele trabalhará carregado enquanto que o turbogerador 2 ficará modulando o consumo de vapor.

Pela curva do turbogerador G3 , mostrada na figura 12 temos que para a carga da turbina em 12,5MW, ocorre a necessidade de 70 ton/h de vapor. Assim temos:

$$vazao_{TBG3} = 70 \frac{ton}{h}$$

#### 5.2.1.4 TURBOGERADOR G2

Sabendo que a moagem trabalhando em 100% a vazão necessária de vapor é 200 ton/h para o processo, então temos:

$$\begin{aligned} vazao_{TBG3} + vazao_{TBG2} + vazao_{preparo} + vazao_{moenda} & \quad (30) \\ & = 200 \frac{ton}{h} \end{aligned}$$

$$vazao_{TBG2} = 200 - 70 - 21,335 - 39 = 69,665 \frac{ton}{h}$$

De acordo com o gráfico plotado, na figura 13, temos que a potência no turbogerador 2 é:

$$P_{TBG2} = 8,2 \text{ MW}$$

Dessa maneira a vazão da caldeira pode ser dada como:

$$vazao_{cald1} = vazao_{TBG2} + vazao_{preparo} + vazao_{moenda} \quad (31)$$

$$vazao_{cald1} = 69,225 + 21,335 + 39 \cong$$

$$vazao_{cald1} = 130 \frac{ton}{h}$$

Como mostrado acima, a quantidade de fibra, designado por bagaço, disponível é:

$$bag_{total} = 123,82 \frac{ton}{h}$$

A partir da eficiência da caldeira 1, podemos calcular o consumo de bagaço por hora.

Temos que:

$$cons_{cald1} = \frac{vazao_{cald1}}{2,07} = \frac{130}{2,07} = 62,80 \frac{ton_{bag}}{h} \quad (32)$$

### 5.3 VAZÃO DE VAPOR NA CALDEIRA 3

Como na planta só existe duas caldeiras em funcionamento, temos que o consumo da caldeira 3 é dado por:

$$cons_{cald3} = bag_{total} - cons_{cald1} = 61,02 \frac{ton_{bag}}{h} \quad (33)$$

Observando a eficiência da caldeira 3, podemos calcular sua vazão de vapor:

$$vazao_{cald3} = 2,2 * cons_{cald3} = 134,244 \frac{ton}{h} \quad (34)$$

### 5.3.1.1 TURBOGERADOR G4

A caldeira 3, considerando todas as condicionadoras de vapor fechadas, fornece vapor somente aos turbogerador 3 e 4. Dessa maneira, sabendo inicialmente que o consumo de vapor do gerador 3 foi de 70 ton/h temos:

$$vazao_{TBG3} + vazao_{TBG4} = 134,244 \frac{ton}{h} \quad (35)$$

$$vazao_{TBG4} = 134,244 - 70 = 64,244 \frac{ton}{h}$$

Analisando o gráfico do turbogerador 4, na figura 11 temos duas situações. A primeira é a turbina funcionando sem a extração habilitada. Nesse caso a potência fornecida ao eixo será:

$$P_{sem_{extr}} = 18,5MW$$

Para o segundo caso, com a extração habilitada e baixo consumo:

$$P_{10500} = 15MW$$

$$P_{30000} = 11MW$$

$$P_{45000} = 7MW$$

Devido ao fato da empresa parceira, ser um novo empreendimento mundial, e ainda em fase de testes, poucas vezes torna-se necessário a habilitação da extração. A tabela 18 mostra o consumo para o mês em análise.

Consumo vapor 26 bar (ton)	
Novembro	12.767

TABELA 18: CONSUMO DE VAPOR DE 26 BAR

Sendo o consumo de novembro o observado acima, então podemos analisar o consumo por hora:

$$vapor_{26bar} = \frac{12767}{24 * 30} = 17,7319 \frac{ton}{h} \quad (36)$$

Assim, a maneira escolhida para simular esse valor é mostrada no esquema abaixo.

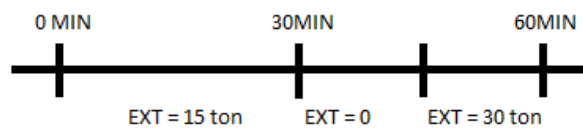


FIGURA 26: TEMPO DO TBG 4 COM EXTRAÇÃO HABILITADA

ou seja, a potência no turbogerador 4, pode ser aproximado por

$$P_{TBG4} = 0,5 * 15 + 0,25 * 18,5 + 0,25 * 11 \quad (37)$$

$$P_{TBG4} = 14,875 MW$$

## 5.4 GERADORES SÍNCRONOS

Assim sendo, os turbo geradores forneceram as seguintes potências:

Potencia turbogeradores(MW)		
TBG2	TBG3	TBG4
8,2	12,5	14,875

TABELA 19: POTÊNCIA DOS TURBOGERADORES

A partir da potência no eixo da turbina e considerando o redutor como sendo ideal, ou seja, desconsiderando as perdas, podemos obter a potência elétrica a partir do rendimento dos geradores.

## 5.4.1.1 GERADOR G2

De acordo com os dados de placa mostrados anteriormente, temos:

$$R_{G2} = \frac{P_{ele}}{P_{eixo}} = \quad (38)$$

$$P_{ele} = 0,97 * 8,2 = 7,954MW$$

Para que o gerador trabalhe no fator de potência especificado de 0,85, é necessário que:

$$\begin{aligned} \cos\phi &= 0,85 \\ \phi &= 35,32^\circ \end{aligned} \quad (39)$$

Dessa maneira, pelo triangulo das potencias temos:

$$\tan\phi = \frac{Q}{P} \quad (40)$$

$$Q = 7,954 * 0,6197 = 4,929 \text{ Mvar}$$

A potência aparente fornecida pelo gerador é dada por:

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{P^2 + Q^2} \\ S &= \sqrt{7,954^2 + 4,929^2} = 9,355MVA \end{aligned} \quad (41)$$

## 5.4.1.2 GERADOR G3

Para o gerador 3, temos:

$$R_{G3} = \frac{P_{ele}}{P_{eixo}} = \quad (42)$$

$$P_{ele} = 0,975 * 12,5 = 12,18MW$$

Para que o gerador trabalhe no fator de potência especificado de 0,85, é necessário que o sistema de excitação excite o gerador de modo a potência reativa seja:

$$\begin{aligned} \cos\phi &= 0,85 \\ \phi &= 35,32^\circ \end{aligned} \quad (43)$$

Dessa maneira, pelo triangulo das potencias temos:

$$\tan\phi = \frac{Q}{P} \quad (44)$$

$$Q = 12,18 * 0,6197 = 7,5479 \text{ Mvar}$$

A potência aparente fornecida pelo gerador é dada por:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (45)$$

$$S = \sqrt{12,18^2 + 7,548^2} = 14,33 \text{ MVA}$$

#### 5.4.1.3 GERADOR G4

Para o gerador 4, temos:

$$R_{G4} = \frac{P_{ele}}{P_{eixo}} = \quad (46)$$

$$P_{ele} = 0,977 * 14,875 = 14,83 \text{ MW}$$

Para que o gerador trabalhe no fator de potência especificado de 0,85, é necessário que o sistema de excitação excite o gerador de modo a potência reativa seja:

$$\begin{aligned} \cos\phi &= 0,8 \\ \phi &= 40,97^\circ \end{aligned} \quad (47)$$

Dessa maneira, pelo triangulo das potencias temos:



$$tg\phi = \frac{Q}{P} \quad (48)$$

$$Q = 14,83 * 0,75 = 11,12 \text{ Mvar}$$

A potência aparente fornecida pelo gerador é dada por:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (49)$$

$$S = \sqrt{14,83^2 + 11,12^2} = 18,54 \text{ MVA}$$

## 5.5 CONSUMO DA INDÚSTRIA

Os consumidores são classificados pelo nível de tensão em que são atendidos. Os consumidores atendidos em baixa tensão, em geral em 127 ou 220 volts, são classificados no Grupo B. Os consumidores podem ainda ser atendidos em alta tensão, acima de 2300 volts, como indústrias são classificados no Grupo A. Esse grupo é subdividido de acordo com a tensão de atendimento, como mostrado na tabela 20.

Sub grupo	Tens. Fornecimento
A1	> 230kV
A2	88kV a 138kV
A3	69kV
A3a	30kV a 44kV
A4	2,3kV a 25kV
AS	Subterraneo

TABELA 20: SUBGRUPO

A usina em estudo é atendida a 69kV, dessa maneira, é classificada no grupo A, subgrupo A3.

Essa modalidade tarifária exige um contrato específico com a concessionária no qual se determina o valor da demanda Contratada na ponta e a demanda Contratada fora de Ponta. A conta de energia elétrica desses consumidores é composta da soma de

parcelas referentes ao consumo, demanda e ultrapassagem. Em todas as parcelas observasse a diferenciação entre horas de ponta e horas fora de ponta.

A parcela de ultrapassagem é cobrada apenas quando a demanda medida ultrapassa a Demanda Contratada acima dos limites de tolerância, sendo para o subgrupo A3 especificado 5%. Assim, o custo desses consumidores pode ser dado por:

$$P_{consumo} = (\text{consumo}_{ponta} \times \text{tarifa}_{ponta} + \text{consumo}_{foraponta} \times \text{tarifa}_{foraponta}) \quad (50)$$

$$P_{demanda} = \text{demanda}_{contratada_{ponta}} \times \text{tarifa}_{demanda_{ponta}} + \text{demanda}_{contratada_{foraponta}} \times \text{tarifa}_{contratada_{foraponta}} \quad (51)$$

$$P_{ultrapassagem} = \text{tarifa}_{ultrapassagem_{ponta}} \times (\text{Demanda}_{medida} - \text{Demanda}_{contratada_{ponta}}) + \text{tarifa}_{ultrapassagem_{foraponta}} \times (\text{Demanda}_{medida_{foraponta}} - \text{Demanda}_{contratada_{foraponta}}) \quad (52)$$

Além da energia ativa, consumidores do grupo A, subgrupo A3 pagam pela energia reativa. Esse pagamento é indicado de forma indireta através do fator de potencia. De acordo com a Resolução 456, as instalações elétricas dos consumidores devem ter um fator de potência não inferior a 0,92 (reativo ou indutivo).

Os consumidores do Grupo A, tarifa Azul, pagam tanto o consumo de energia reativa (UFER) quanto da demanda reativa (UFDR), para as horas de ponta e horas fora de ponta.

$$FER = (\text{tarifa}_{ponta} \times \text{UFER}_{ponta} + \text{tarifa}_{foraponta} \times \text{UFER}_{foraponta}) \quad (53)$$

$$FDR = (tarifa_{demanda_{ponta}} \times UFDR_{ponta} + tarifa_{demanda_{foraponta}} \times UFDR_{foraponta}) \quad (54)$$

Para o estudo, foi possível obter o consumo, demandas contratadas, consumo de energia reativa, demanda de energia reativa e a partir destes dados foi montada a tabela abaixo onde temos o custo total.

Consumo mês de novembro de 2014			
	Valor	Tarifa	Custo
Consumo fora de ponta(KW)	300000	0,248	74400
Consumo ponta(KW)	15000	0,39	5850
Demanda fora ponta	10000	4,84	48400
Demanda ponta	10000	14,55	145500
FDR ponta(KW.h)	0	14,55	0
FDR fora de ponta(KW.h)	400	4,84	1936
FER fora de ponta(KW.h)	5390	0,2376	1280,664
FER ponta(KW.h)	38	0,2376	9,0288
Total(R\$)			277.375,6928

TABELA 21: CONSUMO MÊS DE NOVEMBRO

## 5.6 DESPESAS DA IRRIGAÇÃO

Analisando a tabela 22, temos:

Produção e consumo	
Cons. Irrigação (MW)	6
Cons. Fabrica (MW)	17
G2+G3+G4 (MW)	34,964

TABELA 22: PRODUÇÃO E CONSUMO

A partir dos contratos citados anteriormente temos as seguintes estratégias no que se refere a irrigação.

- i. A irrigação plena só ocorrerá das 21:30 às 6 h, horário em que a tarifa tem desconto de 90%.
- ii. De maneira nenhuma haverá consumo da irrigação no horário de ponta.
- iii. No horário fora de ponta e de ponta, as cargas da irrigação podem eventualmente serem alimentadas pelo gerador.

Dessa maneira temos:

$$Irr_{reser} = 6 * 8,5 * 24 = 1.530 MW.h \quad (55)$$

Para o horário fora de ponta, será considerado um consumo de 3 MW.h, para um intervalo de 50h/mês. Esses motores só devem ser ligados em casos de extrema urgência. Em geral, quando há essa necessidade, essas cargas são alimentadas pelos geradores.

$$Irr_{fora} = 150 MW.h$$

Dessa maneira, utilizando as tarifas citadas acima temos:

$$Despesa_{irrig} = 25,3 * 1530 + 253 * 150 = R\$ 76.659 \quad (56)$$

## 5.7 VENDA DE ENERGIA

De acordo com o contrato estabelecido, a usina autoprodutora de energia tem contrato estabelecido de 9.000MW.h por mês. Considerando os valores descrito na seção anterior temos:

$$Exp = 34,964 - 17 = 17,640 MW.h < 23,287 MW.h (MUSD contratado)$$

Assim, a energia vendida ao final do mês é:

$$Exp_{mens} = 12.700,8 MW.h$$

Pelo contrato, estabelecido no ambiente livre, o acessante deve fornecer até 9000 MW.h por mês, assim a receita considerando a tarifa a citada anteriormente é:

$$Rec_{ACL} = tarifa * Pot = 220 * 9000 = R\$ 1.980.000 \quad (57)$$

Como dito na seção anterior, as usinas autoprodutoras vendem o excedente de sua produção em um mercado denominado de *spot* ou de curto prazo. Para o mês em análise a tarifa marcada foi de 804 reais por Mega Watt hora. Dessa maneira temos

$$Rec_{spot} = 3.700,8 * 804 = R\$ 2.975.443,2 \quad (58)$$

## 5.8 VIABILIDADE

Utilizando os dados anteriores, podemos realizar o balanço geral, onde temos:

$$Lucro = Expotação - Importação \quad (59)$$

$$Lucro = Venda - Consumo_{industria} - Consumo_{irrigação} \quad (60)$$

$$Lucro = 1.980.000 + 2.975.443,2 - 76.659 - 277.375,6928 = R\$ 4.601.408,5$$

Dessa maneira, observou-se a importância da cogeração em usinas sucroalcooleiras que além da produção de calor produz também a energia elétrica, sendo este um novo produto a ser negociado. A energia elétrica gerada nas usinas dependem fundamentalmente da capacidade de moagem da usina, das caldeiras, turbinas e geradores empregados e sua rentabilidade depende dos contratos de compra e venda de energia bem como contratos de uso do sistema de distribuição. A cogeração mostra-se ainda um bom processo de geração para a sociedade local, para o meio ambiente e para o sistema elétrico.

Do lado da sociedade, há ganho em confiabilidade, uma vez que contribui para o diversificação da matriz energética, geração de empregos e renda , garantindo o desenvolvimento econômico no local onde é instalada a usina. Quanto ao meio ambiente, temos as reduções da emissão de gases do efeito estufa e a minimização dos impactos ambientais pela redução da necessidade de grandes instalações de geração. O setor elétrico ganha ao ter um atendimento mais rápido ao crescimento da demanda, por ter um tempo de instalação inferior a grandes hidrelétricas, adiamento de investimentos e aumento da estabilidade do sistema elétrico.

## 6 CONCLUSÃO

Conclui-se que a comercialização de energia elétrica a partir do bagaço da cana é uma atividade que apresenta muitas vantagens seja ao empreendedor que obtém grandes lucros como também para a sociedade, sistema elétrico e meio ambiente.

No que se refere à sociedade, esta ganha em qualidade e confiabilidade, uma vez que aumenta-se a variedade de produção, levando a uma maior segurança do suprimento de energia, além do desenvolvimento de uma grande empresa gerando emprego.

No que se refere às melhorias do meio ambiente, podemos citar a diminuição dos desmatamentos, pela redução da necessidade de grandes instalações de energia elétrica e diminuição do uso de fontes não renováveis.

Para o sistema elétrico, garante uma maior confiabilidade, diminuindo a dependência do parque gerador centralizado, em geral uma hidrelétrica. Vale ressaltar que o período de moagem das usinas sucroalcooleiras, fornecem energia exatamente no período de seca, uma vez que a moagem ocorre nos períodos de menos chuva.

## REFERÊNCIAS

- [1] NOVA CANA, Cogeração: como funciona a produção de energia elétrica numa usina sucroalcooleira. Disponível em: < <http://www.novacana.com/usina/cogerao-como-funciona-producao-energia-eletrica/>> Acesso em 5 de janeiro de 2014.
- [2] NOVA CANA, Como é feito o processamento da cana-de-açúcar nas usinas. Disponível em : < <http://www.novacana.com/usina/como-e-feito-processamento-cana-de-acucar/>>. Acesso em 5 de janeiro de 2014
- [3] MAMEDE FILHO, João. Manual de Equipamentos Elétricos. 3ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.
- [4] CCEE, Ambiente livre e regulado. Disponível em: <[http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/como-participar/ambiente-livre-ambiente-regulado?\\_afzLoop=93742887491579#%40%3F\\_afzLoop%3D93742887491579%26\\_a df.ctrl-state%3Dk7fm0mys9\\_4](http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/como-participar/ambiente-livre-ambiente-regulado?_afzLoop=93742887491579#%40%3F_afzLoop%3D93742887491579%26_a df.ctrl-state%3Dk7fm0mys9_4)> Acesso em 7 de janeiro de 2015
- [5] MARGONAR, Caldeiras . Gerencia de treinamento. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/RenanMargonar/caldeiras-apostila>> . Acesso em 8 de janeiro.
- [6] Como funciona um desaerador. Disponível em: <<http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/6023-como-funciona-um-desaerador/>> Acesso em 15 de janeiro de 2015
- [7] FERRAZ, Turbinas a vapor. Disponível em: <http://fabioferrazdr.files.wordpress.com/2008/08/turbinas-a-vapor.pdf>
- [8] Resumão turbinas a vapor. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfHnWAK/resumao-turbina-a-vapor>>
- [9] WEG, CARACTERÍSTICAS E ESPECIFICAÇÕES DE GERADORES. Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-5-caracteristicas-e-especificacoes-de-geradores-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>
- [10] WEG, Características e especificações de geradores. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-5-caracteristicas-e-especificacoes-de-geradores-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>
- [11] Fatores limítrofes, arranjos e aterramento de geradores. Disponível em: <[www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/ed-96\\_Fasciculo\\_Cap-I-Protacao-de-geradores.pdf](http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/ed-96_Fasciculo_Cap-I-Protacao-de-geradores.pdf)> Acesso em 20 de janeiro de 2014
- [12] Sistema de excitação de geradores síncronos. Disponível em: <<http://www.labspot.ufsc.br/~simoes/dincont/dc-cap5.pdf>>
- [13] FITZGERALD, A. E. Maquinas Elétricas. 6ed. Porto Alegre. Bookman, 2006



[14]NOGUEIRA, Luis Augusto. Eficiência energética no uso do vapor. Disponível em: [http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo\\_18/2014/04/22/6281/LivroVapor.pdf](http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2014/04/22/6281/LivroVapor.pdf) Acesso em 28 de janeiro de 2015.

[15]ANDRADE,Alan Sulato. Máquinas térmicas. Disponível em: <http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasalan/AT101-Aula00.pdf>. Acesso em 01 de fevereiro de 2015

[16] Elissa Soares de Carvalho **PROJETO E OTIMIZAÇÃO DE UM GERADOR SÍNCRONO DE POLOS LISOS, 2011**

# APÊNDICE A

Código plote do Turbogeração 2

```
%CURVA VAZÃO X POTENCIA APROXIMADA
```

```
potencia = [4,5,6,8.5,9];
```

```
vazao = [45.25,49.42,58.7,70,76.4]
```

```
plot(potencia,vazao)
```

```
grid ON
```

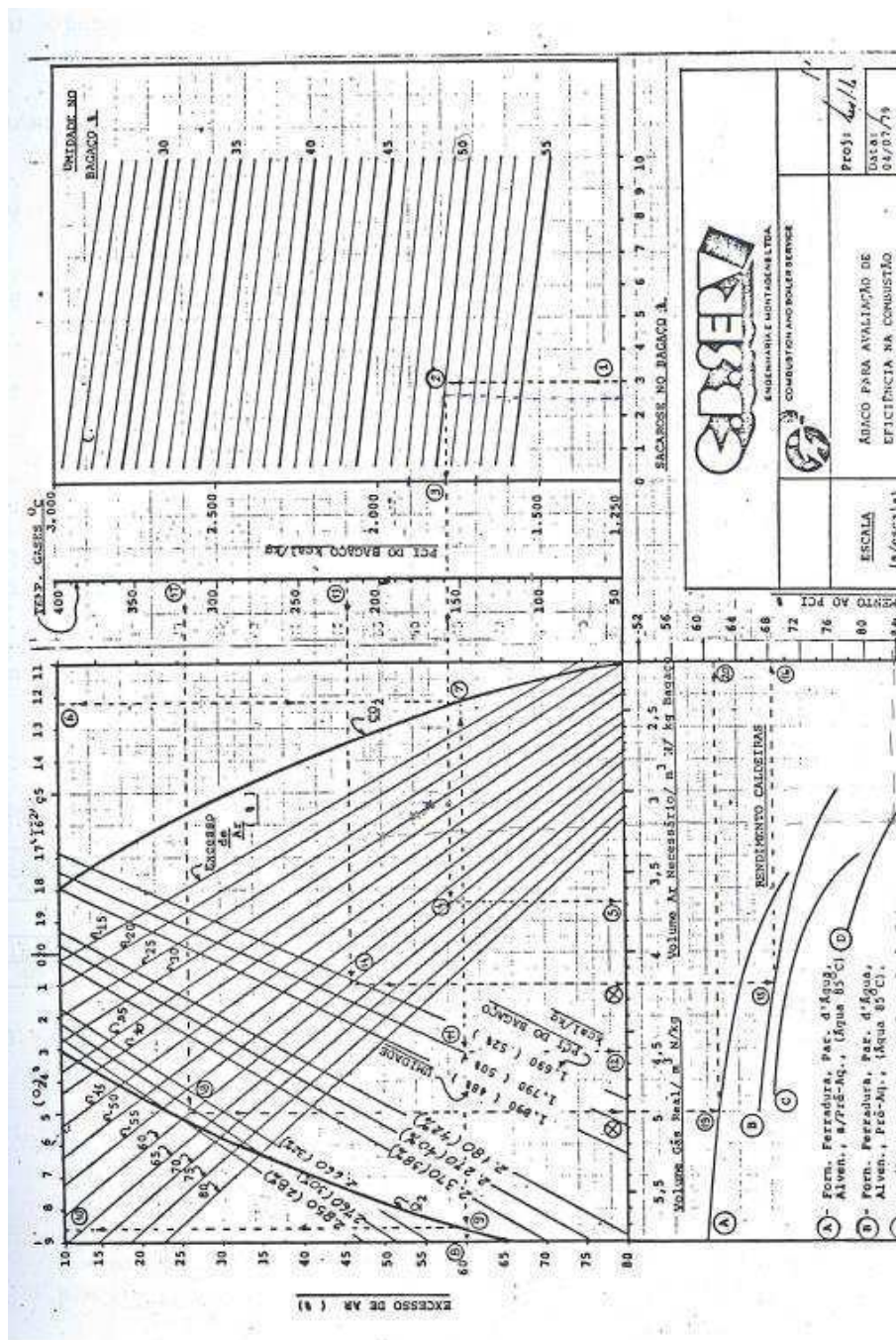
```
title('vazão X potencia turbogeração 2')
```

```
xlabel('Potencia(kW)')
```

```
ylabel('Vazão(ton/h)')
```

## ANEXO A

Ábaco para determinação do poder calorífico inferior e rendimento de caldeiras.



Fonte: PIETRO, Ney. Eficiência em caldeiras