



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS TARIFAS E DOS  
PARÂMETROS TÉCNICOS NA DECISÃO DA USINA DE  
PRODUZIR ENERGIA, AÇÚCAR E ÁLCOOL**

HÉBER CLÁUDIUS NUNES SILVA

Orientador: Fábio Santana Magnani

Dissertação submetida à Universidade Federal de Pernambuco para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Mecânica.**

RECIFE  
MAIO DE 2011

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S586a Silva, Héber Cláudius Nunes.  
Análise da influência das tarifas e dos parâmetros técnicos na decisão da usina de produzir energia, açúcar e álcool / Héber Cláudius Nunes Silva.  
- Recife: O Autor, 2011.  
xiii, 111 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Fábio Santana Magnani.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2011.  
Inclui Referências Bibliográficas e Apêndice.

1. Engenharia Mecânica. 2. Análise Exergética. 3. Balanço Exergético.  
4. Eficiência Exergética. 5. Valor Presente Líquido. 6. Taxa Interna de Retorno. I. Magnani, Fábio Santana. II. Título.

UFPE

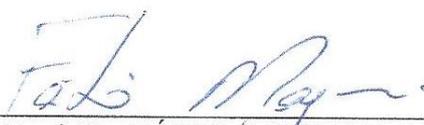
621 CDD (22. ed.) BCTG/2011-135

“ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS TARIFAS E DOS PARÂMETROS TÉCNICOS  
NA DECISÃO DA USINA DE PRODUIR ENERGIA, AÇÚCAR E ÁLCOOL”

HÉBER CLÁUDIUS NUNES SILVA

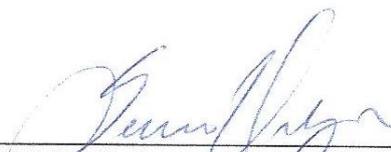
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSOS E SISTEMAS TÉRMICOS  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE



---

Prof. Dr. FÁBIO SANTANA MAGNANI  
ORIENTADOR/PRESIDENTE



---

Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO  
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:



---

Prof. Dr. FÁBIO SANTANA MAGNANI (UFPE)



---

Prof. Dr. MAURÍLIO JOSÉ DOS SANTOS (UFPE)



---

Prof. Dr. PEDRO ANSELMO FILHO (POLI/UPE)

*“Uns play, outros pray e outros nem sei”*

*Du peixe.*

## **AGRADECIMENTOS**

---

Agradeço aos meus pais, parentes e amigos que colaboraram e contribuíram de diversas formas para a conclusão deste trabalho.

Ao orientador Prof. Dr. Fábio Magnani, pela confiança e dedicação que nos oportunizou a realização deste trabalho, desde o projeto até sua conclusão.

Ao Prof. Dr. Jorge Henriquez e ao Prof. Dr. José Charamba, pelos ensinamentos nas disciplinas cursadas no mestrado.

Ao Prof. Dr. Maurílio José dos Santos e ao Prof. Dr. Pedro Anselmo, pela grande contribuição no seminário e na organização da dissertação.

À Sr<sup>a</sup>. Eliane Alves da Silva, secretária da Pós-Graduação, pela simpatia e presteza com que nos auxiliou a cumprir as exigências administrativas.

## RESUMO

---

Na otimização de projetos, há dois aspectos que são muito importantes, o financeiro e o técnico. Bem como abordar ainda em fase de projeto, a análise do comportamento da planta fora das suas condições normais de operação. A estimativa de custos exatos e características técnicas reais dos equipamentos aumentam o tempo e o custo do projeto. São poucos os estudos que analisam o projeto pelos dois focos, financeiro e técnico. O objetivo principal desse trabalho é analisar a viabilidade da construção de plantas, mais flexíveis do ponto de vista técnico e financeiro, que se adaptem as mudanças de cargas e da economia, ou alterações na planta ao longo do tempo. Isso foi feito através da análise de índices técnicos (energético e exerético), utilizando-se índices tradicionais, tais como rendimento energético. E também através de parâmetros financeiros tais como VPL e TIR, que permitem fazer uma análise do tempo estimado para o retorno do investimento. Para o primeiro estudo foram variadas as cargas elétrica e térmica. Na segunda etapa desse estudo foram estudados três cenários financeiros diferentes, pra saber qual seria a opção mais interessante e qual dos produtos da usina tem maior influência sobre a parte econômica. No segundo estudo foram variadas a produção de cana de açúcar e o consumo de vapor da fábrica, com o objetivo de descobrir qual a influência desses parâmetros nos índices técnicos e financeiros. O objeto deste trabalho é uma usina de açúcar e álcool com potência média de 70MW, composta por uma caldeira, uma turbina de contrapressão, e uma turbina de condensação, que fornecem vapor de seu escape para o processo de fabricação de açúcar e álcool.

**Palavras Chave:** Análise Exerética, Balanço Exerético, Eficiência Exerética, Valor Presente Líquido e Taxa Interna de Retorno.



## ABSTRACT

---

In design optimization, there are two aspects that are very important, the financial and technical one. As well approach in the design phase, analyzing the plant's behavior out of the normal operation conditions. The cost estimate accurate and real technical characteristics of equipment increases the time and cost of the project. There are few studies analyzing the same project by the two points of view, financial and technical. The main objective of this study is to analyze the feasibility of building plants, more flexible in technical and financial terms, to suit the changing loads and the economy, or changes in the plant over time. This was done through analysis of technical indexes (energy and exergy), using traditional indexes, such as energy efficiency, and also through financial metrics such as NPV and IRR, to allow an analysis of the estimated time for return on investment. For the first study were varied the electrical and thermal loads. In the second phase of this study were evaluate three different financial scenarios, to know what would be the most interesting option, and what products the plant has a greater influence on the economics. In the second study were varied to produce sugar cane and steam consumption of the plant, as the aim of discovering the influence of these parameters in the technical and financial indexes. The object of this work is a sugar and alcohol plant with an average power of 70MW, comprising a boiler, a backpressure turbine and a condensing turbine, which provide steam for his escape to the process of manufacturing of sugar and alcohol.

**Keywords:** Exergy Analysis, Exergy Balance, Second Law Efficiency, Net Presente Value , Internal Rate of Return.

## SÍMBOLOS EM GERAL

Símbolos	Denominação	Unidade
$ex$	Exergia específica	kJ/kg
$h$	Entalpia específica	kJ/kg
$P$	Pressão	bar
$s$	Entropia específica	kJ/kg.K
$\dot{m}$	Fluxo mássico	kg/s
$PCI$	PCI do bagaço de cana	kJ/kg
$E$	Exergia	kJ
$\dot{E}$	Taxa de exergia	kJ/s
$H$	Entalpia	kJ
$\dot{H}$	Taxa de entalpia	kJ/s
$S$	Entropia	kJ/K
$\dot{S}$	Taxa de entropia	kJ/s.K
$T$	Temperatura	K
$\dot{W}$	Taxa de trabalho	kJ/s
$\dot{Q}$	Taxa de calor	kJ/s
$\dot{X}$	Taxa de exergia transferida em forma de calor	kJ/s
$i$	Irreversibilidade	kJ/s
$FUE_I$	Fator de Utilização de energia	adimensional
$FUE_{II}$	Fator de Utilização de exergia	adimensional
$FC$	Fluxo de Caixa	R\$
$VPL$	Valor Presente Líquido	R\$
$TMA$	Taxa Mínima de Atratividade	%
$TIR$	Taxa Interna de Retorno	%
$CVU$	Consumo de Vapor da Usina	kgv/tc
$CES$	Coefficiente de Expansão da Safra	adimensional
$i$	Taxa de juros	%
$n$	Concentração de nitrogênio no combustível	%
$o$	Concentração de oxigênio no combustível	%
$c$	Concentração de carbono no combustível	%

## SÍMBOLOS GREGOS

Símbolos	Denominação	Unidade
$\eta_I$	Eficiência energética	%
$\eta_{II}$	Eficiência exergética	%
$\varphi$	Coefficiente da correlação de exergia química	adimensional

## SÍMBOLOS SUBESCRITOS

Símbolos	Denominação	Unidade
<i>vc</i>	Volume de controle	-
<i>e</i>	Entrada	-
<i>s</i>	Saída	-
<i>sec o</i>	Na base seca	-
<i>comb</i>	Combustível	-
<i>I</i>	Energético	-
<i>II</i>	Exergético	-
0	Condições termodinâmica do meio ambiente	-

## SÍMBOLOS SOBRESCRITOS

Símbolos	Denominação	Unidade
<i>CH</i>	Química	-
<i>PH</i>	Física	-

## FIGURAS

---

<b>Capítulo 1 - Introdução</b>	<b>Pg.</b>
Figura 1. 1 Distribuição da oferta de energia interna no Brasil em 2008 (Fonte: BEN 2009).....	2
Figura 1. 2 Esquema do processo de cogeração da usina de cana de açúcar.....	4
<b>Capítulo 2 – Fundamentação Teórica</b>	<b>pg.</b>
Figura 2. 1 Representação de entrada, saída e volume de controle (Fonte Moran e Shapiro (2006)).....	7
Figura 2. 2 Volume de controle nas turbinas do ciclo .....	8
Figura 2. 3 Exemplo do sentido da transferência de calor.....	9
Figura 2. 4 Volume de controle nas caldeiras do ciclo.....	13
Figura 2. 5 Exemplo de diagrama de fluxo de caixa (Fonte <a href="http://www.algosobre.com.br/matematica-financeira/diagramas-de-fluxo-de-caixa.html">http://www.algosobre.com.br/matematica-financeira/diagramas-de-fluxo-de-caixa.html</a> acessado em 5 de agosto 2010).....	16
Figura 2. 6 Unidade motora simples que opera segundo um ciclo rankine e seu respectivo diagrama T-s. (Fonte: Van Wylen et al (2003)).....	23
Figura 2. 7 Esquema ciclo com reaquecimento. (Fonte: Van Wylen et al (2003)) .....	24
Figura 2. 8 Esquema ciclo regenerativo .....	24
Figura 2. 9 Esquema de uma planta de açúcar e álcool (Fonte: Serra et al (2007)) .....	25
Figura 2. 10 Sistemas de cogeração I e II. (Fonte: Serra et al (2007)) .....	26
Figura 2. 11 Variação da energia elétrica de saída no rendimento global do sistema e na taxa de recuperação de calor. (Fonte: Ho et al. (2004)) .....	28
Figura 2. 12 Esquema da planta. (Fonte: Fiaschi e Manfrida (1998)).....	30
Figura 2. 13 Gráfico de destruição de exergia para cada componente. (Fonte: Fiaschi e Manfrida (1998)) .....	30
Figura 2. 14 Gráfico da eficiência pela razão de compressão (Fonte: Fiaschi e Manfrida (1998)) .....	31
Figura 2. 15 Gráfico do número de entropia gerada pelo número de unidades de troca de calor na caldeira (Fonte: Reddy et al(2002)) .....	32
Figura 2. 16 Gráfico do número de entropia gerada pela taxa de diferença de temperatura dos gases quentes na caldeira (Fonte: Reddy et al(2002)) .....	32
Figura 2. 17 Gráfico da destruição de exergia pela temperatura de referência (Fonte: Aljundi (2008)).....	33
Figura 2. 18 Gráfico das eficiências em função das condições de produção de vapor (Fonte: Kamate e Gangavati (2008)) .....	34
Figura 2. 19 Esquema da planta de 500 MWe (Fonte: Ganguly et al (2010)).....	35
Figura 2. 20 Parâmetros de eficiência exergetica e energético da planta de 500 MWe (Fonte: Ganguly et al (2010)) .....	36
Figura 2. 21 Esquema de uma planta de açúcar e álcool (Fonte: Nebra et al (1998))....	37
Figura 2. 22 Gráfico da temperatura pelo valor da energia “perdida” (Fonte: Banerjee e Ram (2003)).....	42
Figura 2. 23 Esquema do processo de moagem de papel e celulose (Fonte: Rivera e Cortês (2010)).....	43

Figura 2. 24 Gráfico eficiência exergética versus relação ar/combustível (Fonte: Rivera e Cortês (2010)).....	44
Figura 2. 25 Gráfico do potencial energético e geração de energia na indonésia nos anos de 2001 a 2003 (Fonte: Restuti e Michaelowa (2007)) .....	45

#### **Capítulo 4 – Estudo de casos** **Pg.**

Figura 4. 1 Fluxograma dos estudos de casos .....	50
Figura 4. 2 Figura esquemática resumida da planta .....	51
Figura 4. 3 Variação do Preço do álcool ao longo dos anos. [Fonte: www.unica.com.br] .....	62
Figura 4. 4 Variação do Preço do açúcar ao longo dos anos. [Fonte: www.unica.com.br] .....	62

#### **Capítulo 5 – Resultados e Discussões** **Pg.**

Figura 5. 1 Fator de utilização energético e exergético.....	66
Figura 5. 2 VPL e TIR para o Cenário 1. ....	67
Figura 5. 3 VPL e TIR para o Cenário 2 .....	68
Figura 5. 4 VPL e TIR para o Cenário 3 .....	69
Figura 5. 5 Comparação entre os VPL's para os cenários 1,2 e 3 .....	70
Figura 5. 6 Comparação entre o VPL e o Rendimento global para o cenário 1 .....	71
Figura 5. 7 Potência gerada pelo consumo da usina.....	72
Figura 5. 8 Comparativo entre as potências geradas nas turbinas de contrapressão e condensação.....	73
Figura 5. 9 Gráfico da eficiência energética ( $\eta$ ) do sistema pelo coeficiente de expansão da safra da usina .....	73
Figura 5. 10 Gráfico do fator de utilização de energia pelo coeficiente de expansão da safra da usina .....	74
Figura 5. 11 Comparativo em os fatores de utilização energética utilizando a primeira e segunda lei para sua determinação. ....	75
Figura 5. 12 Gráfico do VPL em função do coeficiente de expansão da safra. ....	76
Figura 5. 13 Gráfico VPL para planta produzindo apenas álcool versus CES .....	77
Figura 5. 14 Gráfico TIR para planta produzindo apenas álcool versus CES.....	77
Figura 5. 15 Gráfico VPL para planta produzindo apenas açúcar versus CES .....	78
Figura 5. 16 Gráfico do VPL e fator de utilização de energia em função do CES.....	79
Figura 5. 17 Gráfico do VPL e rendimento elétrico global em função do CES.....	79

## TABELAS

---

<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	<b>pg</b>
Tabela 1. 1 Taxa de emissão de CO <sub>2</sub> (Fonte: BEN 2009) .....	3
<b>Capítulo 2 – Fundamentação Teórica</b>	<b>pg</b>
Tabela 2. 1 Balanço exergético das turbinas .....	12
Tabela 2. 2 Balanço exergético na caldeira do ciclo .....	13
Tabela 2. 3 Planilha de fluxo de caixa.....	17
Tabela 2. 4 Planilha de custos segundo Bejan et al(1995) .....	22
Tabela 2. 5 Temperaturas e pressões utilizadas nas alimentações das turbinas (Fonte: Serra et al.(2007)) .....	27
Tabela 2. 6 Resultados dos parâmetros de avaliação dos ciclos. (Fonte Serra et al. (2007)) .....	27
Tabela 2. 7 Performance do sistema de cogeração com diferentes cargas de resfriamento (Fonte: Ho et al (2004)) .....	29
Tabela 2. 8 Performance do sistema de cogeração com diferentes períodos de operação (Fonte: Ho et al (2004)) .....	29
Tabela 2. 9 Condições de geração de vapor (Fonte: Kamate e Gangavati (2008)) .....	33
Tabela 2. 10 Fluxo energético da planta de 500 MWe (Fonte: Ganguly et al. (2010))..	36
Tabela 2. 11 Tabela dos custos exergéticos unitários (Fonte: Nebra et al (1998)).....	39
Tabela 2. 12 Estudo de caso traduzida de Knight et al (2004) .....	41
Tabela 2. 13 Estudo de caso traduzida de Banerjee e Ram (2003) .....	42
<b>Capítulo 4 – Estudo de casos</b>	<b>pg</b>
Tabela 4. 1 Características do combustível – BAGAÇO DE CANA.....	51
Tabela 4. 2 Informações da planta.....	54
Tabela 4. 3 Descrição dos casos estudados .....	58
Tabela 4. 4 Descrição das alterações nos preços de venda dos produtos .....	59
Tabela 4. 5 Casos estudados .....	60
<b>Capítulo 5 – Resultados e discussões</b>	<b>pg</b>
Tabela 5. 1 Tabela com os valores das propriedades do vapor e água da planta. (valores para o caso nominal).....	64
<b>Apêndice A</b>	<b>pg</b>
Tabela A. 1 Valores obtidos da interpolação.....	95
Tabela A. 2 Dados utilizados na solução das equações.....	99

## SUMÁRIO

---

RESUMO .....	vi
ABSTRACT .....	vii
SÍMBOLOS EM GERAL.....	viii
FIGURAS .....	x
TABELAS .....	xii
SUMÁRIO.....	xiii
1. Introdução.....	1
1.1 Cenário Energético Brasileiro.....	1
1.2 Objetivo do Trabalho .....	5
1.3 Abordagem do Trabalho .....	5
2. Fundamentação Teórica.....	7
2.2 Lei de Conservação da Massa.....	7
2.3 Primeira Lei da Termodinâmica .....	8
2.4 Segunda Lei da Termodinâmica e Exergia .....	9
2.5 Rendimento e Fator de Utilização de Energia/Exergia.....	14
2.6 Engenharia Econômica .....	15
2.6.1 Fluxo de Caixa.....	16
2.6.2 Diagrama de Fluxo de Caixa .....	16
2.6.3 Planilha de Fluxo de Caixa.....	17
2.6.4 Taxa Mínima de Atratividade (TMA) .....	17
2.6.5 Payback.....	18
2.6.6 Valor Presente Líquido (VPL).....	18
2.6.7 Taxa Interna de Retorno (TIR) .....	19
2.6.8 Receitas e Custos .....	20
2.7 Ciclos Termodinâmico.....	23
2.7.1 Ciclo Rankine .....	23
2.8 Revisão (Artigos).....	25
3. Metodologia.....	47
3.1 Pergunta de Pesquisa .....	47
3.2 Perguntas norteadoras .....	47
3.3 Caracterização da Pesquisa .....	48
3.4 Delimitação da Pesquisa .....	48
3.5 Dados da Pesquisa .....	49
4. Estudo de Caso .....	50
4.2 Descrição da planta .....	50
4.3 Equações .....	55
4.4 Estudo da variação de cargas .....	57
4.5 Estudo da variação da produção de cana de açúcar e do consumo de vapor da usina .....	59

5.	Resultados e Discussões .....	63
5.2	Resultados do estudo da variação das cargas.....	65
5.3	Resultado do estudo da variação da produção de cana de açúcar e do consumo de vapor da usina .....	71
6.	Conclusões e Sugestões .....	80
6.1	Considerações finais .....	80
6.2	Sugestões .....	82

# 1. Introdução

## 1.1 Cenário Energético Brasileiro

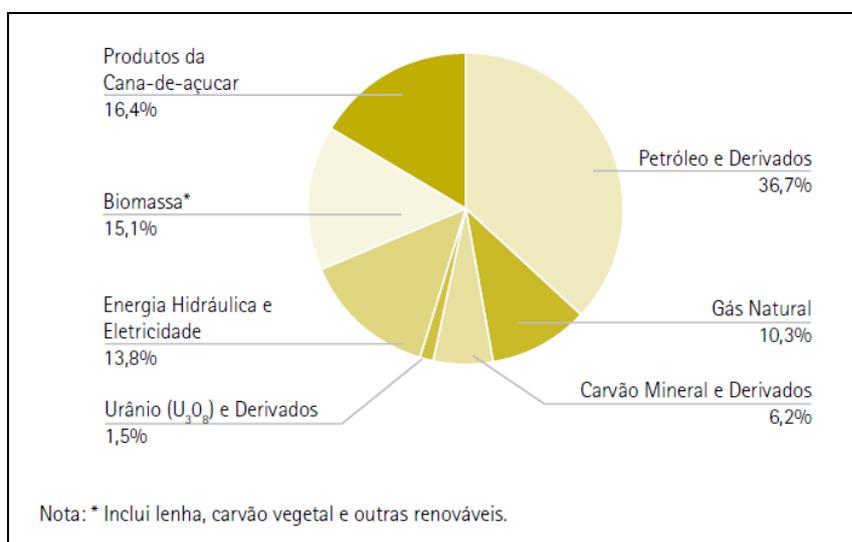
O mercado de energia brasileiro vem tendo um crescimento significativo nos últimos anos. Segundo dados do balanço energético nacional 2009 (BEN, 2009), o seu forte crescimento nas últimas décadas foi um grande impulsionador para a busca da diversificação das fontes de energia. A crise energética ocorrida há alguns anos trouxe à tona a falta de preparo do nosso país para atender ao crescimento da demanda energética. Isso ocorreu por falta de investimento nos outros setores de geração de energia elétrica, pois a matriz brasileira é principalmente hidroelétrica. Por um lado é bom, pois a hidroeletricidade é uma fonte renovável de energia elétrica. Mas por outro lado é muito arriscado ter praticamente um tipo de fonte de energia. Neste caso da energia hidroelétrica, uma seca mais prolongada comprometeria o fornecimento de energia no país ou numa determinada região.

No ano de 2008, o Brasil obteve um crescimento na sua oferta interna de energia (OIE) de 5,6%, chegando à marca de 252,2 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep). Este crescimento tem a mesma ordem de grandeza do aumento do produto interno bruto (PIB) nacional. Já o consumo de eletricidade, inclusas as parcelas compreendidas pela auto-produção, cresceu 4,0%. Então se observa que foi mantida estável a razão entre a OIE e o PIB, em 160 tep/US\$, e a intensidade elétrica sofreu uma queda passando a ser de 0,316kWh/US\$. Tanto a oferta *per capita* de energia quanto o consumo *per capita* de eletricidade sofreram aumento no último ano, respectivamente de 1,261 para 1,314 tep/hab, e de 2,177 para 2,234 kWh/hab (BEN, 2009).

Depois dos grandes problemas ocasionados pela crise energética brasileira, devido à matriz energética ser quase que exclusivamente hidrelétrica, o governo e investidores do mercado de energia nacional começaram a aumentar significativamente seus investimentos na diversificação dessa matriz. Por exemplo, o crescimento na participação do gás natural na matriz nacional, atingindo 10,3% da matriz, faz parte dos destaques dos resultados da pesquisa feita pelo Ministério de Minas e Energia em 2008. Mas até que ponto este tipo de empreendimento é interessante para os investidores da área de energia, essa é uma das perguntas que este trabalho tenta resolver. Os subprodutos das usinas de cana de açúcar (bagaço, etanol, caldo e melaço para fins energéticos) também cresceram sua participação na

matriz, para 16,4%, um aumento de meio ponto percentual em relação a 2007. Assim sendo, a cana-de-açúcar firmou-se na segunda posição dentre as principais fontes de energia primária no Brasil, atrás apenas do petróleo e seus derivados (BEN 2009). Dentro da própria usina há basicamente três produtos, um é a bioeletricidade e os outros são açúcar e álcool. Quais seriam os valores tarifários interessantes para que as usinas deixassem de produzir energia e ajudar na diversificação das fontes de geração de energia elétrica, para produzir álcool e açúcar? Esse também foi outro questionamento deste trabalho.

Baseado nas condições hidrológicas do começo de 2008, foram adotadas medidas estratégicas a fim de preservar o nível mínimo de armazenamento nos reservatórios do país. Em decorrência disso, a energia hidráulica teve uma pequena redução na sua fatia de participação na matriz energética, com a queda de um pouco mais de um ponto percentual. Feita uma avaliação dos valores acumulados ao longo do ano, a participação dessa fonte caiu para 13,8%, como pode ser observado na figura 1. 1. Por outro lado, a geração termoeletrica aumentou para 37,9%. Como essas usinas estão próximas aos grandes centros urbanos, ou seja, os maiores consumidores, as perdas nas redes foram reduzidas (BEN, 2009).



**Figura 1. 1 Distribuição da oferta de energia interna no Brasil em 2008 (Fonte: BEN 2009)**

A geração termoeletrica baseada em biocombustíveis pode ser a solução para problemas de oferta de energia, não só para os grandes centros urbanos, mas também para regiões mais isoladas, como a Amazônia, ou para desenvolvimentos em área rurais. Outro aspecto importante da bioenergia é a sua grande contribuição para o meio ambiente, sendo uma solução para os problemas causados pelos combustíveis fósseis. A minimização das consequências devido ao efeito estufa é possível através do uso sustentável de biomassa como

combustível (Lora e Andrade, 2009). Ainda, cria-se uma vantagem no uso desse tipo de tecnologia com o protocolo de Quioto, ratificado em março de 1999, que permite a comercialização de créditos de carbono pela implementação de projetos bioenergéticos. O Brasil pode se beneficiar disso já que possui uma baixa taxa de emissão de poluentes em comparação aos países desenvolvidos, como pode ser observado na tabela 1. 1.

Emissões de CO <sub>2</sub>					
Indicador	Brasil	EUA	Japão	América Latina	Mundo
t CO <sub>2</sub> /hab	1,78	19	9,49	2,14	4,28
t CO <sub>2</sub> / tep OIE	1,48	2,45	2,3	1,83	2,39
t CO <sub>2</sub> / 10 <sup>3</sup> US\$ de PIB <sup>1</sup>	0,43	0,51	0,24	0,54	0,74
t CO <sub>2</sub> / km <sup>2</sup> de superfície	39	622	3.236	46	136

Nota: <sup>1</sup> US\$ em valores correntes de 2000

**Tabela 1. 1 Taxa de emissão de CO<sub>2</sub> (Fonte: BEN 2009)**

A cogeração é amplamente utilizada por usinas de cana de açúcar. As usinas possuem uma grande demanda de energia elétrica para acionamento de máquinas motrizes tais como, bombas de irrigação, motores elétricos nas moendas (no caso de usinas mais novas), nas esteiras, nas facas rotativas, nos desfibradores etc. Na planta estudada a demanda de energia elétrica é de 70MW. Para geração dessa energia a planta possui três turbinas. As usinas possuem também demanda de energia térmica para produção de açúcar e álcool, em equipamentos, como os aquecedores, evaporadores e secadores. Neste trabalho a demanda do processo é de aproximadamente 310 toneladas de vapor por hora. A geração de eletricidade é possível porque a combustão do bagaço resultante do processo de moagem é suficiente para produzir o vapor necessário para o processo de fabricação de álcool e açúcar e energia mecânica necessária para a moagem do processo. A safra estimada de cana para a usina estudada é de três milhões de toneladas por ano. Lora e Andrade (2007) mostram várias possibilidades de ciclos que usam biomassa para geração de eletricidade. Na figura tem-se um esquema do processo de cogeração numa usina de cana de açúcar.

A análise de plantas de geração de açúcar e álcool é extremamente interessante por razões científicas por causa desse potencial de geração de energia limpa. É necessário o estudo desses casos do ponto de vista financeiro porque embora as plantas sejam plenamente viáveis do ponto de vista energético, elas necessitam de um alto investimento.

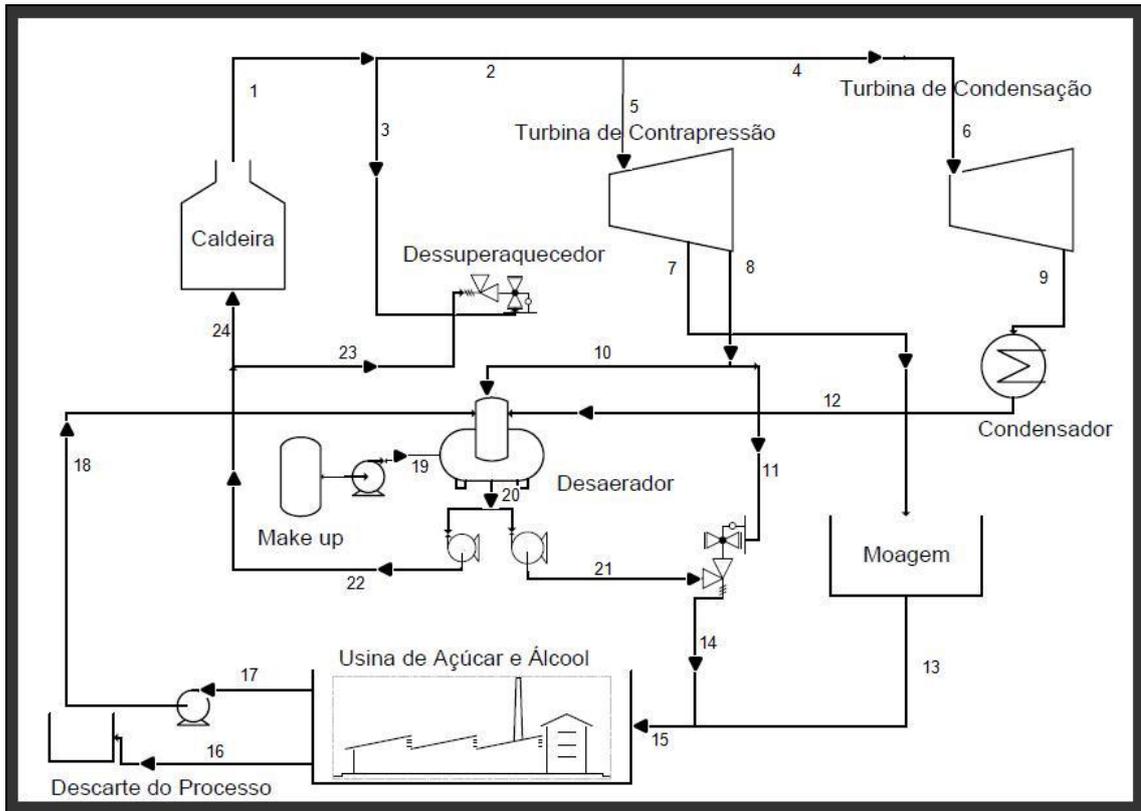


Figura 1. 2 Esquema do processo de cogeração da usina de cana de açúcar

Existem muitos trabalhos em simulação de plantas de geração. Khan e Rasul (2004) fazem uma comparação entre um sistema de cogeração com um sistema sem armazenamento térmico. Cardona e Pacentino (2003) apresentam uma metodologia para estudo de sistemas de trigeração usados em escritórios. Szko e Tolmasquim (2001) apresentam ações do governo brasileiro para aumentar o uso de gás natural. Míguez et al. (2004) apresentam um novo sistema de trigeração para uso residencial.

Adicionalmente, eles estudaram vários métodos operacionais a fim de aperfeiçoar o sistema. Vieira et al. (2004) mostram uma metodologia automática para otimização financeira e exergética de sistemas térmicos. Accadia (2001) apresenta a comparação entre modos de operação em plantas no regime estacionário. Carraretto e Lazzaretto (2004) apresentam um modelo onde a geração total de energia é limitada por condições financeiras, e nesse estudo são avaliados vários preços de combustível e eletricidade. Wischusen and Schmitz (2004) apresentam as vantagens de simulações dinâmicas, ao invés de estáticas, quando se analisam sistemas térmicos. Knight et al. (2004) descrevem uma análise de uma planta de cogeração baseada em rendimentos econômicos. Ho et al. (2004) simularam um sistema de cogeração no qual as cargas e os tempos de operação da turbina e do *chiller* de

absorção foram variados. Manolas et al. (1996) apresentam o uso do algoritmo genético na fase de otimização. Gamou et al. (2002) otimizam uma planta de cogeração com variações diárias, com incertezas na demanda de energia. Magnani e Melo (2009) apresentam um método para gerar modelos flexíveis para usar em otimização financeira de plantas térmicas operando a cargas variáveis. Porém nenhum desses trabalhos busca relacionar os resultados financeiros com os técnicos, é isso que neste trabalho tenta-se fazer, procurar alguma relação entre esse índices para auxiliar no processo de tomada de decisão.

## 1.2 Objetivo do Trabalho

O principal objetivo deste trabalho é descobrir qual a influência de alguns parâmetros de uma usina de cana de açúcar nos índices de avaliação técnica e financeira. Tais como, rendimento elétrico, rendimento exergético, FUE (Fator de Utilização de Energia), TIR (Taxa Interna de Retorno) e VPL (Valor Presente Líquido). Baseado nestes estudos foram indicadas as melhores soluções para utilização de seus recursos energéticos. Bem como buscar relações entre os principais índices de avaliação energética, exergética e financeira. Isso foi feito através da busca exaustiva dentre os casos estudados. Nestes casos foram variados os seguintes parâmetros:

- Energia elétrica gerada - que pode ser comercializada com a concessionária local;
- Energia térmica - que é necessária para produção de açúcar e álcool;
- Safra - que define qual a quantidade de insumo para a produção de açúcar e álcool e a quantidade de combustível disponível para a caldeira;
- Consumo de vapor da usina – este parâmetro define qual a quantidade de vapor necessária para produção de açúcar e álcool na usina;

## 1.3 Abordagem do Trabalho

O presente trabalho começa no capítulo 1 com a descrição do cenário energético brasileiro, qual o problema para tentar ser resolvido e qual o objetivo do trabalho. A importância do tema para a sociedade também foi apresentada, além da estrutura do trabalho.

No capítulo 2 está a fundamentação teórica necessária para compreensão dos fenômenos descritos na planta. Os cálculos dos índices técnicos e financeiros usados na seleção do melhor projeto são apresentados neste capítulo. Além da revisão dos trabalhos que estão sendo feitos nessa área, no Brasil e no mundo.

Já no capítulo 3, é apresentada a metodologia adotada no trabalho, bem como a pergunta de pesquisa e os tipos de dados utilizados.

No capítulo 4 a planta é descrita detalhadamente e são apresentados os casos estudados.

No capítulo 5 são apresentados os resultados das análises de performance energética, exergética e financeira da planta. Neste capítulo serão apresentados alguns resultados que podem ajudar na compreensão do assunto que serão discutidos no capítulo 2.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas através dos estudos realizados e propostas para continuação desse trabalho.

## 2. Fundamentação Teórica

Nesse capítulo estão apresentadas as principais equações e hipóteses utilizadas na modelagem da planta estudada. Alguns exemplos serão mostrados ao longo do texto para facilitar a compreensão. Na análise termodinâmica da planta foram aplicadas as equações de conservação da massa, conservação da energia (1ª Lei da termodinâmica), o balanço de exergia baseado na primeira e na segunda lei da termodinâmica

Além disso este capítulo tem por objetivo contextualizar a dissertação em meio aos trabalhos já feitos na área de análise de sistemas térmicos, buscando sempre mostrar as conexões deste trabalho com os já realizados. Nesta revisão os trabalhos estão agrupados segundo o tipo de análise: análise energética, exérgica e financeira. Uma breve revisão de ciclos termodinâmicos também foi realizada para melhor compreensão da revisão.

### 2.2 Lei de Conservação da Massa

A equação geral para a conservação da massa em um volume de controle em regime transiente está apresentada pela equação 2.1 e o volume de controle na figura 2. 1 .

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (2.1)$$

Onde:

$\frac{dm_{vc}}{dt}$  = variação da massa ao longo do tempo dentro do volume de controle

$\dot{m}_s$  = vazão mássica de saída no volume de controle

$\dot{m}_e$  = vazão mássica de entrada no volume de controle

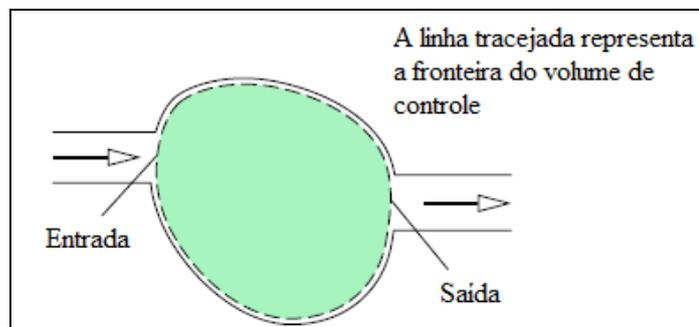


Figura 2. 1 Representação de entrada, saída e volume de controle (Fonte Moran e Shapiro (2006))

Em regime permanente a equação 2.1 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (2.2)$$

### 2.3 Primeira Lei da Termodinâmica

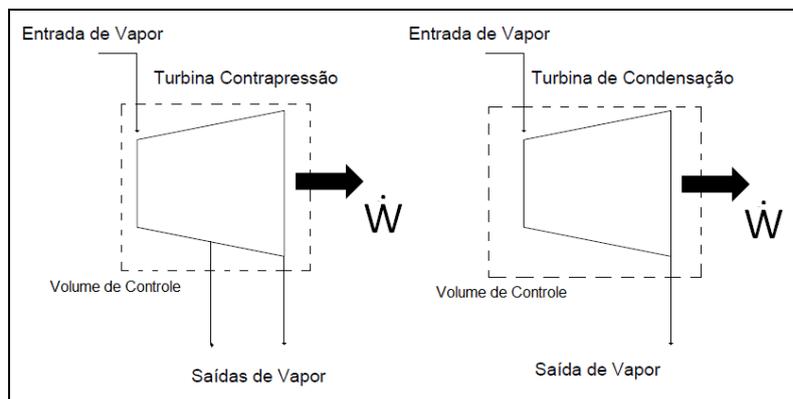
A primeira lei da termodinâmica é a lei de conservação de energia. A equação 2.3 representa a forma da primeira lei para volumes de controle em regime permanente. Através dessa equação é possível quantificar o fluxo energético na forma de calor, trabalho e no fluxo mássico.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_s h_s - \sum \dot{m}_e h_e \quad (2.3)$$

Nesta equação o  $\dot{Q}$  é a taxa de calor transferida para/pelo sistema [kW] e  $\dot{W}$  é a taxa de trabalho realizado para/pelo sistema [kW].  $\dot{m}$  representa a vazão mássica e  $h$  a entalpia [kJ/kg]. A entalpia é a grandeza física que busca medir a energia em um sistema termodinâmico, que está disponível em forma de calor.

Como exemplo da aplicação da primeira lei, foi feito o balanço de energia nas turbinas da planta estudada, que é apresentada no capítulo 4.

Na figura 2. 2 estão mostrados esquematicamente os volumes de controles adotados no balanço de energia das turbinas de contrapressão e condensação. O vapor na saída da turbina de condensação segue para o condensador e a saída da turbina de contrapressão para moagem e fabricação de álcool e açúcar.



**Figura 2. 2** Volume de controle nas turbinas do ciclo

## 2.4 Segunda Lei da Termodinâmica e Exergia

A primeira lei relaciona as diferentes formas de energia; calor, trabalho, etc. A experiência mostra que há um sentido definido para os processos espontâneos, porém através da primeira lei não é possível obter esse tipo de informação. A segunda lei pode ser usada para prever se um processo qualquer que envolve fluxos de energia pode ocorrer, ou ainda se os sentidos dos processos de transferência de calor são possíveis. A segunda lei nos informa que a transferência espontânea de calor ocorre sempre da fonte quente para a fonte fria, como mostrado na figura 2. 3.

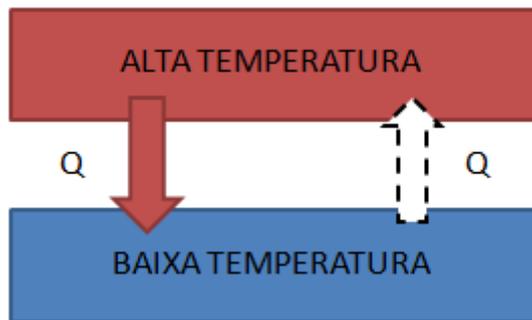


Figura 2. 3 Exemplo do sentido da transferência de calor

Através da união da primeira e segunda lei, os cientistas definiram um novo conceito, chamado de exergia, que começou a ser mais amplamente difundido na Europa nas décadas de 70 e 80. Antecipando um pouco a definição, exergia é a propriedade que quantifica o potencial de uso, a parte da energia que pode realmente ser utilizada em forma de trabalho.

Quando uma quantidade fixa de matéria sai de um estado, em um sistema fechado, para o estado do meio ambiente, apresenta-se como uma oportunidade de gerar trabalho. Ao passo que o estado deste sistema fica mais próximo do estado do meio ambiente, estas oportunidades de desenvolvimento de trabalho são reduzidas. E este é o chamado estado morto. Neste estado é atingido o equilíbrio termoquímico e mecânico da matéria. Além disso, nestas condições não é mais possível nenhuma mudança espontânea entre o sistema e o meio ambiente. Este estado é utilizado para definir uma característica da matéria, que é a quantificação da parte útil da energia, chamada de exergia.

Há várias definições utilizadas para o termo exergia. Kotas (1995) define como o máximo trabalho que pode ser obtido de uma dada forma de energia, tomando o meio

ambiente como estado de referência. Segundo Bejan et al (1995), exergia é o máximo de trabalho teórico útil possível quando os sistemas interagem para o equilíbrio.

A exergia específica para fluxos em um volume de controle é apresentada da seguinte forma:

$$ex_{total} = ex^{PH} + ex^{CH} \quad (2.4)$$

Onde:

$ex^{PH}$  é a exergia física

$ex^{CH}$  é a exergia química

Na exergia física específica duas parcelas foram desconsideradas, a parte da exergia cinética e potencial. Portanto a expressão da exergia física fica apenas função das entalpias e entropias específicas, respectivas as entradas ou saídas, e das propriedades no estado morto.

$$ex^{PH} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (2.5)$$

Os termos  $h$  e  $s$  são a entalpia específica e a entropia específica, respectivamente. Os termos  $h_0$ ,  $s_0$  e  $T_0$  são entalpia e entropia específicas, e temperatura, todos referentes ao estado morto. A temperatura e pressão adotadas para o estado morto são 25°C e 1 atm (A temperatura usada na expressão 2.5 deve ser em kelvin).

A equação 2.6 representa o balanço exergético para volume de controle em regime permanente.

$$\dot{X}_{calor} - \dot{W} = \sum \dot{m}_s ex_{total\ s} - \sum \dot{m}_e ex_{total\ e} + \dot{I} \quad (2.6)$$

Onde:

$\dot{I}$  é a irreversibilidade

$\dot{X}_{calor}$  é a taxa de exergia transferida em forma de calor

A irreversibilidade do sistema contabiliza a taxa de exergia destruída. Através da equação pode-se quantificar e identificar os principais pontos de destruição de exergia.

A equação 2.5 expressa apenas a parcela da exergia física da substância. Para a modelagem de equipamentos onde há utilização de combustíveis, outra parcela da exergia deve ser levada em consideração, a exergia química. Nesta etapa de modelagem, este trabalho

fez uso do modelo contido no Kotas (1995), devido a sua simplicidade. Moran e Shapiro (2006) também propõe um outro modelo para cálculo da exergia química.

Neste trabalho o combustível utilizado é o bagaço de cana, que é um combustível sólido. Em Kotas (1995) são propostas as seguintes expressões para o cálculo aproximado da exergia química de combustíveis sólidos, com exatidão estimada em  $\pm 1\%$ .

$$ex^{ch}_{comb} = [(PCI_{comb}) + w \times h_{fg}] \times \varphi_{seco} + [ex^{ch}_s - (PCI)_s] \times s \quad (2.7)$$

Onde:

$$\varphi_{seco} = \frac{1,0438 + 1,1882 \times \frac{h}{c} - 0,2509 \times \left(1 + 0,7256 \frac{h}{c}\right) + 0,0383 \frac{n}{c}}{\left(1 - 0,3035 \times \frac{o}{c}\right)} \quad (2.8)$$

Nas equações 2.7 e 2.8 os símbolos h,c,n,s e o, representam as concentrações na base seca de hidrogênio, carbono, nitrogênio e oxigênio, respectivamente. w[%] representa a umidade o bagaço,  $h_{fg}$  [kJ/kg] é a entalpia da água a temperatura ambiente (25°C) e  $PCI_{comb}$  é o poder calorífico inferior do combustível.

A expressão acima, equação 2.8, deve ser utilizada para razão das concentrações de oxigênio e carbono, na base úmida, com valores entre 0,667 e 2,67. No caso estudado esta razão (o/c) tem valor 0,936, aproximadamente.

A segunda parcela da equação 2.7 foi desprezada em nosso estudo, devido ao baixo valor da concentração de enxofre no bagaço da cana. Em nenhuma das referências citadas em Garcia (2002) foi encontrada uma concentração significativa de enxofre.

O modelo feito por Kotas (1995) é uma referência clássica com relação a cálculo da exergia química de combustíveis. Ainda hoje vários artigos utilizam as expressões desenvolvidas por Kotas (1995), tais como Aljundi(2009) que faz o estudo da influência das condições do ambiente na destruição de exergia dos equipamentos. Neste artigo, Kotas (1995) é usado para calcular a exergia química do combustível. Bem como em Kamate e Gangavati (2009), onde é feita análise exérgica de dois ciclos, para calcular a exergia química do combustível foram utilizadas as correlações do Kotas(1995). Em Rian e Ertevag (2011) foi feito o estudo do impacto de variação da pressão na geração de vapor na eficiência exérgica do ciclo, mais uma vez neste artigo o calculo da exergia química do combustível é feito através de Kotas(1995). Gutiérrez e Vandecasteele (2011) fizeram a análise exérgica de um

sistema de calcinação a fim de economizar combustível e emitir menos CO<sub>2</sub> para a atmosfera. O combustível utilizado foi Gas natural, e as relações para cálculo de exergia química de combustíveis gasosos foi extraída de Kotas (1995). Gharagheizi e Mehdi (2007) fazem um comparativo entre dois modelos, o primeiro usando os valores da exergia química para elementos padrão encontrados usando a formulação do Kotas (1995) e outro utilizando algoritmo genético. E por fim, Caliskan e Hepbasli (2010) fazem estudo dos custos da energia e da exergia nos setores industriais e residencial. Para analisar os combustíveis líquidos foram utilizados dois modelos o modelo do Szargut(1988) e Kotas (1995). O modelo apresentado pelo Szargut (1988) também é bastante utilizado para este tipo de cálculo, porém não foi utilizado neste trabalho, pois o trabalho do Kotas (1995) é uma referência mais atual.

Os produtos da combustão são utilizados na própria caldeira, nos pré-aquecedores e economizadores. A temperatura desses produtos já bastante baixa após a saída dos economizadores, bem como a qualidade exergética do fluxo, logo não sendo suficiente para o aproveitamento do mesmo.

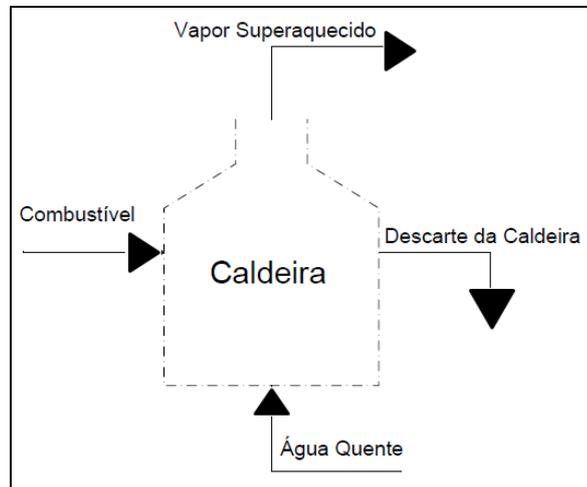
Através da figura 2. 2 e da figura 2. 4 pode se ter um idéia ilustrativa dos fluxos de exergia entrando e saindo do volume de controle. A grande diferença entre o balanço energético e exergético é que no exergético há de se levar em consideração as irreversibilidades do sistema, ou seja, a taxa de exergia destruída. Caso não seja levada em consideração o balanço não fecha.

A tabela 2. 1 representa os fluxos exergéticos das turbinas, com volume de controle mostrado na figura 2. 2. O caso aqui apresentado é o nominal, como pode ser visto que a potência de saída está próxima de 70MW. As turbinas são bem isoladas, então as perdas de calor transferido são praticamente nulas. E exergia da saída é elevada, isto é necessário, pois o vapor de saída das turbinas é utilizado para atender a demanda do processo.

**Tabela 2. 1 Balanço exergético das turbinas**

		[kW]	[%]
	Taxa líquida de exergia entrando	160359	100,0%
Distribuição da exergia saindo	Potência desenvolvida	66421	41,4%
	Potência do calor transferido	0	0,0%
	Taxa líquida do fluxo de vapor saindo	82272	51,3%
Distribuição da exergia perdida	Irreversibilidade nas turbinas	11666	7,3%
	Soma das saídas	160359	100,0%

Já na tabela 2.2, o que pode se observar que há uma grande irreversibilidade. Este componente, como já foi visto na revisão bibliográfica, apresenta grandes taxas de irreversibilidades nos ciclos em que são utilizados.



**Figura 2. 4** Volume de controle nas caldeiras do ciclo

Nesta tabela pode ser observada a importância do uso da exergia. A partir deste ponto, ou seja, descobertos os pontos das principais perdas do sistema, cabe ao responsável pela análise verificar o que pode ser feito para melhoria do sistema.

**Tabela 2. 2** Balanço exergético na caldeira do ciclo

		[kW]	[%]
	Taxa Líquida de Exergia Entrando	510945	100,0%
Distribuição da Exergia Saindo	Potência Desenvolvida	0	0,0%
	Potência do Calor Transferido	0	0,0%
	Taxa Líquida do Fluxo de Vapor saindo	161839	31,7%
	Fluxo de Descarte da Caldeira	957	0,2%
Distribuição da Exergia Perdida	Irreversibilidade na Caldeira	348149	68,1%
	Soma das Saídas	510945	100,0%

No exemplo da tabela 2.1 e da tabela 2.2 mostradas, pode ser observado que na caldeira a irreversibilidade representa 68,1% do valor da taxa de exergia que entra no equipamento, enquanto na tabela 2. 1, é mostrado que nas turbinas a irreversibilidade representa 7,3% do valor exergético de entrada.

Utilizando estas equações e hipóteses foram calculadas todos os valores das exergias do sistema estudado. Os resultados serão mostrados no capítulo 5.

## 2.5 Rendimento e Fator de Utilização de Energia/Exergia

Uma das vantagens da análise através da segunda lei é a descoberta dos locais onde ainda há energia útil para ser aproveitada. Através desta análise é possível diferenciar se a exergia está sendo perdida, ou seja, pode-se ainda tentar recuperá-la, ou se a exergia está sendo destruída e não se pode fazer mais nada.

Além dessas equações, outras foram usadas para avaliação do ciclo. Os rendimentos elétricos são apresentados nas equações 2.9 e 2.10. A equação 2.9 leva em consideração apenas a 1ª Lei da termodinâmica, já na equação seguinte a eficiência leva em consideração a exergia. Como pode ser visto ambas possuem o mesmo numerador, já que a exergia de saída neste caso é a própria potência gerada .

$$\eta_{I,CICLO} = \frac{\sum \dot{W}_{SAIDA}}{\dot{E}_{COMB}} \quad (2.9)$$

$$\eta_{II,CICLO} = \frac{\sum \dot{W}_{SAIDA}}{\dot{X}_{COMB}} \quad (2.10)$$

Onde:

$\dot{W}_{SAIDA}$  é a potência gerada pelas turbinas.

$\dot{E}_{COMB}$  é a potência do combustível que entra na caldeira.

$\dot{X}_{COMB}$  é a potência exergética do combustível que entra na caldeira.

Outro parâmetro utilizado na avaliação da planta foi um rendimento que leva em consideração a energia e/ou exergia utilizada no processo de fabricação do açúcar e álcool, este rendimento é aqui chamado de FUE (Fator de Utilização de Energia/Exergia). Este termo foi adotado seguindo a nomenclatura utilizada em Kamate e Gangavati (2008), para facilitar a

compreensão, já que na maioria dos artigos utiliza-se o termo eficiência para todos os casos. O FUE com índice I indica que os valores utilizados para o seu cálculo são valores energéticos, e o índice II indica valores exergéticos. As equações 2.11 e 2.12, apresentadas abaixo, revelam como é a expressão destes FUE's.

$$FUE_{I,CICLO} = \frac{\sum \dot{W}_{SAIDA} + \sum \Delta \dot{H}_{PROCESSO}}{\dot{E}_{COMB}} \quad (2.11)$$

$$FUE_{II,CICLO} = \frac{\sum \dot{W}_{SAIDA} + \sum \dot{X}_{PROCESSO}}{\dot{X}_{COMB}} \quad (2.12)$$

Onde:

$\dot{H}_{PROCESSO}$  é a potência do vapor utilizada na moagem e na produção de açúcar e álcool.

$\dot{X}_{PROCESSO}$  é a potência exergética do vapor utilizada na moagem e na produção de açúcar e álcool.

## 2.6 Engenharia Econômica

A partir de agora será tratada a parte teórica de engenharia econômica, revisando pontos importantes relacionados à parte financeira. E dando uma abordagem necessária para a melhor compreensão do texto.

O sucesso de um projeto passa através da escolha correta de parâmetros técnicos e financeiros. A viabilidade técnica pode ser realizada através de procedimentos de engenharia e equipamentos disponíveis no mercado. Porém, a viabilidade técnica não é suficiente para a realização de um projeto. É necessário também a viabilidade econômica do projeto, isto é, deve haver uma remuneração adequada para o capital investido em um determinado tempo. Esse tempo depende do tamanho do investimento. Para o cálculo completo e mais preciso da viabilidade econômica é requerida a estimativa de muitos custos envolvidos no projeto, por exemplo, custo de investimento inicial, custo do combustível, custo de operação e manutenção, dentre outros.

A engenharia econômica faz a hipótese que o investidor possui o capital necessário para o investimento, seja próprio ou terceirizado. Aqui neste capítulo não é analisada a viabilidade legal, política etc., que também são de suma importância num projeto real.

### 2.6.1 Fluxo de Caixa

O problema analisado envolve despesas e receitas ao longo dos anos. A diferença entre os recebimentos e gastos do investimento ao longo de um determinado tempo dá-se o nome de fluxo de caixa.

A representação do fluxo de caixa pode ser feita por meio de diagramas ou tabelas. Por definição da engenharia econômica, as entradas de caixa são consideradas positivas e as saídas, negativas.

$$FC(j) = \sum_{j=1}^N \text{entradas}(j) + \sum_{j=1}^N \text{despesas}(j) \quad (2.13)$$

### 2.6.2 Diagrama de Fluxo de Caixa

O diagrama de fluxo de caixa é uma ferramenta onde estão representadas, graficamente, as entradas e saídas de dinheiro para um empreendimento, ao longo de um período. O eixo horizontal representa o tempo no qual ocorrem as entradas ou saídas, como pode ser observado na figura 2. 5. As entradas e ou saídas são diferenciadas pelas flechas indicativas do tipo de fluxo. Flechas para baixo indicam saída do fluxo de caixa, flechas para cima indicam recebimento no fluxo de caixa. A seguir é mostrado um exemplo deste diagrama.

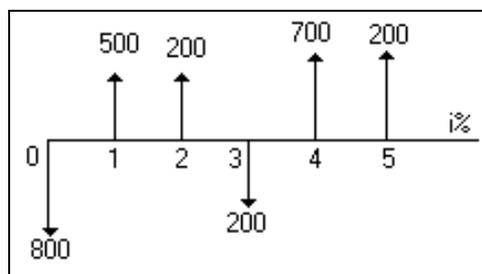


Figura 2. 5 Exemplo de diagrama de fluxo de caixa (Fonte <http://www.algosobre.com.br/matematica-financeira/diagramas-de-fluxo-de-caixa.html> acessado em 5 de agosto 2010)

### 2.6.3 Planilha de Fluxo de Caixa

A tabela que relaciona os fluxos aos seus respectivos instantes de tempo é a planilha de fluxo de caixa. Podemos apresentar o mesmo exemplo da figura 2. 5 em forma de planilha

**Tabela 2. 3 Planilha de fluxo de caixa**

Período	Valor
0	-800
1	500
2	200
3	-200
4	700
5	200

### 2.6.4 Taxa Mínima de Atratividade (TMA)

A priori, é necessário estabelecer um conceito que servirá como base comparativa para os outros parâmetros. Em trabalhos que levam em consideração a parte econômica, deve-se fixar a TMA (Taxa Mínima de Atratividade).

A TMA é uma taxa de juros que simboliza o mínimo valor no qual um investidor está disposto a lucrar quando faz um investimento. A taxa mínima de atratividade é suposta constante durante todo o tempo de projeto. Não é necessariamente a taxa utilizada no mercado, pode ser a taxa considerada razoável pelo investidor. Essa taxa expressa a avaliação do dinheiro no tempo. Neste estudo, particularmente, a inflação não foi levada em consideração.

Segundo Ferreira (2000) é comum estabelecer-se taxas de atratividade que variam entre 6 e 18% a.a.. Tudo dependerá das condições e oportunidade econômico-financeiras em que as unidades de produção sejam submetidas, ou seja, depende da empresa, do projeto, qual setor está inserido, sua estrutura ou composição de seu capital social, expectativa dos proprietários, capital acionário etc. Entretanto, esses valores indicados como faixa para a TMA, adotando-se inicialmente o valor mínimo de 6% a.a., significa o estabelecimento de um piso de ganho real no mercado financeiro de uma economia estável.

### 2.6.5 Payback

*Payback*, ou tempo de recuperação de capital, é um dos parâmetros mais usados em análise de investimentos. Muitas vezes este parâmetro é usado de forma errada, procura-se igualar o valor inicial investido com a soma dos lucros líquidos operacionais do empreendimento. No instante em que estes valores se equiparam, admite-se que nesse exato momento houve a recuperação do capital investido, e este conseqüentemente é o tempo de recuperação do capital.

Neste trabalho o *Payback* que será utilizado é o PBD (*payback* descontado), que leva em consideração o dinheiro no tempo, este valor é calculado a partir do valor presente líquido, que será explicado no próximo item.

### 2.6.6 Valor Presente Líquido (VPL)

Este é o parâmetro financeiro mais usado no meio empresarial, devido à fácil assimilação, pois como o próprio nome indica, o VPL representa os valores dos fluxos de caixa trazidos para data atual.

$$VPL = Investimento\ Inicial + \sum_{j=1}^N \frac{FC(j)}{(1+i)^j} \quad (2.14)$$

O termo  $i$  da eq. 2.14 corresponde à taxa de juros usada por quem fará a análise do investimento. A escolha dessa taxa é um complicador para as empresas. Sempre se perguntam: que taxa deve-se usar? Para a maioria das empresas é comum adotar as taxas mínimas aparentes de atratividade, ou seja, taxas de aplicação no mercado financeiro, tais como: Poupança, CDB, RDB, FIF, etc. Para o caso da figura 2. 5, caso seja adotada como sendo a taxa de juros o valor de 10%, o VPL calculado seria de R\$ 20,81.

Na realidade, o ideal para ser utilizado no cálculo do VPL seria a taxa mínima real de atratividade.

Essas são algumas dificuldades encontradas no processo de modelagem financeira de um projeto. Porém, é importante ressaltar que algumas vezes o que realmente importa para as empresas não é o valor absoluto encontrado pelas fórmulas, mas a faixa de resultados possíveis, levando em consideração que o fluxo de caixa pode sofrer variação ao longo do tempo.

Caso o valor do VPL seja maior que zero, o capital investido será recuperado. Como qualquer outro parâmetro que foi ou será aqui mostrado, o VPL também possui suas vantagens e desvantagens.

#### VANTAGENS

- Fácil entendimento de seu significado;
- Rápida resposta de comparação entre investimentos alternativos, para a mesma vida útil, ou seja, para o mesmo período de tempo onde o desempenho de seu empreendimento se mantém na faixa desejada;
- Possibilidade de aplicação em projetos onde o fluxo de caixa altera mais de uma vez o seu sinal,
- Fácil visualização gráfica;

#### DESVANTAGENS

- Quando se analisa projetos de vidas úteis diferentes, há necessidade de se recorrer a uma vida útil comum por meio do mínimo múltiplo comum, pois os projetos têm que ser analisados no mesmo tempo. Isto gera mais custos na comparação entre projetos, custo principalmente computacionais;
- Dificuldade de algumas empresas em explicitar a TMA real.

### 2.6.7 Taxa Interna de Retorno (TIR)

É o método que calcula a taxa de desconto, aplicado nas entradas e saída, igualando o valor do fluxo à zero, ou seja, é a taxa necessária pra igualar o valor do investimento inicial com os respectivos saldos do empreendimento. Na equação 2.15 está apresentado este parâmetro.

$$\sum_{j=0}^N \frac{FC(j)}{(1+TIR)^j} + Investimento\ inicial = 0 \quad (2.15)$$

A TIR pode ser calculada através de algum método iterativo, ou através de calculadoras eletrônicas ou planilhas de cálculo, ou ainda através de tabelas apropriadas para esta operação, segundo Ferreira (2000).

Para avaliação de um investimento através desse parâmetro deve-se sempre compará-lo com a TMA, por meio dela é que se pode saber se um investimento é interessante ou não do ponto de vista da TIR. A análise é feita da seguinte forma:

- $TIR > TMA$ . Significa que o investimento é atrativo do ponto de vista financeiro;
- $TIR = TMA$ . Significa que o investimento é indiferente;
- $TIR < TMA$ . Significa que o investimento não é atrativo do ponto de vista financeiro.

Usando o Excel para calcular o valor da TIR para o caso da tabela 2. 3, foi encontrado o valor de 15,10%. Levando em consideração o critério explicado no parágrafo anterior, se a TMA for maior que esse valor, o investimento descrito pelo suposto exemplo não seria economicamente interessante.

Há duas restrições no cálculo da taxa interna de retorno. A primeira é que se todos os fluxos de caixa forem negativos é impossível calcular a TIR. E a segunda, é se houver mais de uma troca de sinal no fluxo de caixa, raízes múltiplas serão geradas, dificultando a descoberta da raiz real.

Resumindo, cada parâmetro traz uma informação diferente. O VPL representa o lucro líquido absoluto, em dinheiro. A TIR representa esse lucro de forma percentual e o *payback* o tempo para que o projeto seja pago.

#### 2.6.8 Receitas e Custos

As receitas e os custos utilizados na avaliação financeira da planta estudada foram baseados em modelos de empresas, que foram fornecidos segundo a condição que os seus nomes não fossem citados.

Por meio deles foram estimados vários custos envolvidos no sistema, tais como custo de operação e manutenção, custo com impostos, custo de equipamentos, custos administrativos etc. Também foram feitas estimativas de lucros e receitas obtidas através da venda dos produtos.

A maior dificuldade encontrada nessa etapa do estudo é encontrar modelos nacionais que forneçam uma boa estimativa do custo de investimento inicial de projetos de sistemas térmicos.

Para avaliar se a estimativa do investimento inicial estava coerente, foi usada uma tabela 2. 4, extraída de Bejan et al (1995). Nesta tabela são encontradas algumas relações empíricas para o cálculo da estimativa do capital de investimento total de centrais termoelétricas. Os

valores utilizados por Bejan et al(1995) têm base nos valores de mercado americano. Esta estimativa basea-se no valor dos custos dos equipamentos, quanto maior a potência da central termoelétrica, maior os custos dos equipamentos e do investimento inicial. Através destas relações foi calculado o valor do investimento inicial, pois os valores de compra dos equipamentos principais já eram conhecidos. Em seguida, este mesmo valor foi calculado por um modelo de custo de empresas de projetos consultadas. O resultado comparativo está mostrado na tabela 3.6 no final deste capítulo. O valor obtido pela tabela aproxima-se do valor estimado pelo mercado nacional atual para a instalação de uma planta de 70MW. Mesmo com a diferença dos valores encontrados pelos dois modelos, o valor obtido foi considerado satisfatório, devido à falta de maiores informações do mercado nacional, detida por empresas de projeto e fabricantes.

Na tabela 2. 4 pode ser observado que o erro no cálculo do valor do capital de investimento é de 25%. Porém isso foi considerado satisfatório, sabendo-se que os custos levados em consideração por Bejan et al (1995) são americanos e foram feitos há mais de 10 anos atrás. E os valores reais utilizados na comparação, foram obtidos através de uma empresa nacional de projetos em sistemas técnicos, em 2008.

Tabela 2. 4 Planilha de custos segundo Bejan et al(1995)

Tabela de Custo - Bejan				Faixa de valores		Valor Utilizado	Custo
Investimentos de Capital Fixo (FCI)						131,00%	<b>R\$ 178.784.970,60</b>
	Custos Diretos(DC)	Custos Onsite(ONSC)					
			Custo de Compra de Equipamentos(PEC)	15%	40%	40,00%	R\$ 71.182.904,96
		Custo de Instalação dos Equipamentos	20%	90%	20,00%	R\$ 14.236.580,99	
		Tubulação	10%	70%	10,00%	R\$ 7.118.290,50	
		Controle e Instrumentação	6%	40%	6,00%	R\$ 4.270.974,30	
		Equipamentos e Material Elétrico	10%	15%	10,00%	R\$ 7.118.290,50	
		Custos Offsite(OFSC)					
			Terra	0%	10%	0,00%	R\$ 0,00
			Trabalhos civis, aquetetônicos e estruturais	15%	90%	15,00%	R\$ 10.677.435,74
			Serviços de Instalação	30%	100%	30,00%	R\$ 21.354.871,49
		Custos Indiretos(IC)					
			Engenharia e Supervisão	25%	75%	25,00%	R\$ 17.795.726,24
		Construção de Custos Incluindo Lucro do empreendedor	6%	22%	6,00%	R\$ 10.727.098,24	
		Contingencia	5%	20%	8,00%	R\$ 14.302.797,65	
Outros Custos							<b>R\$ 45.590.167,50</b>
	Custo de Start-up			5%	12%	5,00%	R\$ 8.939.248,53
	Capital de Trabalho			10%	20%	10,00%	R\$ 18.772.421,91
	Custo de Impostos e P&D					2,00%	R\$ 3.575.699,41
	Allowance for duns used during construction(AFUDC)					8,00%	R\$ 14.302.797,65
Total Capital Investment (TCI)	R\$	300.000.000,00				TCI calculado	R\$ 224.375.138,10
TCI = FCI + outros custos						Erro =	25,21%

## 2.7 Ciclos Termodinâmico

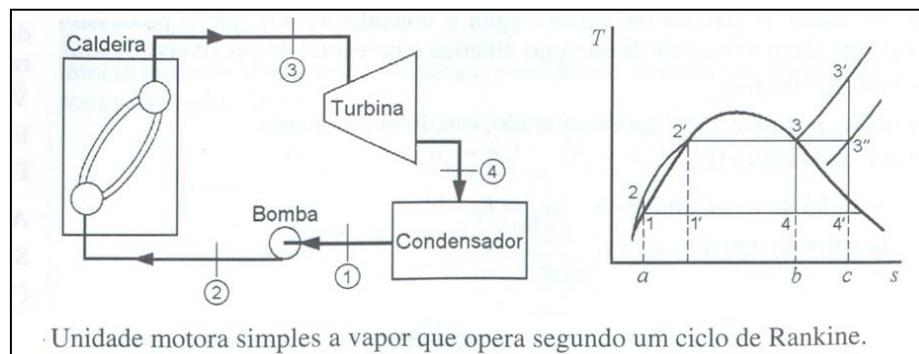
Centrais de potência operam segundo ciclos. Ciclo rankine, brayton, combinado, etc. Em ciclos fechados, o fluido de trabalho passa por uma série de processos e finalmente retorna para o seu estado inicial. O fluido de trabalho em ciclos fechados tem a mesma composição após percorrer o ciclo. Já em centrais de potência com motores de combustão interna, a composição inicial e final do fluido de trabalho são diferentes, ou seja, o fluido não percorreu um ciclo.

### 2.7.1 Ciclo Rankine

O ciclo rankine é o ciclo mais utilizado em usinas de cana de açúcar. Este ciclo é baseado em quatro processos, todos em regime permanente. Na figura 2. 6 está representado simplificada o ciclo, bem como o diagrama T-s. Nela o estado do ponto 1 é líquido saturado e o ponto 3 vapor saturado ou superaquecido. Os processos que compõem este ciclo são:

- 1-2: Processo de bombeamento adiabático reversível, na bomba.
- 2-3: Transferência de calor a pressão constate, na caldeira.
- 3-4: Expansão adiabática reversível, na turbina.
- 4-1: Transferência de calor a pressão constante, no condensador.

É obvio que estes processos estão idealizados, apenas para se ter uma idéia de qual seria o melhor rendimento de uma máquina térmica que operasse segundo este ciclo.



**Figura 2. 6** Unidade motora simples que opera segundo um ciclo rankine e seu respectivo diagrama T-s. (Fonte: Van Wylen et al (2003))

Na análise do ciclo Rankine é importante ressaltar que o rendimento depende da temperatura média na qual o calor está sendo fornecido e também rejeitado. Por isso foi desenvolvido o ciclo Rankine com reaquecimento e o regenerativo, com o objetivo de tirar vantagem do aumento do rendimento provocado pressões mais altas. A diferença entre estas duas variações do Rankine é simples.

No ciclo com reaquecimento, uma parcela do vapor da turbina é retirada para uma nova passagem pela caldeira, aumentando a sua entalpia. Este vapor é destinado novamente à turbina, podendo assim expandir até a pressão de entrada do condensador e seguir o seu curso até fechar novamente o ciclo. Já nos ciclos regenerativos, uma parte do vapor de alta pressão é retirada para aquecer o condensado que será bombeado para a caldeira. Com um condensado mais quente, será necessária uma menor quantidade de combustível para atingir o nível energético desejado na saída da caldeira. A figura 2. 7 e a figura 2. 8 representam estes dois ciclos.

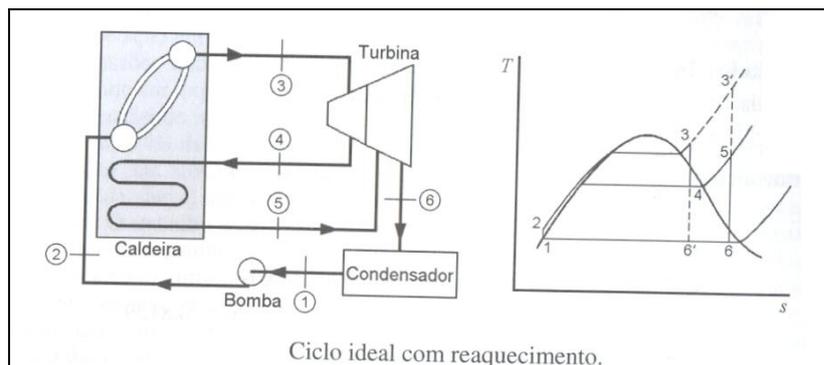


Figura 2. 7 Esquema ciclo com reaquecimento. (Fonte: Van Wylen et al (2003))

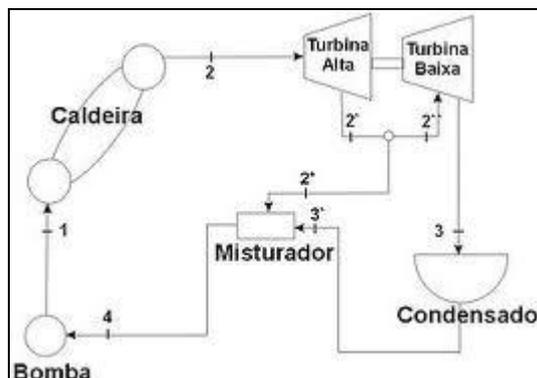


Figura 2. 8 Esquema ciclo regenerativo

## 2.8 Revisão (Artigos)

Serra et al (2007) analisam a redução da demanda de vapor no processo de produção de álcool e açúcar. A redução do vapor requerido e processos de geração mais eficientes podem aumentar a energia elétrica gerada. Numa típica planta, como mostrada na figura 2. 9, a demanda de vapor é função de alguns parâmetros, tais como o tipo de sistema de extração, o calor de aquecimento do caldo, o tipo do sistema de evaporação, qual a temperatura de entrada do caldo no evaporador, o esquema de secagem do açúcar, o esquema da destilaria etc.

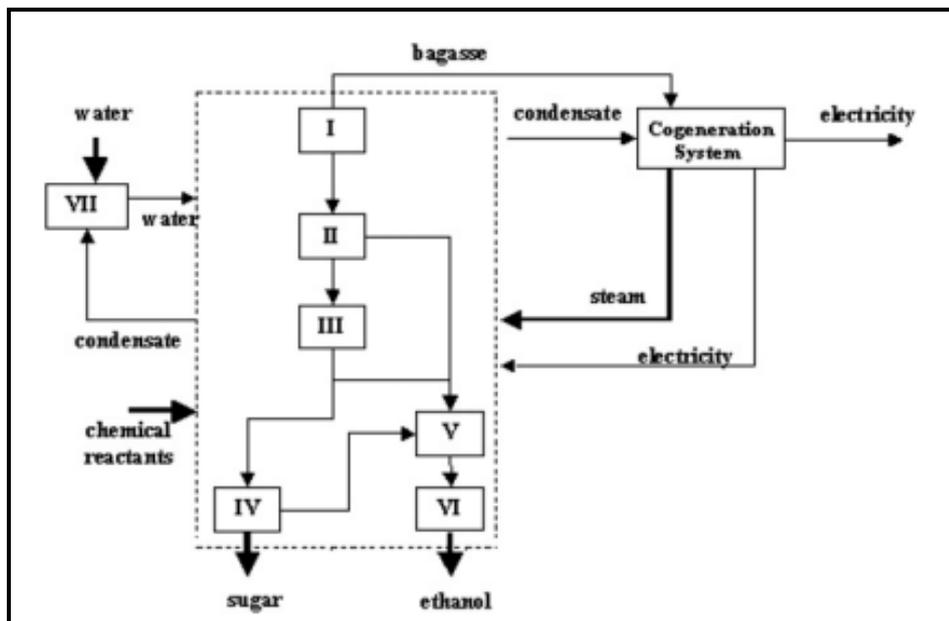


Figura 2. 9 Esquema de uma planta de açúcar e álcool (Fonte: Serra et al (2007))

Foram selecionados dois casos, um caso base e um caso aprimorado. No primeiro caso são levados em consideração os parâmetros normalmente utilizados pelas indústrias de cana de açúcar no Brasil. No segundo foram feitas algumas alterações com o objetivo de reduzir o consumo de vapor da fábrica. Além disso, foram simulados quatro tipos diferentes de sistemas de cogeração a fim de obter o melhor cenário possível dentro das condições estipuladas nos casos base e aprimorado. Na configuração I é analisado um ciclo com uma turbina de contrapressão. Neste caso o processo determina a quantidade de vapor gerado na caldeira. Na configuração II o vapor utilizado para o processo é oriundo da extração da turbina de condensação. Ambas as configurações são apresentadas na figura 2. 10. Na III

configuração é utilizado um sistema de gaseificação do combustível, onde o bagaço gaseificado é utilizado numa turbina a gás. Já os produtos de combustão são usados numa caldeira de recuperação que gera o vapor necessário para o processo de fabricação do açúcar. No IV caso também é utilizado um gaseificador de combustível para a turbina a gás, mas neste caso a caldeira de recuperação gera vapor tanto para o processo quanto para uma turbina de condensação e a extração dessa turbina também segue para o processo.

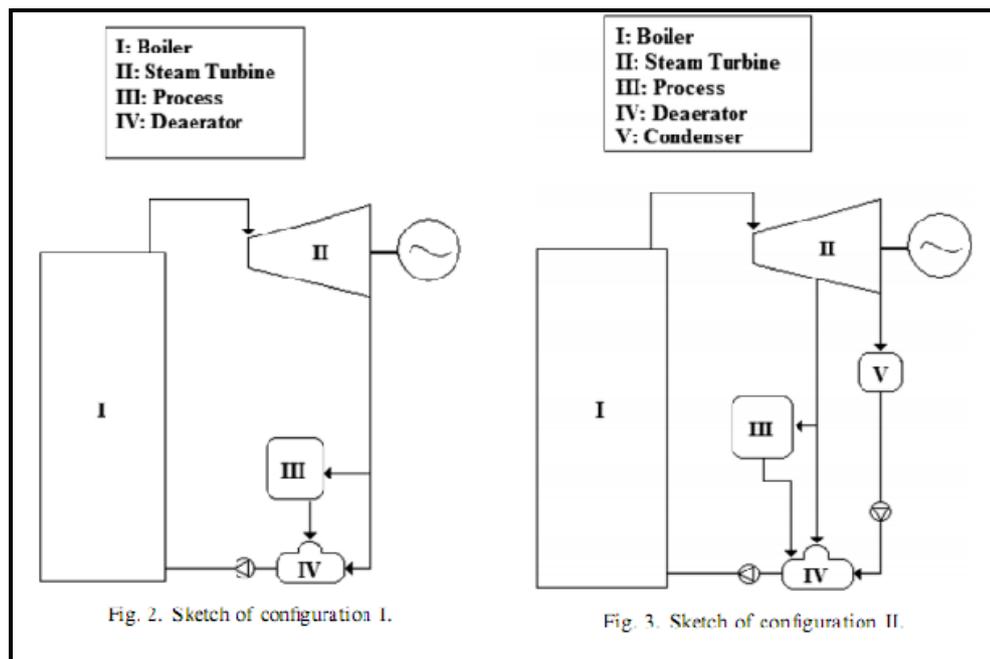


Figura 2. 10 Sistemas de cogeração I e II. (Fonte: Serra et al (2007))

Três parâmetros foram utilizados para avaliação do desempenho dos ciclos:

- 1) A utilização da energia do combustível - Definida como a razão entre a soma da energia elétrica produzida e o consumo de energia térmica do processo, pela energia do combustível consumido.
- 2) A razão potência calor - Razão entre a potência elétrica e energia térmica.
- 3) A eficiência exergética - Definida como a razão da soma da exergia do vapor utilizado na fábrica e a energia elétrica produzida, dividida pela exergia do combustível consumido.

Os parâmetros de pressão e temperatura utilizados neste artigo estão apresentados na tabela 2.

5.

**Tabela 2. 5 Temperaturas e pressões utilizadas nas alimentações das turbinas (Fonte: Serra et al.(2007))**

	Pressão (bar)	Temperatura (°C)
L1	60	480
L2	80	510
L3	100	540

Para a configuração I, que é o caso mais comumente encontrado nas usinas, foi encontrada uma significativa sobra de bagaço, com a redução da demanda de vapor. Em compensação o valor da energia elétrica gerada foi reduzido. Em termos gerais, a energia gerada pode ser aumentada com o aumento do consumo de vapor do processo. Usando-se sistemas mais eficientes, como no caso dois, pode-se gerar mais energia com uma menor quantidade de vapor. Nas duas configurações finais, a gaseificação apresenta-se como uma alternativa bastante interessante para as plantas de cana de açúcar em longo prazo. Se os fatores técnicos e financeiros não forem barreiras para a implementação desse tipo de sistema de gaseificação, a configuração IV mostra-se bastante interessante, aumentando em 70% a energia sobressalente gerada. Neste caso observa-se a importância da análise financeira para certificar-se da escolha do melhor cenário técnico e economicamente. Os resultados encontrados para todas as configurações estão mostrados na tabela 2. 6 a seguir:

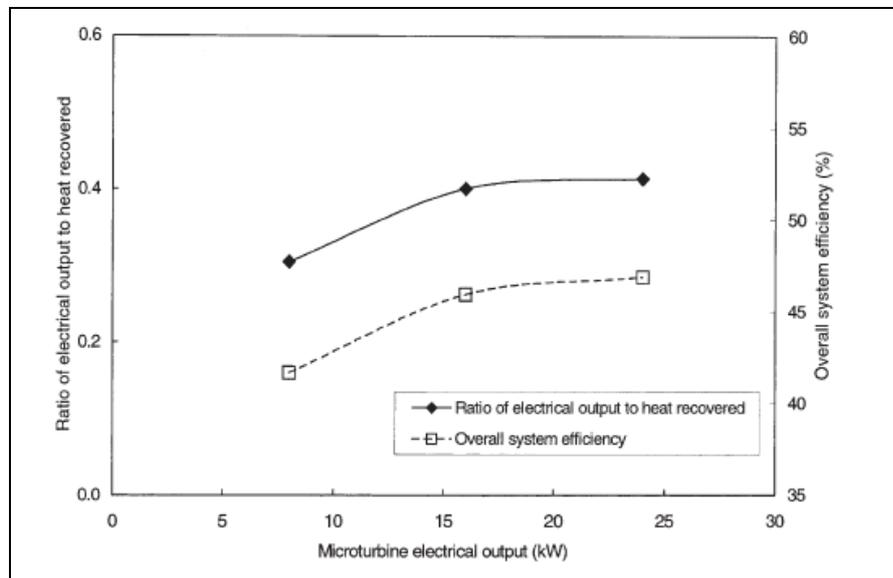
**Tabela 2. 6 Resultados dos parâmetros de avaliação dos ciclos. (Fonte Serra et al. (2007))**

<b>Parâmetros de performance para o caso melhorado</b>					
Configuração		I	II	III	IV
Utilização da Energia do combustível (EFU - %)	L1	84,28	52,98	75,37	69,76
	L2	84,22	54,07	75,37	69,91
	L3	84,17	54,96	75,37	69,96
Razão potência calor	L1	0,25	0,75	0,56	1,19
	L2	0,28	0,79	0,56	1,19
	L3	0,3	0,82	0,56	1,19
Rendimento exergético (%)	L1	26,01	23,1	29,93	34,86
	L2	26,73	23,93	29,93	34,97
	L3	27,32	24,6	29,93	35,01

Ho et al. (2004). Neste artigo é feita a avaliação de uma planta composta por uma microturbina, um chiller de absorção, dois trocadores de calor e uma torre de resfriamento. A planta representa um típico sistema de cogeração. Neste sistema a microturbina gera energia elétrica e os gases de exaustão são encaminhados para trocadores de calor. Este calor será usado para aquecer a água que será utilizada no chiller de absorção. O sistema foi avaliado de

três formas: variando a potência elétrica de saída, variando a carga térmica do sistema e estendendo-se o período de operação da planta. Para todas as análises foram escolhidos os mesmos parâmetros para a avaliação: energia elétrica de saída, energia do combustível que entra, energia recuperada pela água, eficiência do calor recuperado, carga de resfriamento do chiller, COP do chiller, rendimento global do sistema.

No primeiro estudo, observa-se que a taxa de recuperação de calor e o rendimento global do ciclo aumentam proporcionalmente com a geração de energia elétrica. A taxa de recuperação e o rendimento global da planta apresentam a mesma tendência, observa-se no início uma maior taxa de crescimento. Este resultado é observado no gráfico da figura 2. 11.



**Figura 2. 11** Variação da energia elétrica de saída no rendimento global do sistema e na taxa de recuperação de calor. (Fonte: Ho et al. (2004))

Nos outros casos estudados foram variadas as cargas térmicas e o período de operação da planta foi estendido. Na

tabela 2. 7 estão os resultados encontrados com o aumento da carga térmica com uso de queimadores e aquecedores elétricos. E na tabela 2. 8 os valores encontrados com o aumento do período de operação de 4h para 8h. Pode se observar nestas tabelas o aumento de cinco dos sete índices de avaliação técnica.

**Tabela 2. 7 Performance do sistema de cogeração com diferentes cargas de resfriamento (Fonte: Ho et al (2004))**

Tabela - Performance do sistema de cogeração com diferentes cargas de resfriamento		
Parâmetro	Carga de Calor aumentada	Carga de calor normal
Energia elétrica (kW)	24	24
Energia do combustível de entrada (kW)	117	117
Energia recuperada pela água (kW)	59,3	57,9
Eficiência do calor recuperado do sistema (%)	63,7	62,1
Carga do Chiller de resfriamento (kW)	32,8	30,9
COP do Chiller	0,58	0,5
Eficiência global do sistema	48,7	46,8

Outros trabalhos citados a seguir mudam seu foco para a análise exergética, em busca de melhorias através das equações obtidas com a união das equações de primeira e segunda lei, de onde se originam as equações básicas da exergia. No presente trabalho foi feita a abordagem, tanto energética quanto exergética. Os trabalhos listados abaixo têm este foco de análise pela segunda lei.

**Tabela 2. 8 Performance do sistema de cogeração com diferentes períodos de operação (Fonte: Ho et al (2004))**

Tabela - Performance do sistema de cogeração com diferentes períodos de operação		
Parâmetro	26h de operação	5h de operação
Energia elétrica (kW)	16	16
Energia do combustível de entrada (kW)	87	87
Energia recuperada pela água (kW)	40,9	39,8
Eficiência do calor recuperado do sistema (%)	65	56,1
Carga do Chiller de resfriamento (kW)	26	24,1
COP do Chiller	0,6	0,56
Eficiência global do sistema	48,2	46,1

Fiaschi e Manfrida (1998) apresentam a análise exergética de um sistema de geração de energia e vapor. O sistema possui componentes típicos de uma planta de ciclo combinado, turbinas a gás e caldeira de recuperação, com apenas algumas alterações mínimas. Por exemplo, a injeção de água na câmara de combustão. Essa alteração visa reduzir a emissão de poluentes para a atmosfera. A figura 2. 12 mostra um esquema de como funciona a planta apresentada.

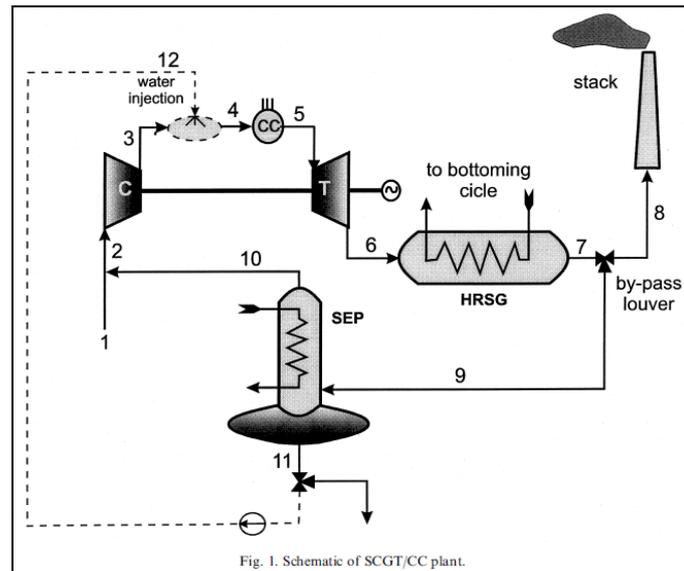


Figura 2. 12 Esquema da planta. (Fonte: Fiaschi e Manfrida (1998))

Da análise exérgica, analisando-se a destruição de exergia, obteve-se um gráfico com a destruição de exergia nos principais componentes do ciclo. Foi variada a injeção de água na câmara de combustão. Para cada equipamento foram observadas quatro condições de trabalho, a condição normal de operação sem injeção, condição parcial com 50% de injeção, condição máxima com injeção máxima e a condição padrão. Todas as análises foram feitas para vazão de 100 kg/s no compressor, taxa de compressão de 22 e máxima temperatura de entrada na turbina de 1500 K.

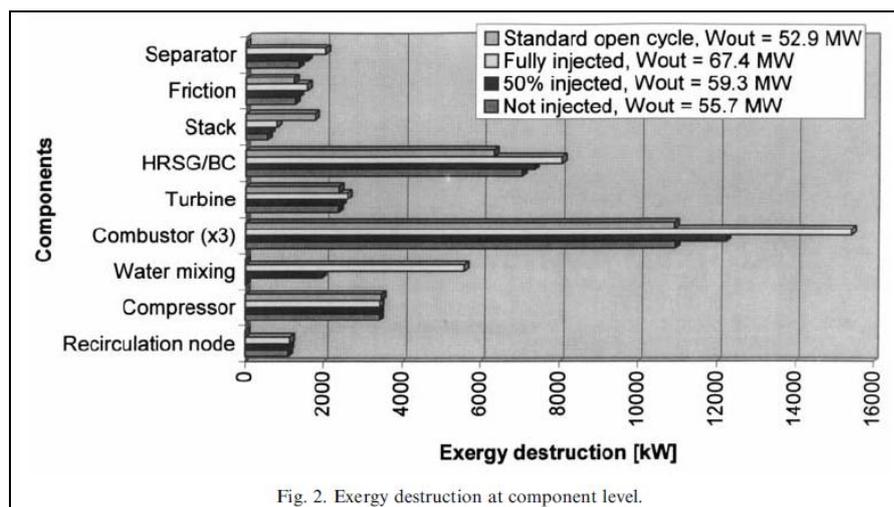


Figura 2. 13 Gráfico de destruição de exergia para cada componente. (Fonte: Fiaschi e Manfrida (1998))

Foi observado que o componente de maior destruição de exergia é a câmara de combustão, seguida da caldeira de recuperação, resultado que se assemelha com o deste trabalho, como pode ser observado na figura 2. 13. A câmara de combustão demonstra ser a

principal fonte de irreversibilidade. De todos os equipamentos, o combustor é o que revela maior sensibilidade às condições de injeção de água. Isto acontece porque quando maior o grau de injeção de água, maior a diferença de temperatura na câmara entre a entrada e a saída.

Foi feita uma análise de sensibilidade para determinar qual a influência da razão de compressão na eficiência e nas perdas do sistema.

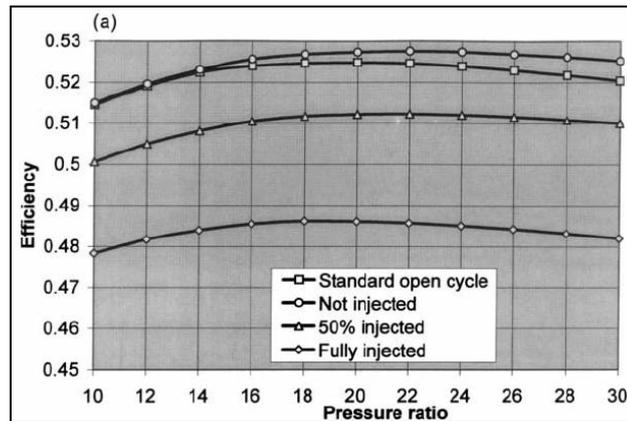


Figura 2. 14 Gráfico da eficiência pela razão de compressão (Fonte: Fiaschi e Manfrida (1998))

Reddy et al (2002) apresentam um estudo das perdas em uma caldeira de recuperação. Os componentes levados em consideração nesse estudo são o economizador, evaporador e o superaquecedor. A caldeira utiliza os gases quentes que seriam jogados fora na chaminé para geração do vapor.

Foi feita a análise utilizando a segunda lei para cálculo das irreversibilidades e parâmetros adimensionais para complementação da análise técnica. Variando-se alguns parâmetros adimensionais, por exemplo, a razão de diferença de temperaturas, assim foi obtida a mínima entropia gerada no sistema. Através desses resultados pôde-se estimar um valor para a quantidade de unidades de troca de calor para as caldeiras de recuperação. Este valor é um possível valor ótimo para as características do sistema estudado, pois o valor total da irreversibilidade é o mais baixo, aumentando o rendimento do componente. A entropia gerada aumenta com o incremento da razão de diferença de temperaturas de entrada dos gases quentes. Esses dois fenômenos podem ser observados nos gráficos da figura 2. 15 e da figura 2. 16 apresentados abaixo, onde  $N_s$  é o número de entropia gerada, que é dado pela razão da entropia gerada pelo produto da vazão mássica e o calor específico a pressão constante dos gases;  $NTUB$  é o número de unidades de transferência de calor na caldeira, e  $\tau$  é razão entre a diferença da temperatura de entrada e saída dos gases na caldeira de recuperação, dividido pela temperatura de saída.

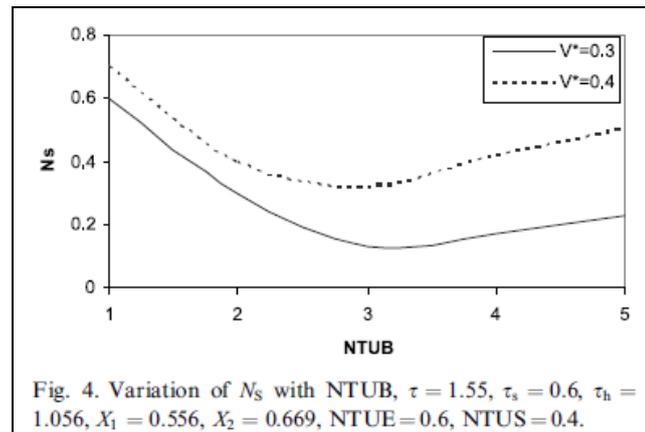


Figura 2. 15 Gráfico do número de entropia gerada pelo número de unidades de troca de calor na caldeira (Fonte: Reddy et al(2002))

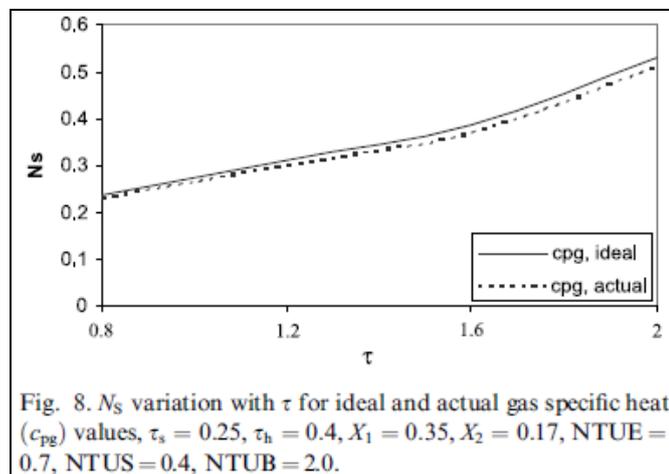


Figura 2. 16 Gráfico do número de entropia gerada pela taxa de diferença de temperatura dos gases quentes na caldeira (Fonte: Reddy et al(2002))

Alguns outros trabalhos visam à união desses dois tipos de análise, tanto a energética quanto a exergética, tentando extrair o melhor de cada uma delas. Em geral, para otimização de sistemas térmicos deve-se utilizar estes dois tipos de análise em conjunto para se obter uma informação mais precisa sobre o sistema estudado.

Aljundi (2008) apresenta a análise de uma planta em AL-Husseini, na Jordânia. Esta planta possui sete turbinas a vapor e duas turbinas a gás, totalizando uma potência instalada de 396 MW. O combustível utilizado é o óleo BPF. O principal objetivo desse estudo era detectar separadamente e quantificar as perdas energéticas e exergéticas, também observar como a variação das condições do meio ambiente influenciam a destruição de exergia, como pode ser observado na figura 2. 17. O desempenho da planta e de cada componente foram estimados. A principal perda de energia ocorre no condensador, cerca de 134MW, e 13MW na caldeira. Mas a maior porcentagem de destruição de exergia é na caldeira. Foi encontrada

uma taxa de 77% de destruição, contra 13% na turbina, e apenas 9% no condensador. As eficiências energética e exergética encontradas foram de 26 e 25%. Além disso, observou-se que grandes mudanças no meio ambiente podem causar grandes alterações no desempenho da planta. Também foi feita a análise da influência da temperatura de referência nas eficiências exergéticas dos principais componentes, bem como suas irreversibilidades.

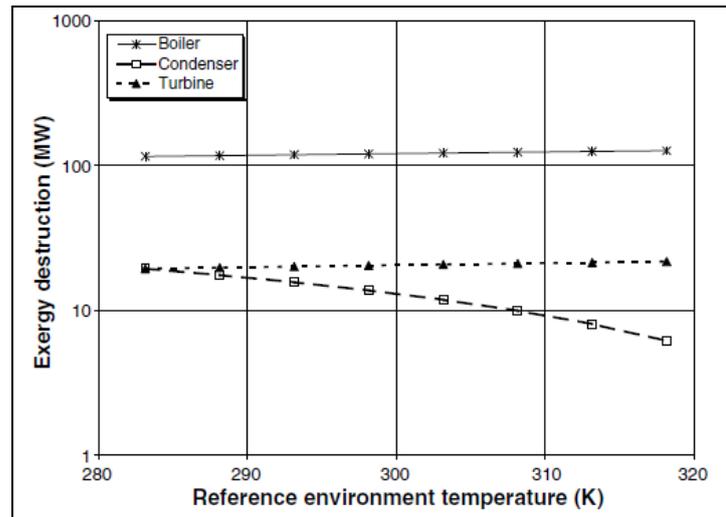


Figura 2. 17 Gráfico da destruição de exergia pela temperatura de referência (Fonte: Aljundi (2008))

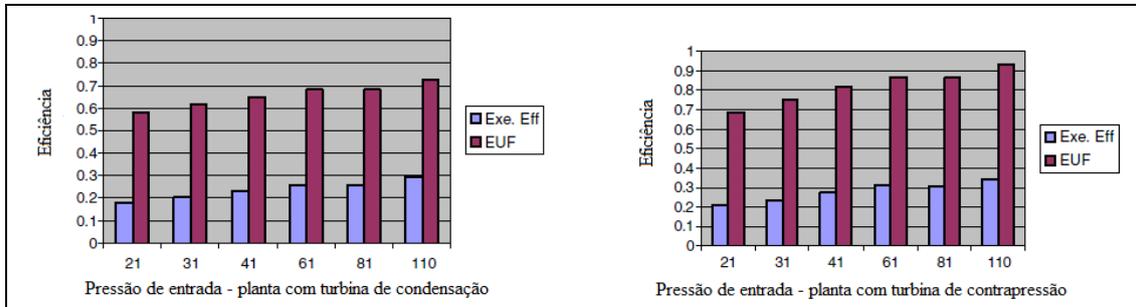
Kamate e Gangavati (2008) apresentam a análise exergética de uma planta de cogeração típica de 2500 toneladas de cana por hora. Neste artigo foram variadas as condições de geração de vapor, temperatura, pressão e vazão. Foram selecionadas as opções de caldeiras mais usuais no mercado, como apresentado na tabela 2. 9.

Tabela 2. 9 Condições de geração de vapor (Fonte: Kamate e Gangavati (2008))

Proporção bagaço vapor e taxa de geração de vapor na seleção das condições ótimas do vapor de entrada							
Pressão	21	31	41	61	81	110	P (bar)
Temperatura	340	388	423	475	513	545	T (°C)
Proporção bagaço vapor	2,11	2,25	2,36	2,43	2,45	2,56	kg/kg
Taxa de geração de vapor	18,33	19,72	20,55	21,11	21,39	22,5	kg/s

A planta analisada é dividida em duas partes, o ciclo de condensação e o ciclo de contrapressão. Os resultados mostram que na condição ótima de 61 bar e 475°C, o ciclo da planta da turbina de contrapressão apresenta uma eficiência energética baseada no fator de utilização de energia (considerando a energia do vapor usada na usina) de 0,863 e um rendimento exergético puramente elétrico de 0,307. Já o ciclo da turbina de condensação apresenta os seguintes valores para os mesmos parâmetros, 0,682 e 0,260, como pode ser

observado na figura 2. 18. Isso mostra que do ponto de vista de integração de processos, a configuração da planta com a turbina de contrapressão é mais eficiente. A caldeira é o componente do ciclo com maior perda de exergia de ambos os ciclos.



**Figura 2. 18 Gráfico das eficiências em função das condições de produção de vapor (Fonte: Kamate e Gangavati (2008))**

Ganguly et al (2010) apresentam uma planta de 500MW de eletricidade. A planta é completamente monitorada. São impostas em sua operação condições de projeto e condições não usuais em projetos. Foram identificadas as contribuições individuais dos principais equipamentos para a destruição de exergia, dentro e fora das condições de projeto. A análise exergética foi feita para garantir a performance *off-line*, antes e depois da avaliação da unidade. Uma pré-avaliação utilizando a eficiência exergética comparada com as condições usuais de trabalho mostra uma estimativa da necessidade e do nível do trabalho de manutenção. Uma pós-análise exergética dos dados é usada para quantificar a performance da planta. O ciclo utilizado é um Rankine com reaquecimento. Na figura 2. 19 é mostrado esquematicamente como funciona a planta. A turbina é dividida em três partes: alta, média e baixa pressão. O título e a pressão de escape da turbina de baixa pressão são respectivamente, 0,92 e 10kPa.

A avaliação do desempenho é feita através de um software que recebe em tempo real as informações dos sistemas de aquisição de dados, que por sua vez recebem as informações dos instrumentos espalhados ao longo do circuito. O *software* permite o cálculo de todas as propriedades termodinâmicas. Através desses dados é que são controladas as válvulas do circuito durante a operação.

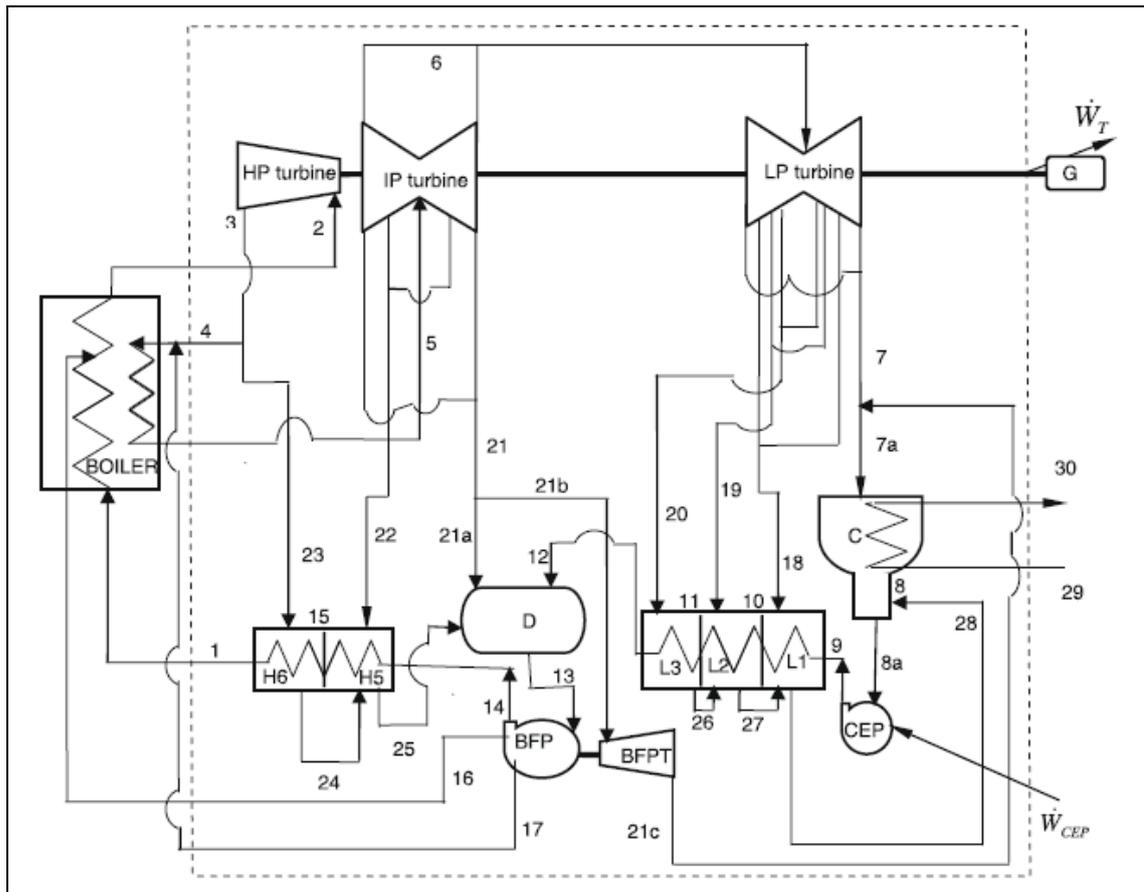


Figura 2. 19 Esquema da planta de 500 MWe (Fonte: Ganguly et al (2010))

Três condições de operação foram analisadas, variando a vazão dos *sprays* nos dessuperaquecedores e reaquecedores. Essas três condições não são as condições de projeto, mas são as de maior frequência na planta. Essas variações são ocasionadas devido à mudança da qualidade do combustível, já que são oriundos de muitas fontes. Estas condições estão indicadas e especificadas na tabela 2.10 como OP1, OP2 e OP3.

As potências elétricas geradas nas turbinas estão indicadas na tabela 2.10 e os índices de avaliação são mostrados na figura 2. 20, onde estão mostradas as eficiências e irreversibilidades de cada caso. Mesmo com uma pequena variação na potência elétrica gerada, os valores encontrados foram 507,3MW e 507,4MW. A destruição de exergia apresentou uma variação maior dentre os casos. A diferença entre a maior taxa de destruição de exergia e a menor, é de 35,5MW. Isso ocorre porque quanto maior a vazão dos *sprays* para os dessuperaquecedores, menor a temperatura de saída do fluido e maior a transferência de calor necessária para deixar o fluido nas condições nominais de trabalho.

Tabela 2. 10 Fluxo energético da planta de 500 MWe (Fonte: Ganguly et al. (2010))

Fluxos de energia e exergia para ciclos de turbina sob variação dos fluxos de resfriamento			
Condições de operação	Taxa de energia lançada na rede (MW)	Taxa de rejeição de energia(MW)	Trabalho de saída (MW)
Condições de projeto	1156,6	649,3	507,3
OP1- (fluxo do spray RH e SH: 4,7kg/s e 32,8 kg/s)	1190,7	683,4	507,3
OP2- (fluxo do spray RH e SH: 6,4kg/s e 37,8 kg/s)	1199,2	691,8	507,4
OP3- (fluxo do spray RH e SH: 9,4kg/s e 50,9 kg/s)	1216,3	708,9	507,4
Condições de operação	Taxa de exergia lançada na rede (MW)	Taxa de rejeição de exergia (MW)	Exergia destruída(MW)
Condições de projeto	614,8	15,2	92,3
OP1- (fluxo do spray RH e SH: 4,7kg/s e 32,8 kg/s)	637,7	16	114,4
OP2- (fluxo do spray RH e SH: 6,4kg/s e 37,8 kg/s)	642,5	16,2	118,9
OP3- (fluxo do spray RH e SH: 9,4kg/s e 50,9 kg/s)	651,7	16,6	127,8

No gráfico da figura 2. 20 pode ser observado que devido à maior transferência de calor, a taxa de destruição de exergia aumentou. Outro resultado interessante que também pode ser observado na figura 2. 20 é que as análises energéticas e exergéticas possuem a mesma tendência.

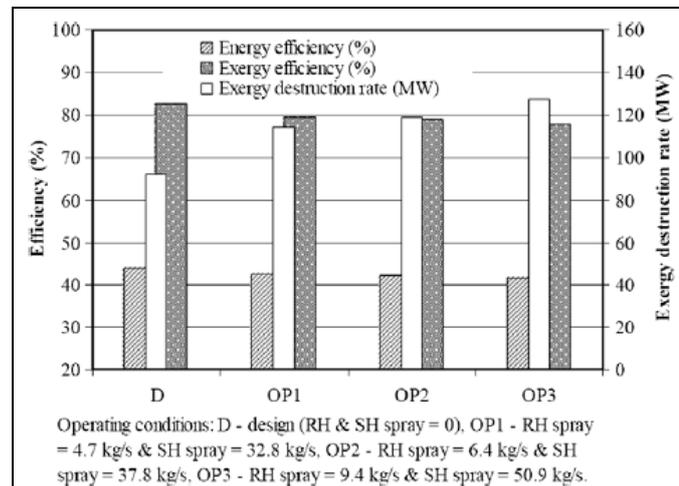


Figura 2. 20 Parâmetros de eficiência exérgica e energética da planta de 500 MWe (Fonte: Ganguly et al (2010))

Bocci et al (2007) investigam com informações reais de uma planta antiga de cana de açúcar, a eficiência energética da planta e sua viabilidade econômica. Avaliam o comportamento da planta alterando as temperaturas e pressões do ciclo e introduzindo inovações tecnológicas na configuração da planta adicionando outros itens, tais como

gaseificadores ou células combustíveis. A eficiência energética da planta foi calculada com os equipamentos antigos, considerando a parte de cogeração o resultado encontrado para eficiência foi de 56% e apenas para a parte elétrica foi de 4,4%. Algumas propostas foram sugeridas para a melhoria da planta. As principais melhorias energéticas podem ser feitas nos recuperadores de calor, através do uso do vapor de evaporação e do processo de cristalização. Melhorias nas tecnologias empregadas na planta, como a troca das turbinas que movem as moendas por motores elétricos, ou uso de plantas de células combustível, melhorias no gerenciamento da planta. Tudo isso pode trazer uma melhoria energética a planta, mas traz consigo um aumento no custo total da planta. E de acordo com esse artigo, a planta com turbinas a vapor usual é mais viável economicamente do que com células combustíveis ou com turbinas a gás, levando em consideração os parâmetros usados pelo autor.

Nebra et al (1998) apresentam uma análise termoeconômica de uma planta de cogeração de uma usina de cana de açúcar cubana. Dois tipos diferentes de atribuição de custos são usados, o método da extração e o método da igualdade, para avaliar financeira e exergéticamente os custos de cada um dos sistemas. Com esse estudo pode-se avaliar quem são os maiores responsáveis pelos aumentos nos custos de produção do sistema. A figura 2. 21 mostra esquematicamente como é a planta analisada.

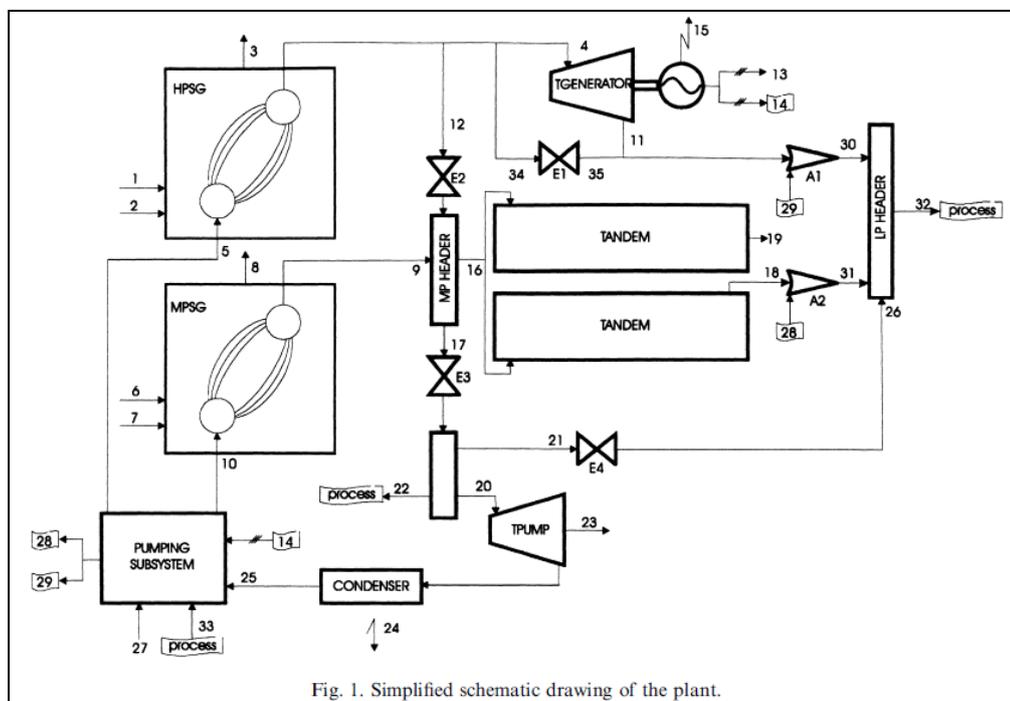


Figura 2. 21 Esquema de uma planta de açúcar e álcool (Fonte: Nebra et al (1998))

A capacidade de moagem desta planta é de 383 t/h. Foi utilizada cana com 50% de umidade. Três caldeiras foram utilizadas na geração de 37,5 quilogramas de vapor por segundo. As caldeiras geram vapor nas seguintes condições: 2,8 MPa e 400°C, que é utilizado num turbogerador de 12MW e 1,8MPa e 320°C, que é utilizado nas turbinas da moagem e nas turbo-bombas. A demanda do vapor do processo é de 0,5 toneladas de vapor por tonelada de cana moída, à 0,275 MPa e 130°C.

Todos os fluxos energéticos e exergéticos foram determinados, bem como os seus custos unitários. Os parâmetros econômicos utilizados foram: tempo de retorno financeiro de 10 anos, taxa anual de juros de 12% e tempo anual de operação da fábrica de 2880h. Para cada método são feitas considerações diferentes referentes aos custos considerados para a exergia. A **tabela 2. 11** mostra alguns resultados obtidos por cada método. O cenário 1 é referente ao método da extração e o cenário 2 ao método da igualdade.

No cenário 1 o custo exergético unitário da potência gerada em todas as turbinas é menor do que no cenário 2, no qual a energia é considerada o único produto de venda das turbinas. No cenário 2 todos os custos associados com a turbina são imputados à energia gerada enquanto que no outro cenário, tanto a energia gerada e quanto o vapor de escape são considerados como produtos e os custos da turbina são divididos entre eles. Como consequência do mesmo processo, o custo da água condensada é maior no cenário 1 que no cenário 2.

A importância de uma escolha do método de atribuição de custo adequado foi verificado. Tal escolha deve ser feita considerando o objetivo principal da análise. No caso da instalação de cogeração, o aumento na produção de energia elétrica ou a vapor.

Tabela 2. 11 Tabela dos custos exergeticos unitários (Fonte: Nebra et al (1998))

<b>Tabela de custos unitários</b>				
<b>Fluxo</b>	<b>Custos Exergeticos (MWh/MWh)</b>		<b>Custos monetários (US\$/MWh)</b>	
	<b>Cenário 1</b>	<b>Cenário 2</b>	<b>Cenário 1</b>	<b>Cenário 2</b>
1 - Bagaço - Caldeira AP	1,00	1,00	1,44	1,44
2- Ar - Caldeira AP	-	-	-	-
3- Gases de escape - Caldeira AP	-	-	-	-
4- Vapor para turbina	4,01	3,94	13,47	13,01
5- Água de alimentação da caldeira	5,77	3,94	25,00	13,01
6- Bagaço pra caldeira MP	1,00	1,00	1,44	1,44
7- Ar para caldeira MP	-	-	-	-
8 - Gases de escape da caldeira MP	-	-	-	-
9 - Vapor caldeira MP	4,71	4,66	15,21	14,79
10 - Água de alimentação da caldeira MP	5,77	4,66	25,00	14,79
11 - Vapor de descarga da turbina	4,42	3,94	21,03	13,01
12- Vapor da válvula de expansão 2	4,01	3,94	13,47	13,01
13- Potência do turbogerador - externa	4,42	5,02	21,03	33,44
14- Potência do turbogerador - bomba	4,42	5,02	21,03	33,44
15- Calor perdido na turbina	-	-	-	-
16- Vapor para tandem	4,59	4,54	14,97	14,52
17 - Vapor para E3	4,59	4,54	14,97	14,52
18 - Vapor para desgarda do tandem	5,29	4,54	20,03	14,52

Lobo et al (2007) apresenta uma comparação entre duas usinas de açúcar, uma mais antiga, a Agroval, e uma mais moderna, em Japungu. Sabe-se que o consumo de energia no processamento da cana varia durante a moagem. Neste artigo são propostas modificações no processo de moagem. A usina antiga possui eficiência de extração de açúcar de 92,1%. Com as modificações propostas conseguiu-se atingir no processo de extração do açúcar da cana, um rendimento de 95,7%. O consumo de energia no processamento da cana (por unidade de massa processada) varia com a produção de açúcar. Apesar do baixo consumo de energia aparentemente indicar uma melhor performance, exames mais detalhados revelam que consumos mais elevados de energia não implicam processo menos eficientes. Pode-se

aumentar o rendimento da extração de açúcar suficientemente para compensar mais altos investimentos e consumos específicos de energia. A análise propõe modificações no processo de moagem em Agroval, uma antiga usina de cana de açúcar. O consumo de energia no processamento da cana e a eficiência da extração do açúcar para processos de extração corrente de 92,1% de açúcar são comparados com um processo similar hipotético em Japungu, uma deslilatia moderna de álcool.

Através dos estudos dos resultados encontrados na planta mais moderna, pode-se observar que a melhoria no processo de extração do açúcar, diminui o consumo de combustível para a caldeira. O combustível economizado pode ser vendido para outras usinas ou ser usado na própria caldeira para aumentar a geração de energia elétrica. Para que este tipo de investimento seja viável, já que o investimento inicial nesse tipo de empreendimento é bastante elevado, os produtos vendidos pela usina devem possuir os seguintes preços mínimos de US\$ 6,00/ton de bagaço e US\$ 40,00/ MWh. Esses valores não são fixos, a crescente demanda por energia faz com que esses valores aumentem ao longo dos anos.

Knight et al (2004) fazem uma descrição do desenvolvimento e implementação de um software integrado, onde há uma ferramenta de otimização da performance econômica de uma planta. Foi feito o estudo de uma planta à turbina a gás completa. Através da interface com o usuário pode-se escolher o parâmetro a ser otimizado. No software já está incluso a determinação de custos do sistema, a modelagem de cenários nos quais a planta poderá operar, determinação do tempo de vida operacional e o custo baseado nos cenários escolhidos, e cálculo dos parâmetros econômicos, tais como custo da energia, taxa interna de retorno (TIR), valor presente líquido (VPL) e *payback*. O software também calcula os rendimentos energéticos. O usuário precisa criar o modelo da planta, definir as operações e cenário econômico, e qual será o parâmetro levado em consideração para otimização. O software já possui algumas restrições internas na sua programação, para que não haja muita distorção da realidade, gerando casos que não são possíveis de se realizar. Algumas restrições têm que ser feitas para auxiliar neste processo. No caso estudado observa-se que a diferente escolha de parâmetros de otimização traz resultados diferentes para os parâmetros, como observado na tabela 2. 12.

**Tabela 2. 12 Estudo de caso traduzida de Knight et al (2004)**

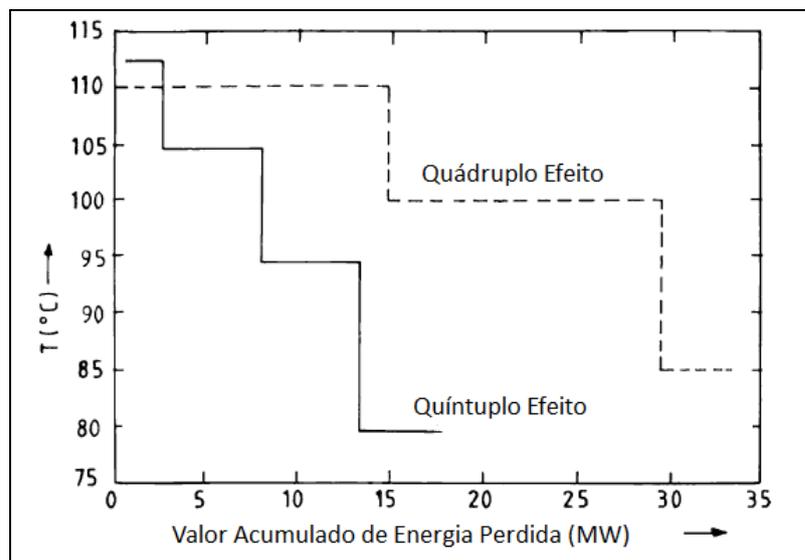
	Caso Base (não-otimizado)	Resultados Otmizados	
		Caso 1 -Otimização do Custo de eletricida	Caso 2 - Otimização da TIR
Custo da Eletricidade (c/KWh)	4,785	4,584	4,611
TIR (%)	5,3	7,6	8,7
Custo Específico(EUR/kW)	1186	1035	986
Eficiência do Sistema (%)	48,56	48,67	47,36
Período de Payback (anos)	10,36	8,95	8,62
Potência do Sistema (kW)	60017	61567	62106

Banerjee e Ram (2003). Neste artigo é feito um balanço energético e exerético de uma usina que moe 5000 toneladas de cana por dia. Foi feita a análise pinch na fábrica de açúcar e foi descoberto que o valor mínimo requerido de vapor era 9% menor do que o valor que estava sendo utilizado. Foi também proposta uma modificação no projeto do evaporador da fábrica de açúcar. Através da análise exerética feita nos evaporadores de múltiplos efeitos e a comparação dos resultados, foi concluído que o consumo de vapor foi reduzido em 9 toneladas por hora e as perdas exeréticas foram reduzidas em 48%, comparando o caso em que o evaporador fosse alterado de quádruplo efeito para quádruplo efeito. Como pode ser observado na figura 2. 22.

Para esta mesma planta, também foi simulado um modelo que prevê o valor ótimo para a potência gerada pelo sistema para diferentes temperaturas fixando a pressão em 45 bar. A temperatura encontrada para uma turbina de simples extração foi de 600°C. Juntamente com a simulação foi feita a análise financeira do sistema para determinar a viabilidade financeira da planta e a variação média dos custos de geração. Alguns resultados desse estudo estão na tabela 2.13

**Tabela 2. 13 Estudo de caso traduzida de Banerjee e Ram (2003)**

Número do Intervalo	T (°C)	Potência (MW)	Valor de Entrada (M Rs./ano)	Custo Capital (M Rs.)	Período de Pay back (meses)
1	350	5,2	0,10	374,4	375
2	400	9,7	4,29	424,3	99
3	450	13,5	7,60	463,2	61
4	500	18,3	12,95	505,0	39
5	600	26,8	22,51	585,1	26
6	700	31,3	19,21	499,3	26

**Figura 2. 22 Gráfico da temperatura pelo valor da energia “perdida” (Fonte: Banerjee e Ram (2003))**

Rivera e Cortês (2010) neste artigo é proposta a otimização do sistema com análises exergética, energética, termoeconômica, exergoeconômica e análise pinch. Todos os sistemas da planta foram analisados. As principais perdas devido as irreversibilidades foram determinadas para cada componente. No sistema são encontradas três faixas de pressão utilizadas 42,24 , 11,38 e 4,32 bar. A geração de vapor e energia elétrica depende da demanda da planta completa, pois o vapor é utilizado tanto como força motora do sistema quanto para a cogeração. A eletricidade gerada é utilizada na produção da polpa. A seguir a figura 2. 23 mostra o esquema dos processos da fabrica.

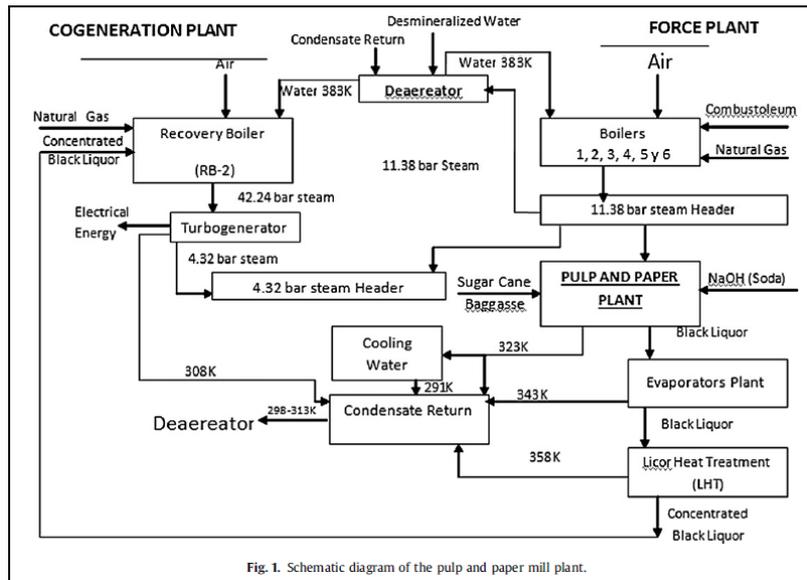


Figura 2. 23 Esquema do processo de moagem de papel e celulose (Fonte: Rivera e Cortês (2010))

Neste trabalho foram estabelecidos o estado de referência da planta, os balanços de massa e energético, da fábrica completa. Foi feito em seguida o balanço exergético e a identificação das eficiências e irreversibilidade do sistema completo e de cada subsistema da fábrica. A análise de sensibilidade foi feita para identificar as possíveis causas de irreversibilidade dos principais componentes e subsistemas. Também foram descobertas as relações entre a eficiência global e as irreversibilidades através de modelos matemáticos. Algumas melhorias foram propostas ao ciclo, por exemplo, a troca dos evaporadores. Após alterações, uma nova análise exergética foi feita no ciclo para comparar os valores dos índices de avaliação técnica.

As maiores irreversibilidade foram encontradas na caldeira de recuperação e nos evaporadores, 72,67% e 7,72%, respectivamente. Para encontrar qual seria o desempenho ideal da caldeira foi feita uma análise para determinação das condições ótimas de trabalho. Foi descoberto através de relações teóricas e experimentais que o principal parâmetro que influencia a eficiência exergética deste caso, é a razão quantidade de vapor produzida em toneladas, pela energia de combustível em MJ. A relação ar-combustível também influencia a eficiência como pode ser observado na figura 2. 24. A maior eficiência encontrada foi 44%, com excesso de ar entre 4 e 5%, e com relação ar-combustível de 4,5.

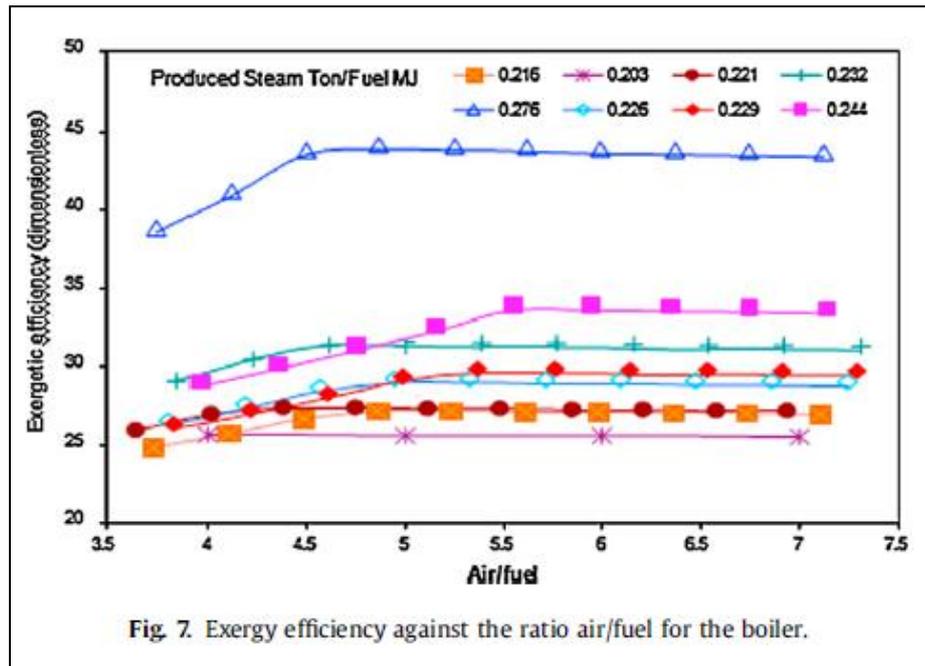


Figura 2. 24 Gráfico eficiência exergética versus relação ar/combustível (Fonte: Rivera e Cortês (2010))

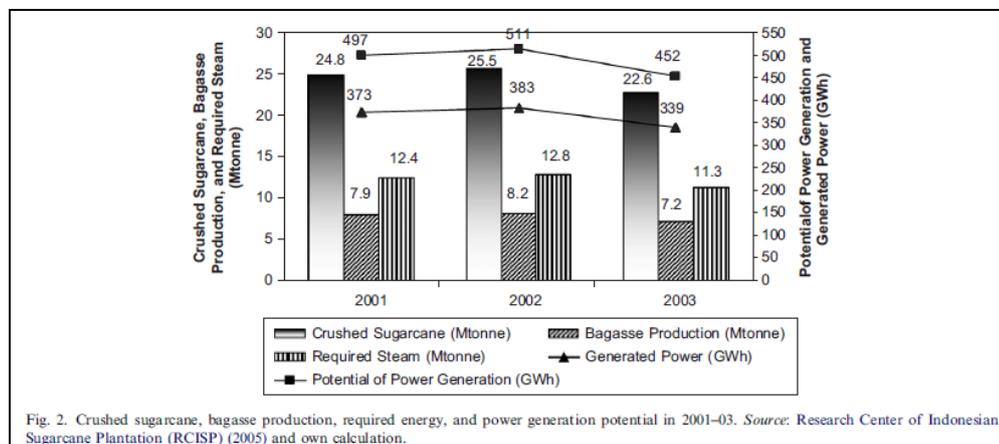
Restuti e Michaelowa (2007) analisaram o potencial econômico da cogeração utilizando bagaço de cana como combustível, que é um mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL). Foi observado de forma comparativa, qual seria a redução da emissão de gases do efeito estufa utilizando planta a bagaço, em relação à ausência de projetos de unidades de potência deste tipo. Na ausência de um projeto de uma usina de cana de açúcar que geraria energia e vapor para a produção de açúcar seria necessária a criação de uma central onde o combustível utilizado seria um combustível fóssil.

Para a primeira abordagem foi feita a categorização de projetos em relação à capacidade de expansão de energia, ou seja, a instalação de novas unidades de potência de biomassa. Algumas características foram analisadas para certificar-se da legitimidade dessa metodologia: O bagaço seria o único tipo de biomassa utilizada. Haveria aumento da capacidade de processamento. O bagaço não seria armazenado por mais de um ano e que a maior contribuição de energia requerida para o preparo do bagaço seria com seu transporte. Foram empregadas duas análises. Uma levando em consideração as margens de operação, baseada em dados do Ministério da Energia da Indonésia, tentando minimizar o custo com a planta sempre funcionando. A outra foi metodologia da margem de construção, baseada em dados de plantas já existentes no mercado. Esta abordagem estima o potencial de construção de plantas à biomassa.

Desde 1993 a produção anual de açúcar na Indonésia vem caindo gradativamente, embora o seu consumo venha aumentando ano a ano devido ao crescimento populacional.

Além do açúcar, a moagem de cana na Indonésia também gera alguns subprodutos, como: folhas, bolo residual, bagaço, lodo, que podem ser usados na adubagem da terra, ou como alimento para animais, etc. Levando em consideração esse cenário alguns resultados encontrados das análises feitas são apresentados a seguir.

Como ilustrado na figura 2. 25, a Indonésia moeu mais de 23 milhões de toneladas de cana de açúcar no período de 2001 a 2003 e possui um potencial de geração de energia a partir do bagaço gerado no processo de 450 GWh. A capacidade nacional instalada de geração vem aumentando nos últimos anos, embora apenas 50% da população têm acesso à energia elétrica em suas residências, aproximadamente. A maior parte da geração de energia é devida a fontes não-renováveis de energia. O carvão, por exemplo, detém cerca de 40% do total de geração, enquanto gás natural e petróleo têm 20 e 13%, respectivamente. Com o aumento da demanda de energia, e como a oferta não cresce na mesma proporção, percebe-se que têm acontecido “blackouts” forçados em algumas regiões do país. Outro motivo pelo qual a crise ocorre é a geração encontra-se centralizada, com 93% da geração total em apenas uma região do país. A comercialização de créditos de carbono mostra-se uma alternativa interessante, pois o país revela um grande potencial para fonte limpa de geração de energia.



**Figura 2. 25 Gráfico do potencial energético e geração de energia na indonésia nos anos de 2001 a 2003 (Fonte: Restuti e Michaelowa (2007))**

Algumas barreiras são enfrentadas na tentativa de ampliação de plantas de geração limpa. Uma é envelhecimento das atuais usinas, que tendem a ter um rendimento mais baixo. Para obter maiores eficiências seria necessário investimento na modernização das plantas. Além disso, plantas a carvão mostram-se economicamente mais viáveis. A análise de investimentos é uma parte importante do projeto, pois pode definir o andamento do projeto, ou seja, se ele vai realmente ser realizado. Investimentos com TIR menor que 16%

(aproximadamente a taxa de mercado na Indonésia) tornam-se não interessantes do ponto de vista econômico. Mesmo tendo-se encontrado e identificado algumas barreiras na utilização de bagaço como base em plantas de geração, esse tipo de prática mostra-se interessante do ponto de vista ambiental e do ponto de vista de suprir a necessidade energética do país.

Nos artigos acima foram apresentadas algumas idéias que auxiliarão na compreensão dos resultados apresentados neste trabalho, tais como:

- A redução do vapor necessário no processo ou a utilização de condições não usuais em projetos pode aumentar a eficiência global do ciclo, mas para certificar-se que esta é uma solução economicamente viável, é necessária uma análise financeira. Segundo Serra et al (2007).
- Para Ho et al (2004), o aumento da energia elétrica gerada aumenta do rendimento do ciclo. Por isso é interessante buscar formas de elevar o potencial de geração de uma planta.
- A combustão é a maior causa de irreversibilidades no sistema. Devido a isso, caldeiras e câmaras de combustão apresentam uma alta taxa de destruição de exergia. Como visto em Fiaschi e Manfrida (1998).
- O ciclo estudado por Aljundi (2008) apresenta uma eficiência energética do ciclo maior do que a eficiência exergética. Com esses resultados não se pode ter uma posição concreta com relação de qual seria a melhor análise para este caso, já que o condensador apresenta a maior perda de energia, porém através do estudo das irreversibilidades, é possível observar que a caldeira possui a pior eficiência exergética dentre todos os componentes.
- Segundo Kamate e Gangavati (2008), quando a planta utiliza pressões e temperaturas mais elevadas o seu rendimento aumenta, juntamente com os custos com materiais.
- Analisando a tendência no gráfico de eficiência versus tipo de operação observa-se que o rendimento exergético apresenta o mesmo comportamento do rendimento energético, segundo Ganguly et al (2010), ou seja, do ponto de vista técnico ambas trazem a mesma informação.
- Segundo Bocci et al (2007) algumas inovações tecnológicas que podem ser aplicadas a centrais de potência não são economicamente viáveis.
- Segundo Knight et al (2004) é importante a escolha do índice de avaliação financeira ou energética de uma planta, pois cada índice traz uma informação diferente sobre o projeto estudado, informações técnica e econômicas.

## 3. Metodologia

Neste capítulo está apresentado qual o problema estudado e quais foram os métodos utilizados para tentar analisar o problema e encontrar solução para o problema apresentado. Aqui também são apresentadas as perguntas norteadoras e como foram obtidos os dados utilizados.

### 3.1 Pergunta de Pesquisa

Na introdução deste trabalho, foram apresentados os principais aspectos que envolvem este trabalho. Uma pergunta que se deseja responder no fim deste trabalho é: Qual a influência das tarifas e dos parâmetros técnicos na decisão da usina de produzir energia, açúcar e álcool?

Sabe-se que as tarifas de açúcar e álcool são bastante variáveis, seguem a flutuação da demanda do mercado, como pode ser observado no site da UNICA (União da Indústria de Cana de Açúcar). Essa variação influencia diretamente no retorno financeiro do investimento.

A sazonalidade pode afetar a geração ou preço da energia, ou ainda a quantidade de cana disponível para moagem. Estes e outros parâmetros técnicos podem influenciar na decisão de vendas dos produtos da usina? Através desse estudo tentou-se responder estas perguntas.

### 3.2 Perguntas norteadoras

O investimento em usina de açúcar e álcool é bastante elevado. E a obtenção de parâmetros técnicos é bem mais simples do que a obtenção de parâmetros financeiros. Dentre os parâmetros mais utilizados para analisar tecnicamente uma planta termoelétrica, tais como rendimento energético, rendimento exerético, fator de utilização de energia e fator de utilização de exergia. Será que algum deles poderia representar bem os índices de avaliação financeira? Tornando mais prático e rápido a tomada de decisão em algum investimento.

Dentre estes mesmo índices técnicos tem a mesma representatividade, ou trazem as mesmas informações qualitativamente? Nas análises feitas neste trabalho buscou-se

compreender quais as informações acerca da usina poderiam ser extraídas de cada índice de avaliação.

### 3.3 Caracterização da Pesquisa

Este trabalho aborda conceitos técnicos e financeiros, na tentativa de compreender qual a influência dos parâmetros técnicos e das tarifas na tomada de decisão de uma usina de açúcar e álcool no sudeste brasileiro. O conhecimento do comportamento dos principais índices de avaliação pode facilitar a definição de quais produtos podem ser produzidos e vendidos nas usinas de açúcar.

Para a realização dessa pesquisa foi necessário a aquisição de dados financeiros, preços de equipamentos e serviços, que foram obtidos através de uma empresa especializada em projetos de usina de cana de açúcar. E dados técnicos, que foram adquiridos com fabricantes dos equipamentos utilizados em centrais deste tipo e com engenheiros experientes desta área de projetos.

Depois de juntar todos os dados necessários para realização do estudo, foi construído um programa para pode simular a planta em diversas condições, a fim de encontrar alguma similaridade no comportamento dos índices técnicos e financeiros. O *software* utilizado para simular a planta foi o EES (*Engineering Equation Solver*). Após gerar os gráficos para tentar compreender melhor o comportamento da usina, foram discutidos os resultados e encontradas algumas conclusões.

### 3.4 Delimitação da Pesquisa

A pesquisa composta por dois estudos. No primeiro estudo foram analisados 20 casos, buscando simular as possíveis variações de cargas elétricas e térmicas. Já no segundo foram analisados outros dois parâmetros técnicos, a safra e o consumo de vapor da usina. Vinte e oito foi o número de casos utilizados para análise do segundo.

Há necessidade de estudarem-se mais casos que possam abranger a maior faixa de casos possível. Só assim poderia se afirmar de maneira mais precisa alguma informação sobre o comportamento de usinas de açúcar e álcool e sobre o comportamento dos índices de avaliação técnica e financeira.

### 3.5 Dados da Pesquisa

Alguns dados utilizados neste trabalho são encontrados no capítulo 4 e no apêndice. Dados técnicos e financeiros usados na simulação da planta. Estes dados foram cedidos por empresas fabricantes de equipamentos de usinas de cana de açúcar e empresa de projeto de centrais termoelétricas. Porém, nem com todos os dados encontrados era possível fazer a simulação, então alguns valores foram estimados baseados na experiência de engenheiro que trabalham há anos em empresas de projetos.

Algumas outras informações foram interpoladas, pois só havia valores para algumas faixas de potência gerada de usinas e era necessário conhecer valores intermediários para alguns custos, como custos com empregados, terreno, tratamento químico, dentre outros. Então, para alguns parâmetros financeiros foram feitas equações para calcular o valor do parâmetro e utilizá-lo no estudo de viabilidade.

Já alguns dados técnicos não informados por fabricantes foram estimados procurando não violar as leis da termodinâmica e seguindo a experiência de pessoas que trabalham na área.

Todos os resultados encontrados foram resultado da simulação utilizando a primeira e segunda lei da termodinâmica, lei da conservação da energia e de massa, equação da exergia, VPL e TIR. Além de usar os valores de entalpia e entropia já inclusa no software utilizado.

## 4. Estudo de Caso

O objetivo deste capítulo é descrever a planta estudada e os casos analisados. Na seção 4.2 há a descrição da planta e nas duas seções seguintes são apresentados os estudos feitos. Foram realizados dois estudos, cada um com duas etapas, como pode ser observado na figura 4. 1. No primeiro estudo foram analisados os efeitos da variação das cargas térmicas e elétricas do sistema e no segundo foram variadas a produção de cana de açúcar e o consumo de vapor da fábrica. Em ambos os estudos foram avaliados os parâmetros técnicos e financeiros.

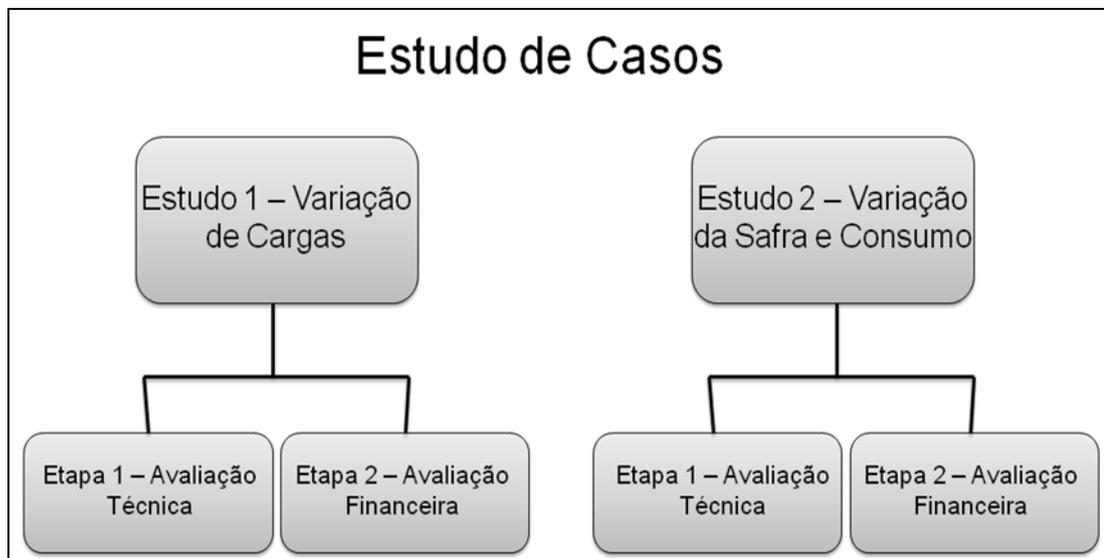


Figura 4. 1 Fluxograma dos estudos de casos

### 4.2 Descrição da planta

A planta estudada é uma central termelétrica de 50 MW (instalada) e será implantada na unidade industrial de uma usina de cana de açúcar em um município do sudeste brasileiro. O combustível utilizado para a geração de energia é o bagaço residual da moagem de cana, cujas características encontram-se na tabela 4. 1, considerando base úmida. A figura 4. 2 mostra um esquema simplificado.

Para o funcionamento de usinas de cana de açúcar, há necessidade de eletricidade e de vapor. Essa demanda pode ser suprida através de uma termoe elétrica instalada na própria usina. Neste ciclo o vapor gerado na caldeira passa pela turbina de condensação gerando energia

elétrica. Devido à baixa pressão de saída não há mais energia que possa ser aproveitada, então este vapor é condensado e segue para o desaerador térmico, onde serão retirados os gases dissolvidos na água. Outra parte do vapor passa pelas turbinas de contrapressão, também gerando energia, porém a pressão de saída nesse caso é maior do que a turbina de condensação e ainda possui energia aproveitável.

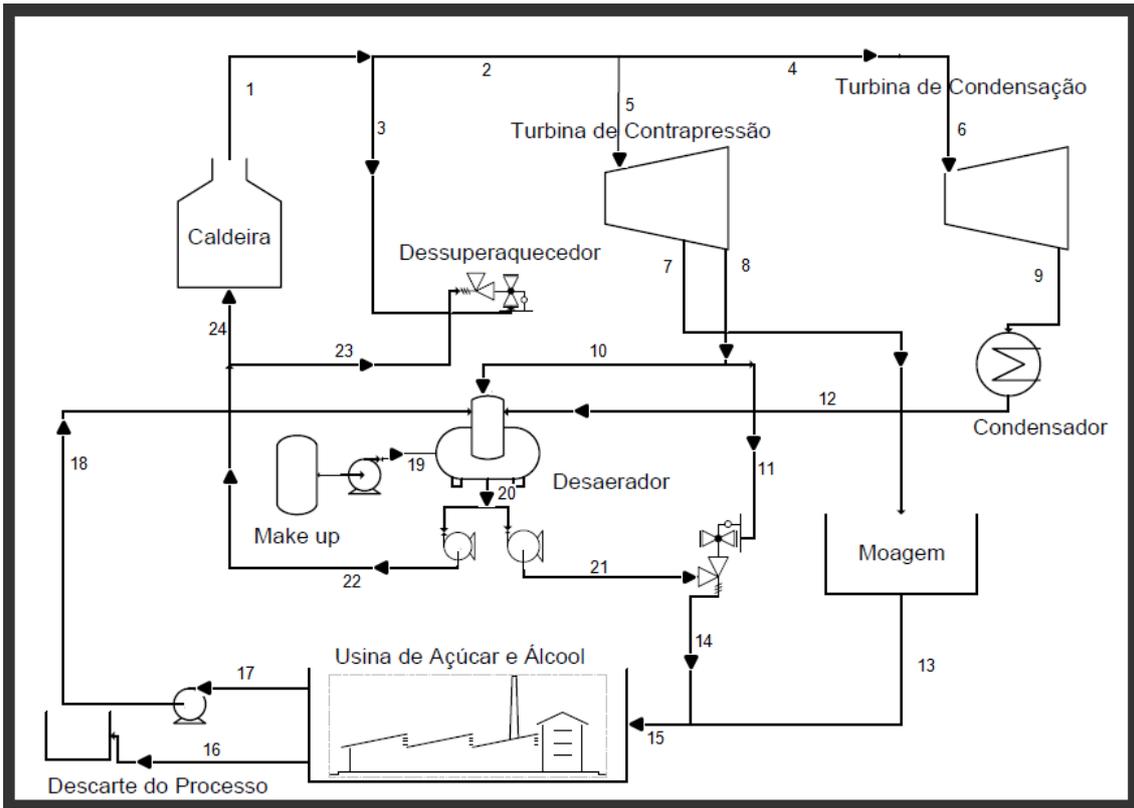


Figura 4. 2 Figura esquemática resumida da planta

Tabela 4. 1 Características do combustível – BAGAÇO DE CANA

Composição do combustível (% em peso)	Carbono (C)	47
	Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	6,5
	Oxigênio (O <sub>2</sub> )	44
	Cinzas	2,5
Faixa de umidade	(%)	48/54
Fibra	(%)	22/27
PCI médio	(kcal/kg)	1.770
PCS médio	(kcal/kg)	2.250

O vapor intermediário extraído da turbina de contrapressão alimenta outra turbina na moenda, que tem a função de moer a cana. Já o vapor de escape da turbina de contrapressão une-se com o vapor que sai da moenda e é utilizado no processo de produção de açúcar e álcool. Após a condensação, ainda durante o processo de fabricação, a água segue para o desaerador. O desaerador recebe água de reposição, chamada de *make up*, para manter constante o volume de água do ciclo, já que há dois descartes de condensado no ciclo. Uma pequena quantidade de vapor é utilizada na selagem das turbinas e nos ejetores, para dar a partida da turbina de condensação. Por fim, a caldeira recebe água bombeada do desaerador.

Nesta planta há um equipamento responsável pela geração de vapor a alta pressão e temperatura, a caldeira. Na caldeira, o combustível (bagaço de cana) é queimado e o calor gerado pela combustão eleva a temperatura da água, que entra como líquido e sai como vapor.

A seguir são apresentadas funções desse vapor gerado:

- Geração de energia nas turbinas;
- Selagem das turbinas;
- Vapor para ejetores;
- Vapor para o desaerador térmico;
- Vapor para fabricação de álcool e açúcar e moagem;

A geração de energia é essencial para usinas auto-sustentáveis. Usinas que possuem termoelétricas próprias não necessitam comprar eletricidade de concessionárias e além de serem auto-sustentáveis podem vender a energia sobressalente. Em 2008, segundo dados da UNICA (União da Indústria de Cana de Açúcar), cerca de 30 usinas negociaram um total de 544MW para venda anual durante 15 anos. Esse volume de vendas gerou um faturamento anual de US\$ 389,6 milhões. Hoje, no Brasil há mais de 200 usinas de cana de açúcar em funcionamento.

A maior parte do vapor gerado na caldeira (ponto 1 da figura 4. 1) passa pelas turbinas gerando energia elétrica. Uma pequena parte deste vapor é utilizada para selagem das turbinas (a selagem tem o objetivo de evitar vazamento de vapor). Há dois tipos de turbinas: turbina de contrapressão e turbinas de condensação.

A turbina de contrapressão recebe esse nome porque a pressão de saída e do escape são maiores do que a pressão atmosférica. Ela possui duas funções, gerar eletricidade e fornecer o vapor necessário para a moagem da cana e processos da usina, como já foi dito. Na turbina de contrapressão, o escape (ponto 8) sai à baixa pressão(2,5 bar) e na extração (ponto 7) a uma pressão média (23 bar). O vapor de média pressão é utilizado nas turbinas na moagem, para

gerar potência de eixo, mover picadores, desfibradores e moenda. Atualmente esse tipo de tecnologia está sendo mudada por uma forma mais eficiente em algumas usinas no Brasil. Motores elétricos estão sendo utilizados para mover os equipamentos da moagem. O vapor de baixa segue diretamente para a usina de álcool e açúcar.

A pressão de saída nesse tipo de turbina é menor do que a pressão atmosférica. Para gerar essas baixas pressões (0,11 bar) utiliza-se um equipamento chamado ejetor. Os ejetores são equipamentos baseados no efeito *venturi*. A redução de pressão faz com que haja um melhor aproveitamento da energia do vapor, pois isso as turbinas de condensação geram mais energia do que as de contrapressão.

As turbinas a vapor podem ser classificadas quanto ao princípio fundamental. Turbinas de ação, neste tipo o seu funcionamento é devido, unicamente, à queda da pressão do vapor nos bocais. Turbinas de reação utilizam, ao mesmo tempo, a pressão do vapor e a sua expansão nas rodas móveis. Nesta, à medida que o vapor se expande, seu volume específico aumenta, razão pela qual as fileiras sucessivas de palhetas têm suas dimensões aumentadas progressivamente, segundo Lora et al (2004). Como o volume específico no estágio de alta pressão é pequeno, isso pode ocasionar fugas de vapor no topo. Por isso, evitam-se utilizar turbinas de reação como turbinas de alta e média pressão, preferindo-se arranjos de turbina de ação e reação.

As turbinas utilizadas nesse projeto são consideradas de médio porte pelos fabricantes nacionais de turbogeradores. A turbina de condensação tem potência nominal de 20 MW, enquanto as de contrapressão são duas de 25 MW. A potência total nominal é 70MW. O custo de cada uma das turbinas consideradas foi à turbina mais cara, ou seja, o valor de maior potência dos casos estudados, já que nos casos estudados houve extrapolação dos valores possíveis de geração de energia.

O condensado que sai da turbina de condensação (ponto 12) segue para o desaerador térmico. Nele são retirados da água os gases dissolvidos que poderiam causar corrosão na tubulação da caldeira. Para o controle de sólidos dissolvidos, uma parte do condensado é descartado no processo da usina (ponto 16) e na caldeira. Devido aos descartes, há necessidade de reposição dessa água, essa reposição é chamada de água de *make up*. O desaerador térmico também tem o papel de elevar a temperatura da água que irá entrar na caldeira.

O papel do dessuperaquecedor é saturar o vapor que é utilizado na selagem, ejetores e no processo de fabricação do álcool e açúcar.

Tabela 4. 2 Informações da planta

Informação do Equipamento	Vazão mássica (t/h)	Pressão (bar (a))	Temperatura (°C)	Estado do Fluido
Entrada da Caldeira	430	90	110	Água quente
Saída da Caldeira	420	67	515	Vapor Superaquecido
Entrada da Turbina de Contrapressão	319	65	510	Vapor Superaquecido
Extração da Turbina de Contrapressão	178	23	350	Vapor Superaquecido
Exaustão da Turbina de Contrapressão	141	2,5	150	Vapor Superaquecido
Entrada da Turbina de Condensação	103	65	510	Vapor Superaquecido
Exaustão da Turbina de Condensação	103	0,11	Temperatura de Saturação (Título $\approx$ 92%)	Vapor Saturado
Entrada Turbinas da Moagem	178	23	350	Vapor Superaquecido
Processo*	308	2,5	127	Vapor Saturado
Torres de Resfriamento	4000	5,0	30	Água Líquida

\*Processo de Fabricação de Álcool e Açúcar

O sistema de geração de vapor é composto por duas caldeiras aquotubulares. A vazão total, pressão e temperatura estão indicadas na tabela 4. 2. O sistema de água de alimentação das caldeiras é composto por quatro conjuntos de bombeamento. Com a finalidade de manter a alimentação de vapor necessária ao processo (vapor saturado a 2,5 bar) independente da variação de carga nas turbinas de contrapressão, está instalada uma linha de *bypass* às turbinas, provida de uma estação rebaixadora / dessuperaquecedora, interligando o coletor distribuidor de alta pressão a linha principal de vapor de escape das turbinas de contrapressão. Este *bypass* tem sua capacidade máxima limitada à quantidade de vapor necessária para uma turbina de contrapressão.

De acordo com informações do projeto, o consumo médio de vapor do processo é de 308 kg/h, e o retorno de condensado de aproximadamente 85% deste valor. O condensado é entregue pela usina em um tanque, sendo em seguida bombeado para o desaerador, para realimentação do ciclo de geração de vapor.

A refrigeração da água do condensador é em circuito fechado, com a utilização de torres de resfriamento com capacidade para dissipar aproximadamente 56 MW, com uma vazão de água de circulação indicada na tabela 4. 2.

A ETA (estação de tratamento de água) é dimensionada para atendimento a toda a demanda de água da central termelétrica onde necessário, compreendendo: utilidades, limpeza, instalações prediais, reposição (make up) das torres, caldeiras, lavadores de gases das caldeiras etc. O tratamento de água para alimentação das caldeiras é do tipo osmose reversa, recebendo a água clarificada da ETA, efetuando o tratamento e em seguida armazenando esta água desmineralizada, que alimenta através de bombeamento o desaerador térmico. Todo o sistema de bombeamento e transporte (bombas, tubulações, válvulas e acessórios) da água desmineralizada, desde o sistema de osmose reversa até o desaerador, é em aço inoxidável.

O conjunto completo de recepção e transporte de bagaço, da saída das moendas até as bicas de alimentação das caldeiras, assim como, da recepção no pátio até a esteira distribuidora está projetado de modo a atender as necessidades do processo quanto a perfeita operacionalidade do sistema.

### 4.3 Equações

As principais equações utilizadas nas análises são apresentadas de forma generalizada no capítulo 2. Todas as equações são apresentadas no apêndice A e alguns valores utilizados nas equações financeiras estão na Tabela A. 1 e na Tabela A. 2.

Os parâmetros que serviram para análise dos casos foram:

- Rendimento elétrico do ciclo ( $\eta_1$ ); (equação 2.8) - O rendimento elétrico é dado pela razão da energia elétrica de saída e a energia do combustível de entrada. Apenas a energia elétrica é considerada como produto de venda. A energia do combustível é obtida através do PCI (Poder Calorífico Inferior) do combustível, que já foi definido na tabela 4.1 e a sua vazão é estipulada através da vazão de cana moída.

- Rendimento exergético do ciclo ( $\eta_{II}$ ); (equação 2.9) - O rendimento exergético é calculado da mesma forma do rendimento elétrico, porém ao invés de usar os valores de energia de entrada e saída do sistema, utiliza-se valores exergéticos.

- Fator de utilização de energia ( $FUE_I$ ); (equação 2.10) - O FUE leva em consideração tanto a energia elétrica quanto a energia térmica.. Esta é uma forma mais completa de análise, já que as duas formas de energia utilizadas como fonte de lucro para a usina são consideradas.

- Fator de utilização de exergia ( $FUE_{II}$ ); (equação 2.11) - O  $FUE_{II}$ , bem como o rendimento exergético, utiliza os valores das exergias do sistema para o cálculo desse índice.

- Taxa interna de retorno (TIR); (equação 2.14) – Este parâmetro avalia a taxa de lucratividade do empreendimento num determinado intervalo de tempo.

- Valor presente líquido (VPL); (equação 2.15) – O VPL representa a quantificação dos saldos monetários ao longo dos anos, trazido para a data presente. Através dos dois parâmetros acima apresentados, é possível ter uma boa estimativa da viabilidade financeira do empreendimento.

Os quatro primeiros são parâmetros de avaliação técnica e os dois últimos de avaliação financeira. Os valores de vazão, entalpia, exergia apresentados na tabela 5. 1 foram utilizados para os cálculos dos rendimentos e fatores de utilização de energia. Já para os parâmetros financeiros foram usadas equações cedidas por empresas e fabricantes.

Algumas outras equações que estão apresentadas no apêndice A são mostradas a seguir. Por exemplo, balanço de massa no desaerador é dado pela equação a seguir:

$$\dot{m}_{18} + \dot{m}_{12} + \dot{m}_{19} + \dot{m}_{10} = \dot{m}_{22} + \dot{m}_{21} \quad (A.30)$$

Onde:

$\dot{m}_{21}$  é a vazão mássica de água que sai do desaerador para o dessuperaquecedor do processo.

$\dot{m}_{22}$  é a vazão mássica de água que sai do desaerador para a caldeira e dessuperaquecedor de selagem e ejetores

$\dot{m}_{12}$  é a vazão mássica de condensado que entra no desaerador oriundo do condensador

$\dot{m}_{10}$  é a vazão mássica de vapor que entra no desaerador oriundo da extração das turbinas.

$\dot{m}_{18}$  é a vazão mássica que entra no desaerador do retorno de condensado do processo.

$\dot{m}_{19}$  é a vazão mássica de entrada de água de reposição (*make up*).

Da mesma forma que o balanço mássico foi feito no desaerador, também foi feito o balanço energético. E como não há transferência de calor, nem trabalho realizado, o balanço resume-se ao somatório dos produtos dos fluxos mássicos pela respectiva entalpia do estado, como mostrado na equação A.47.

$$\dot{m}_{18}h_{18} + \dot{m}_{12}h_{12} + \dot{m}_{19}h_{19} + \dot{m}_{10}h_{10} = \dot{m}_{22}h_{22} + \dot{m}_{21}h_{21} \quad (\text{A.47})$$

#### 4.4 Estudo da variação de cargas

No primeiro estudo as cargas elétricas e térmicas do sistema foram variadas. Para esta análise foram selecionados vinte casos diferentes, variando as cargas nas turbinas de contrapressão e condensação, bem como a carga na moagem (no processo de fabricação de álcool e açúcar a carga utilizada é a mesma da moagem), conforme ilustrado na tabela 4.3.

Na primeira etapa desse estudo foram avaliados dezenove casos fora das condições usuais e o caso base. O caso base (caso 1) representa as condições de projeto com moagem de 650 toneladas de cana moídas por hora, 50MW de potência gerada para as turbinas de contrapressão e 20 MW para as turbinas de condensação. Os equipamentos adotados são sempre os mesmo para todos os casos e o custo levado em consideração é o maior. Por exemplo, as turbinas de contrapressão têm a energia elétrica gerada variando de 30MW até 70MW, o custo associado é de uma turbina de 70MW, porém as turbinas são flexíveis o suficiente para suportar a variação de carga necessária.

Há seis famílias de casos. Na primeira, a moagem é reduzida até 85% de sua capacidade. Variando 5% de caso em caso, sempre com as cargas elétricas nas turbinas constantes. Nos casos de 5 à 7, a carga na moagem é mantida em 85% enquanto a carga na turbina de condensação é aumentada e na turbina de contrapressão. Nos casos de 8-10, novamente mantida a moagem na carga mínima e as turbinas de contrapressão têm sua carga elevada, enquanto a de condensação sofre uma redução em sua potência. Para os casos de 11-13 todos os equipamentos sofrem a mesma redução de carga, variando de 95% no caso 11 até 85%, como é apresentado no caso 13.

Tabela 4. 3 Descrição dos casos estudados

Casos	Carga		
	Moagem [%]	Turbina de Contrapressão [%]	Turbina de Condensação [%]
1	100,0	100,0	100,0
2	95,0	100,0	100,0
3	90,0	100,0	100,0
4	85,0	100,0	100,0
5	85,0	95,0	112,5
6	85,0	90,0	125,0
7	85,0	85,0	137,5
8	85,0	104,0	90,0
9	85,0	108,0	80,0
10	85,0	112,0	70,0
11	95,0	95,0	95,0
12	90,0	90,0	90,0
13	85,0	85,0	85,0
14	100,0	100,0	100,0
15	95,0	95,0	100,0
16	90,0	90,0	100,0
17	85,0	85,0	100,0
18	95,0	100,0	95,0
19	90,0	100,0	90,0
20	85,0	100,0	85,0

O caso 14 representa o mesmo caso base. No grupo de casos de 14-17 a turbina de condensação tem sua carga mantida em 100%, enquanto a moagem e a turbina de contrapressão sofrem redução na carga de 100% até 85%. Nos três últimos casos estudados, de 18-20, a turbina de contrapressão é a única que não sofre variação de carga. Já os outros equipamentos têm sua carga variada entre 95 e 85%.

Para a segunda etapa do primeiro estudo foram feitos três cenários financeiros diferentes, conforme a tabela 4. 4, para avaliação dos parâmetros econômicos, VPL e TIR. Este estudo representa a análise de sensibilidade dos parâmetros de avaliação técnica em relação às tarifas. Para o cenário (1) foram usados os valores médios usuais de venda de

energia elétrica e açúcar/álcool, esses valores foram considerados médios no ano de 2008 por empresas do ramo. Para o Cenário (2), o preço de venda de açúcar/álcool foi reduzido em 20% e o preço da eletricidade aumentado em 20%. No cenário 3 a eletricidade teve seu preço reduzido em 20% e o açúcar/álcool teve o aumento de 20%. Os preços tanto de açúcar, álcool e energia são bastante flutuante. Na figura 4.3 pode-se observar a variação dos preços do álcool desde 2003 a 2009. Nem todos os casos há variação de 20% do valor, uns são maiores, como julho de 2005 para julho de 2006, onde o preço quase dobrou, e outras épocas menores, como em julho de 2007 para janeiro de 2008. Além do mais, os preços de açúcar e álcool podem ter comportamentos diferentes. Todos esses fatores dificultam a caracterização dos preços dos produtos da usina. Devido a isso foi utilizado o valor fixo de 20%, tanto para mais, quanto para menos. Representando um valor razoável para medir a sensibilidade dos índices econômicos.

**Tabela 4. 4 Descrição das alterações nos preços de venda dos produtos**

Cenários	Preço	
	Vapor	Energia Elétrica
Cenário 1	Mercado (Estimado através do Álcool e Açúcar)*	Mercado**
Cenário 2	20% menor que o preço de mercado	20% maior
Cenário 3	20% maior que o preço de mercado	20% menor

\* Este valor foi calculado baseado na quantidade de vapor necessária para produzir álcool e açúcar na proporção 80% açúcar e 20% álcool.

\*\* O valor adotado para preço de mercado para a venda de energia foi R\$ 170,00/MWh

#### 4.5 Estudo da variação da produção de cana de açúcar e do consumo de vapor da usina

No segundo estudo foram avaliados 28 casos diferentes. Durante a primeira etapa dois parâmetros foram variados, a produção de cana de açúcar e o consumo de vapor da fábrica de álcool e açúcar. Na tabela 4. 5 estão expostos os casos estudados. Nela, os parâmetros são substituídos por siglas para facilitar a sua exposição. CES é o coeficiente de expansão da safra, o valor unitário deste parâmetro indica que a safra produzida está segundo os valores previstos pela usina, valores menores que um, indicam redução na safra e valores maiores indicam aumento na produção canavieira. O outro parâmetro é o consumo de vapor da usina,

chamado CVU. Em geral o valor adotado para projeto é entre 380 e 420 quilogramas de vapor por tonelada de cana, isso depende de alguns fatores, tais como tempo de uso (fábricas mais antigas tem maior consumo), manutenção apropriada da moenda, fabricante do equipamento, etc. Para compor os casos analisados foram selecionados quatro valores para o consumo da fábrica, 380, 400, 420 e 450 kgv/tc. Na tabela a seguir, os casos estão indicados matricialmente, casos  $(i;j)$ , com  $i$  variando de 1 à 7 e  $j$  variando de 1 à 4. O termo  $i$  refere-se ao coeficiente da safra. Já o  $j$  refere-se ao consumo específico, quanto maior o consumo maior o índice. Ou seja, em cada coluna o consumo de vapor é constante e para cada linha a safra é a mesma.

Tabela 4. 5 Casos estudados

Caso (i; j)		j			
		1	2	3	4
i	1	CES = 0,7 CVU = 380	CES = 0,7 CVU = 400	CES = 0,7 CVU = 420	CES = 0,7 CVU = 450
	2	CES = 0,8 CVU = 380	CES = 0,8 CVU = 400	CES = 0,8 CVU = 420	CES = 0,8 CVU = 450
	3	CES = 0,9 CVU = 380	CES = 0,9 CVU = 400	CES = 0,9 CVU = 420	CES = 0,9 CVU = 450
	4	CES = 1,0 CVU = 380	CES = 1,0 CVU = 400	CES = 1,0 CVU = 420	CES = 1,0 CVU = 450
	5	CES = 1,1 CVU = 380	CES = 1,1 CVU = 400	CES = 1,1 CVU = 420	CES = 1,1 CVU = 450
	6	CES = 1,2 CVU = 380	CES = 1,2 CVU = 400	CES = 1,2 CVU = 420	CES = 1,2 CVU = 450
	7	CES = 1,3 CVU = 380	CES = 1,3 CVU = 400	CES = 1,3 CVU = 420	CES = 1,3 CVU = 450

\*CES – Coeficiente de expansão da safra;

\*CVU – Consumo de vapor da usina;

Para os casos  $(4;j)$  a moagem horária da cana é de 734 toneladas de cana por hora, que é a vazão de cana nominal da usina. Para o caso base, caso  $(4;3)$  indicado na tabela acima, a potência gerada é de aproximadamente 70MW. Nos casos  $(i;1)$  a planta está na condição de menor consumo de vapor da fábrica. Para o caso  $(7;1)$  esta mesma planta atinge a máxima

produção de cana de açúcar dentro os casos de sua família (i;1). O máximo consumo e produção de cana dão-se no caso (7;4).

A potência é sempre um dado de saída deste estudo, ou seja, para cada caso diferente prevê-se uma potência gerada diferente.

Na segunda etapa foram utilizados os dados energéticos já adquiridos da primeira parte, e então feita simulação da variação dos produtos da usina para o mesmo vapor disponível. Avaliando-se, como seria financeiramente falando, se a empresa produzisse apenas álcool e energia ou apenas açúcar e energia para venda. Esta segunda parte visa mais a parte econômica do processo.

Esse estudo de viabilidade é complicado, pois os preços tanto do açúcar como álcool são variáveis. Em Bejan et al (1995) é apresentado um modelo onde pode se obter os principais valores do custo fixo e variáveis na implementação de uma termoelétrica, como já foi citado no fim do capítulo 3 na parte receitas e custos. Essas fórmulas não são precisas, porém dão uma boa idéia da ordem de grandeza do investimento. O ideal seria um cálculo *online*, sempre que fosse necessário ser feita uma avaliação, fosse utilizados os preços atuais.

Nesta simulação foi feita a média dos preços dos últimos anos da saca de açúcar e do álcool anidro disponíveis no site da UNICA (União da Indústria de Cana de Açúcar). A figura 4. 3 mostra uma idéia de como varia o preço do álcool. No eixo x da figura 4. 3 e da figura 4. 4 estão apresentadas as datas dos dados apresentados, o número é composto por 6 números os 4 primeiros representam o ano e os dois últimos o mês em que ocorreu o determinado preço.

Pode-se observar na figura 4. 3 e na figura 4. 4 o preço do açúcar e do álcool. O número de empresas e pessoas buscando recursos sustentáveis vem proporcionando o aumento no uso do etanol em nosso país. Um dos setores industriais que mais influenciou esse crescimento foi o ramo automobilístico.

Foram feitas as médias desses valores e obtidos os seguintes preços médios para álcool e açúcar respectivamente, R\$ 0,82 por litro e R\$ 26,23 por saco.

Na segunda etapa apenas os parâmetros financeiros foram alterados, todos os parâmetros técnicos foram mantidos. Devido a isso todos os rendimentos e eficiências calculados se mantiveram, tanto energéticos quanto exergéticos.

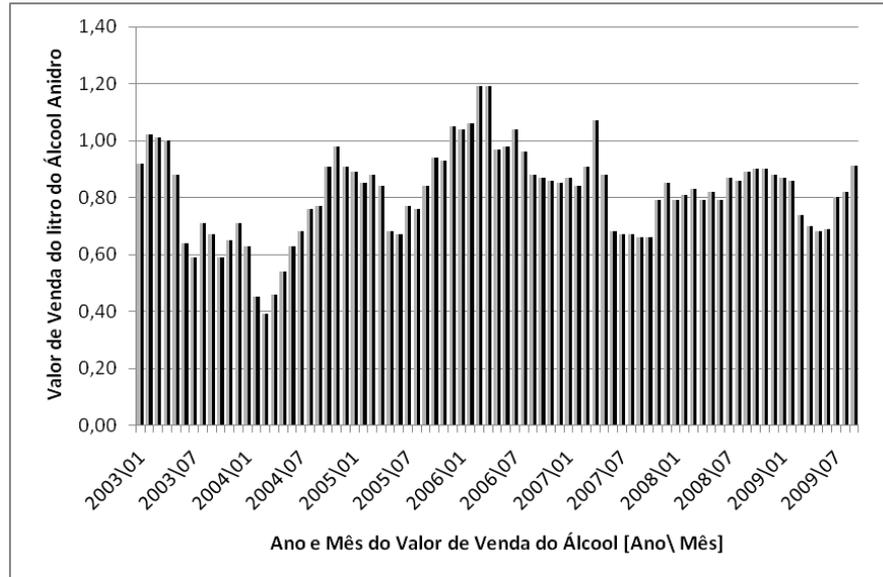


Figura 4. 3 Variação do Preço do álcool ao longo dos anos. [Fonte: [www.unica.com.br](http://www.unica.com.br)]

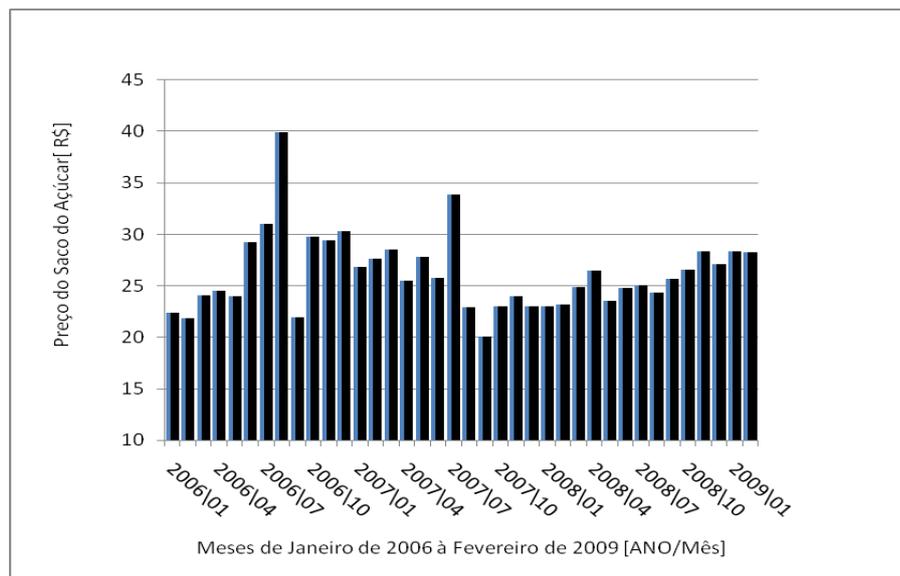


Figura 4. 4 Variação do Preço do açúcar ao longo dos anos. [Fonte: [www.unica.com.br](http://www.unica.com.br)]

## 5. Resultados e Discussões

O objetivo deste capítulo é apresentar os resultados obtidos nos estudos descritos no capítulo anterior. Tanto a parte da análise técnica quanto a parte financeira são abordadas.

É necessário, para o cálculo dos índices de avaliação técnica e financeira, saber previamente os valores energia, entalpia, exergia, vazões e temperaturas de todos os pontos do ciclo estudado. Na tabela 5. 1 há os resultados das propriedades e parâmetros do caso base da planta mostrada simplificada na figura 4. 2. A partir da tabela 5. 1 já se pode observar o valor alto da exergia de saída da turbina de contrapressão, devido à necessidade de vapor do processo, os valores absolutos diferentes de exergia e entalpia específica, tornando assim necessária uma análise percentual de cada tipo de parâmetro. Para o caso base o valor da demanda de vapor para o processo é 308 toneladas de vapor por hora, este valor é pré-determinado pelo projeto da usina. Através da tabela 5. 1 também pode-se determinar os fluxos mássicos, energéticos e exergético de cada componente do sistema.

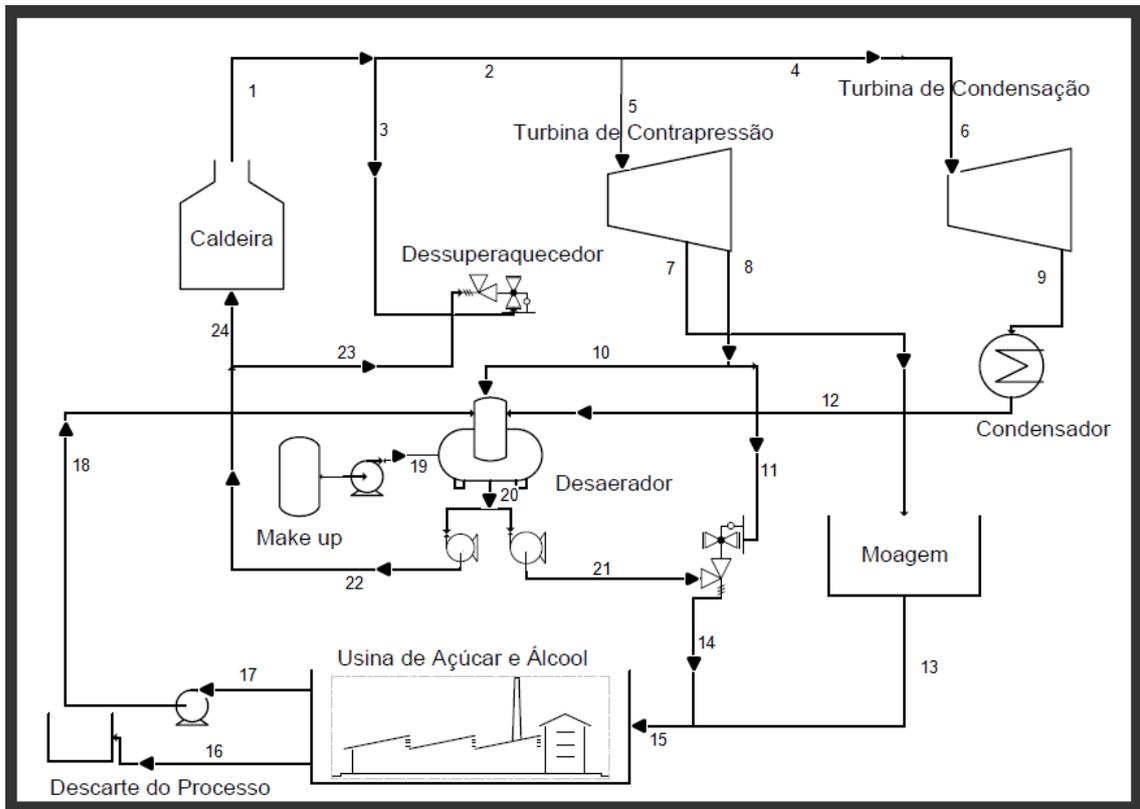


Figura 4. 2 Figura esquemática resumida da planta

Tabela 5. 1 Tabela com os valores das propriedades do vapor e água da planta. (valores para o caso nominal)

Ponto	Entropia [kJ/kg °C]	Entalpia [kJ/kg]	Vazão Mássica [t/h]	Vazão Mássica [kg/s]	Exergia [kW]	Ex. Específica [kJ/kg]	Temperatura [°C]	Pressão [bar]
0	0,3669	104,8					25	1
1	6,87	3451	422,9	117,47	165269,98	1407	515	66,7
2	6,869	3440	422,1	117,25	163818,69	1397	510	65
3	6,869	3440	0,8242	0,23	319,87	1397	510	65
5	6,869	3440	318,9	88,58	123747,31	1397	510	65
6	6,869	3440	103,3	28,69	40071,38	1397	510	65
7	6,883	3130	178	49,44	53520,27	1082	350	23
8	7,169	2765	140,9	39,14	24722,67	631,8	150	2,5
9	7,557	2408	103,3	28,69	4571,15	159,4	47,67	0,11
12	0,6537	193,5	103,3	28,69	90,39	3,151	46,17	2,5
13	7,053	2717	178	49,44	30581,03	618,5	127,4	2,5
10	7,169	2765	13,58	3,77	2382,60	631,8	150	2,5
11	7,169	2765	127,3	35,36	22340,07	631,8	150	2,5
14	7,053	2717	130	36,11	22334,46	618,5	127,4	2,5
15	7,053	2717	308	85,56	52915,50	618,5	127,4	2,5
17	1,607	535,4	261,8	72,72	4416,85	60,74	127,4	2,5
16	1,607	535,4	46,2	12,83	779,44	60,74	127,4	2,5
19	0,3669	105	56,77	15,77	2,37	0,1504	25	2,5
20	1,411	467,7	432,5	120,14	6189,39	51,52	110	89
21	1,416	463,8	2,71	0,75	34,80	46,24	110	35
23	1,416	463,8	0,1758	0,05	2,26	46,24	110	35
24	1,411	467,7	429,614	119,34	6189,39	51,52	110	89

## 5.2 Resultados do estudo da variação das cargas

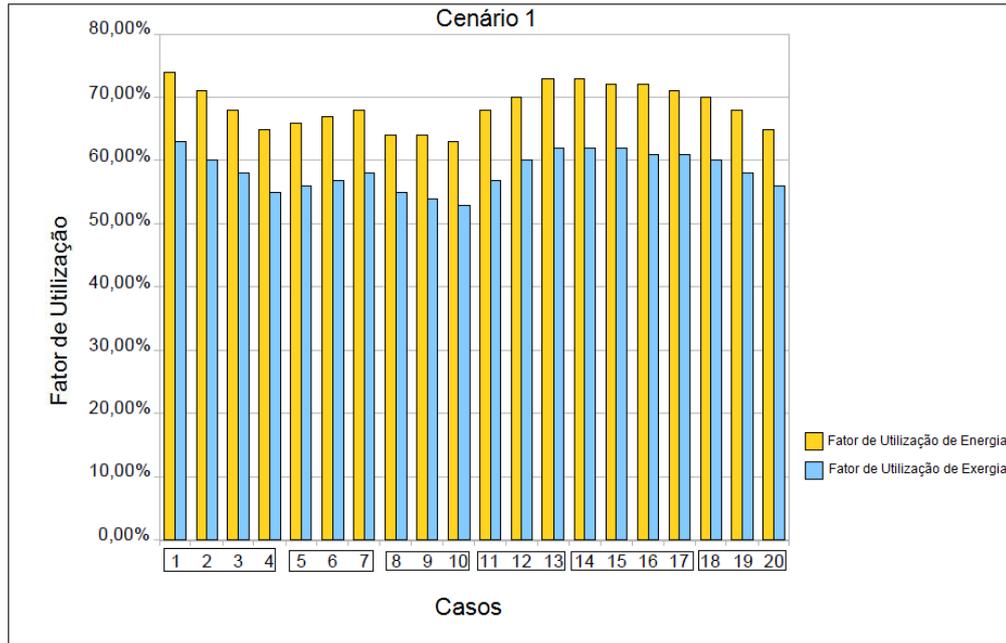
Da figura 5. 1 a figura 5. 6 estão mostrados os resultados das análises feitas nos casos mostrados na tabela 4.3 referentes ao primeiro estudo. O primeiro estudo trata da variação das cargas elétrica (turbinas) e térmica (processo), na primeira etapa desse estudo são avaliados os parâmetros técnicos, tais como rendimento e FUE (fator de utilização de energia/exergia) e na segunda, trata-se da análise de viabilidade econômica. Os casos estão indicados no eixo das abscissas e destacados por família de modo a facilitar a visualização delas. As famílias indicam que os casos sofreram o mesmo tipo de variação de carga, por exemplo, a família dos casos 1 a 4 houve redução da moagem de 85% do valor nominal, enquanto a carga elétrica foi mantida em 100%.

Na tabela 4. 4 estão indicados os cenários financeiros, onde podem ser vistas as variações dos preços da venda de energia elétrica e o preço do vapor. Vale ressaltar que todos os parâmetros técnicos foram mantidos constantes durante a variação dos preços. O valor do vapor foi calculado baseado na quantidade de vapor necessária para produzir álcool e açúcar.

Cada cenário representa uma situação econômica diferente. No cenário 1, os preços de energia elétrica e produtos da usina são os valores de mercado. Já no cenário 2 o preço da energia elétrica é aumentado em 20% e o preço da energia do vapor é reduzido em 20%, como havia sido explicado na tabela 4.4. Para o cenário 3 é o inverso do cenário 2, o preço da energia elétrica diminui e do vapor aumenta, ambos em 20%. Os três cenários são situações econômicas diferentes para o estudo da variação de cargas.

Na figura 5. 1 são mostrados os FUE's (Fator de utilização de energia e exergia) para o cenário (1), em função de cada caso. Como o FUE é a razão entre a soma da energia térmica usada no processo e a energia elétrica dividida pela energia do bagaço queimado na caldeira, os valores para o cenário (2) e (3) apresentam o mesmo gráfico, já que foram alterados apenas os valores financeiros.

Os valores encontrados do FUE para vinte casos analisados levam em consideração o calor envolvido no processo de fabricação do açúcar e álcool. Devido a isso os valores apresentados são mais elevados do que os rendimentos elétricos tradicionais, já que nos rendimentos tradicionais é feita apenas a razão entre energia elétrica e energia do combustível.



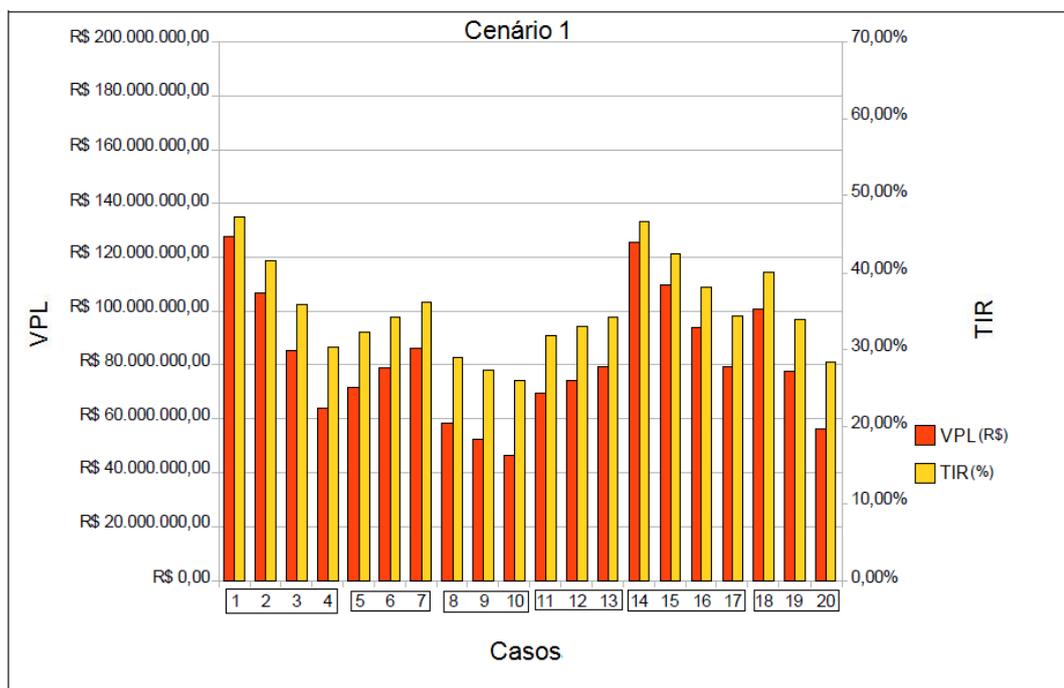
**Figura 5. 1 Fator de utilização energético e exerético.**

O primeiro ponto que pode ser observado é que ambos os FUE's, tanto o energético quanto o exerético, apresentam a mesma tendência. Desta forma seria necessária apenas uma das análises para conhecer o melhor caso. Outro aspecto que também pode ser observado na figura 5. 1 é que mesmo com uma faixa abrangente de casos estudados, o caso base mostra-se o mais eficiente em termos de aproveitamento energético, baseado na experiência da empresa e na primeira análise energética tradicional. Os melhores resultados obtidos são os casos da família 14 a 17, onde a turbina de contrapressão e o processo de moagem variam na mesma proporção, isto se deve ao fato de que a turbina de contrapressão e a moagem são processos em série, são processos dependentes entre si. Caso haja a mesma variação nestes dois equipamentos, isso pode evitar sobras ou excesso de vapor, aumentando assim o rendimento do ciclo. Os piores casos encontrados são os casos 4 e 10, onde o vapor que passa pelas turbinas de contrapressão não é usado no processo de moagem, nem no processo de fabricação de subprodutos.

Na figura 5. 1 podem ser notados claramente três tipos de comportamento: regiões de declínio, regiões de ascensão e uma de estabilidade. Nos casos de (1) a (4) e (18) a (20) são duas regiões de declínio. Nestes casos, a redução do vapor destinado ao processo reduz o FUE. O vapor é gerado para suprir a demanda das turbinas, consumindo combustível, porém parte do vapor da turbina de contrapressão não é utilizado no processo fazendo com que o FUE sofra redução.

Já nas regiões dos casos (8) a (10) e (14) a (17) há uma constância nos valores dos FUE's, para os casos de (8) a (10) o aumento da potência gerada pela turbina de contrapressão é compensada pela redução na geração da turbina de condensação. Já de (14) a (16) o rendimento se mantém constante, pois a proporção das vazões entre o processo e a turbina de contrapressão é mantida constante.

Nos outros casos de (5) a (7) e (11) a (13), a redução na quantidade de combustível utilizada e a transferência do vapor da condensação para contrapressão elevam o fator de utilização de energia do ciclo.



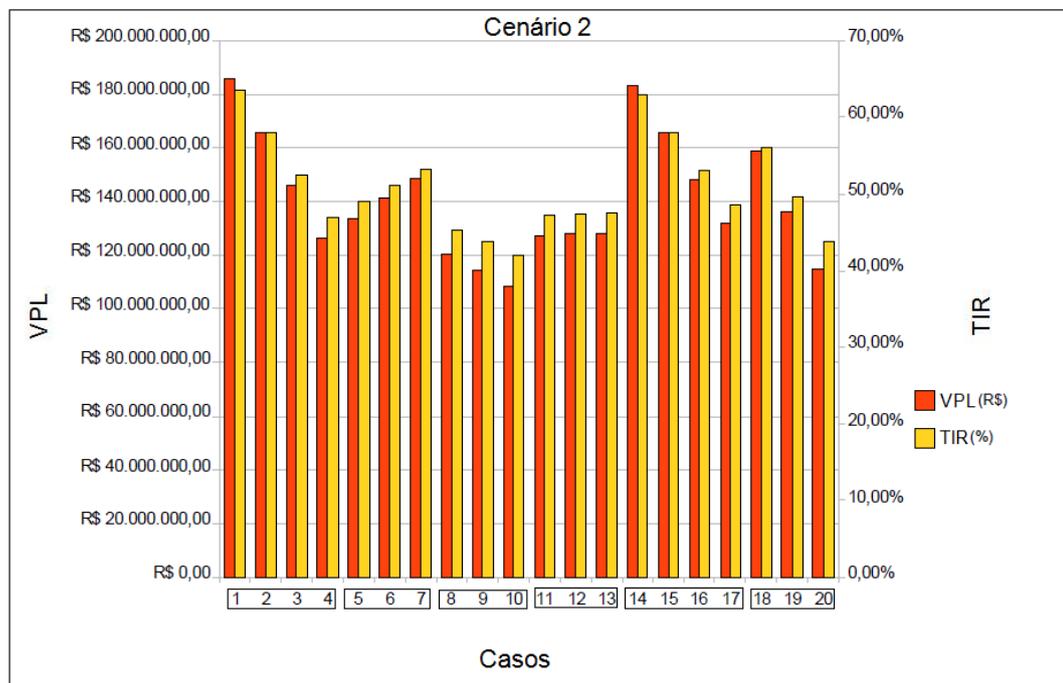
**Figura 5. 2 VPL e TIR para o Cenário 1.**

Nas figura 5. 2, figura 5. 3 e figura 5. 4 são apresentadas as comparações entre as tendências dos parâmetros financeiros, TIR e VPL, para os três cenários financeiros. Como pode ser observado nas três figuras, a TIR e o VPL apresentam o mesmo comportamento qualitativo, indicando algum tipo de conexão entre estes parâmetros. Através dessas figuras pode-se chegar à conclusão que com apenas um dos dois parâmetros financeiros, poderia ter sido feita a otimização financeira do sistema estudado. Matematicamente falando, era esperado que estes parâmetros tivessem a mesma tendência, já que são oriundos do mesmo fluxo de caixa.

Porém, esta não é a forma correta de raciocinar, pois, embora estes parâmetros tenham o mesmo comportamento, trazem informações diferentes. As informações reveladas por cada

parâmetro são importantes juntas, pois o VPL quantifica o retorno financeiro, ou seja, a soma de todos os saldos de fluxos de caixa ao longo dos anos, trazidos para data atual. Já a TIR informa o valor percentual desse retorno comparativamente a taxa de lucratividade de mercado, chamada de TMA. Por exemplo, não seria interessante, financeiramente falando, ter valores elevados para o VPL com baixa taxa interna de retorno.

Nestes gráficos há apenas dois tipos de comportamento apresentados por família de casos, curvas crescentes ou decrescentes. Não há trechos constantes, como visto no gráfico do fator de utilização de energia mostrado na figura 5. 1.



**Figura 5. 3 VPL e TIR para o Cenário 2**

A queda no VPL é provocada pelos seguintes fatores:

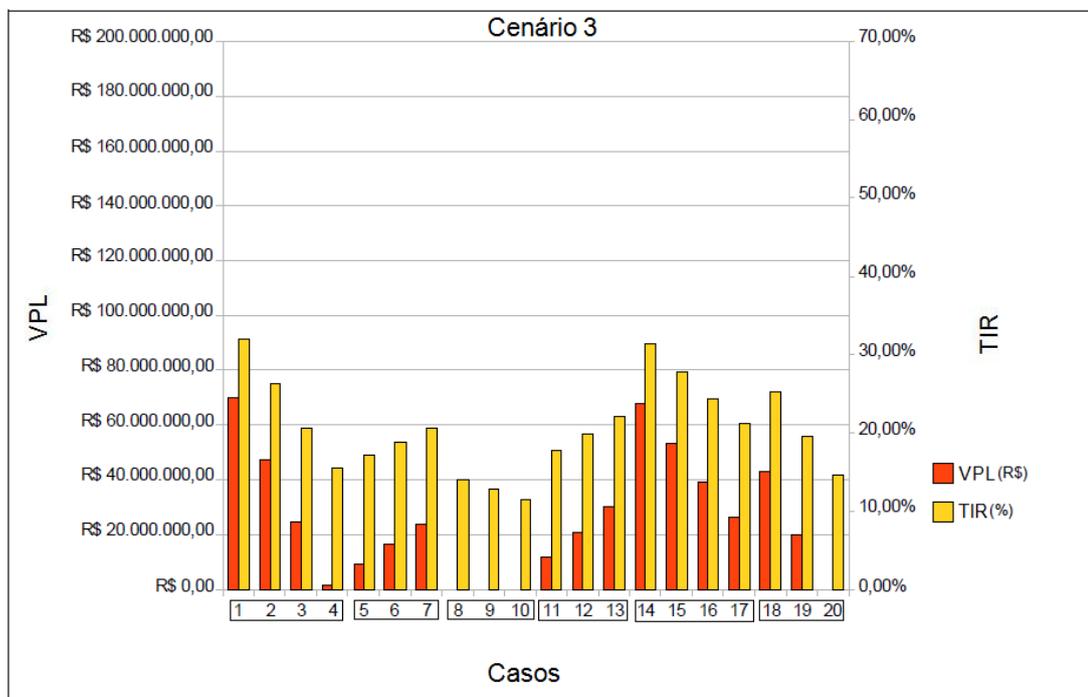
- Redução da produção de álcool e açúcar na usina. Isso ocorre devido à redução do vapor destinado ao processo, ou quando há aumento do consumo específico de vapor da fábrica, por exemplo.

- Redução na geração de energia elétrica, que pode ser provocada pelo aumento do consumo de vapor, ou redução da carga das turbinas.

O preço da energia informado na tabela 4. 4, é R\$170,00 por MWh. O valor do preço da energia elétrica mostra-se bastante influente na TIR e VPL; mais do que o preço dos outros produtos, como pode ser visto na figura 5. 2, figura 5. 3 e na figura 5. 4, onde a TIR e o VPL são mostrados para cada cenário financeiro. Quando o preço da energia é aumentado em 20%

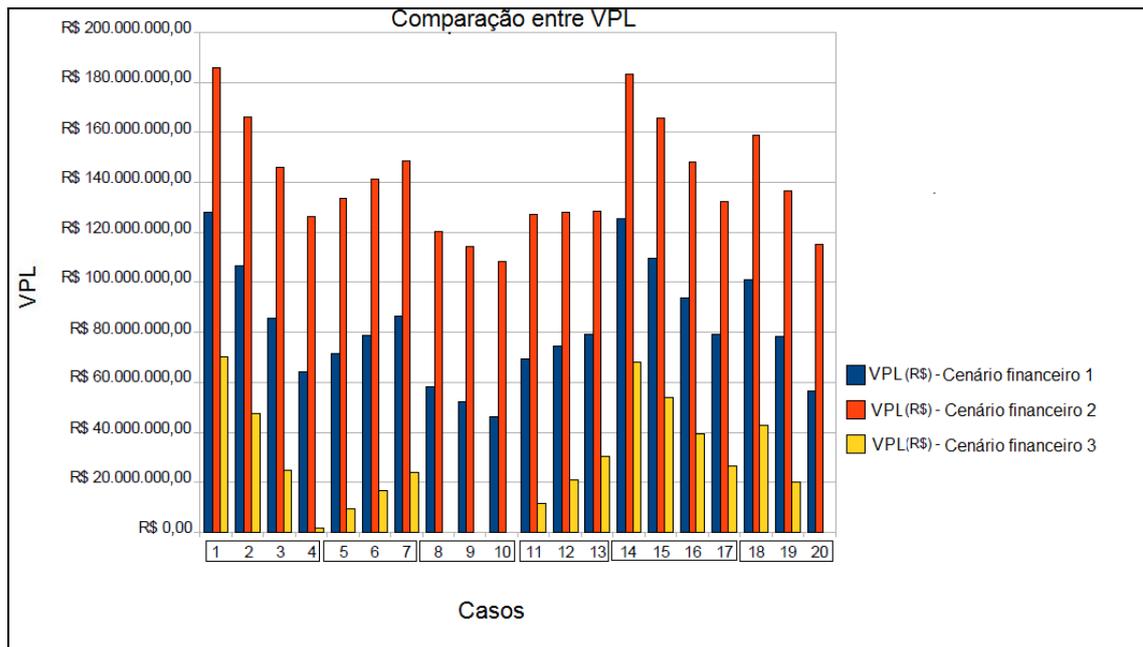
(cenário 2), o valor presente líquido aumenta significativamente, como pode ser visto na figura 5. 3. Já na figura 5. 4, que mostra o cenário onde o preço da energia é reduzido, percebe-se a redução nas taxas internas de retorno e no VPL devido à redução em 20% do preço da eletricidade. Isso mostra que o aumento no preço da eletricidade torna os investimentos mais interessantes do ponto de vista financeiro. Em todos os casos, o caso base apresenta-se como o mais viável economicamente, revelando bastante robustez da planta.

Na figura 5. 4 pode-se observar que alguns valores de VPL não são apresentados. Estes valores representam os casos não atrativos financeiramente, ou seja, com VPL menor que zero.



**Figura 5. 4 VPL e TIR para o Cenário 3**

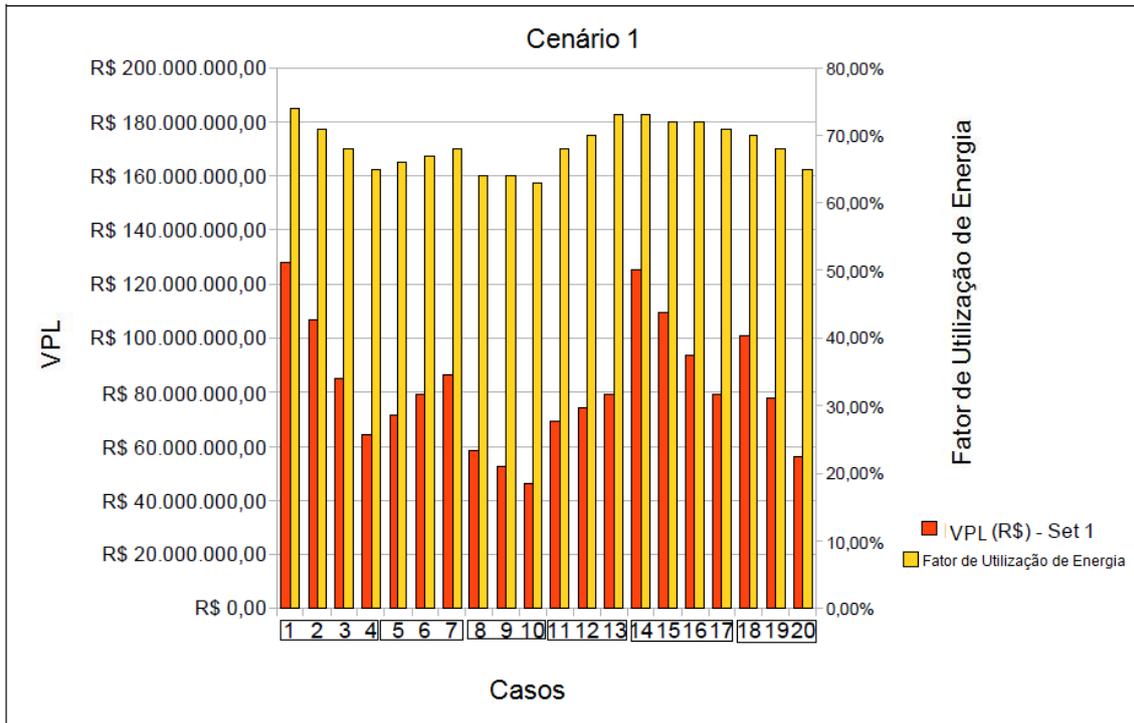
Na figura 5. 5 é mostrada uma comparação entre os valores dos VPL's para os três cenários financeiros no mesmo gráfico, que estavam representados na figura 5. 2, figura 5. 3 e na figura 5. 4. É claro que as mudanças dos valores de venda dos produtos mudam quantitativamente os resultados dos gráficos, porém o comportamento qualitativo dos gráficos é similar.



**Figura 5. 5 Comparação entre os VPL's para os cenários 1,2 e 3**

A figura 5. 6 traz a comparação entre o parâmetro técnico, o FUE, e o parâmetro financeiro, o VPL. É possível notar que os comportamentos destes dois parâmetros possuem semelhanças. Isto é importante, pois caso haja necessidade de tomada de decisão rápida para um determinado investimento, com apenas os parâmetros técnicos seria possível a escolha dos melhores casos, sem a necessidade do conhecimento de nenhum parâmetro financeiro. Vale salientar que estes parâmetros financeiros são os de mais difícil acesso, pois são detidos pelas empresas fabricantes dos equipamentos, empresas de projetos, pela própria usina; ou não há modelos ou equações pelas quais podem ser determinados, dificultando assim a sua obtenção. Entretanto, há algumas exceções, como os casos de (8) a (10) e (14) a (17) que não apresentam a mesma tendência. Isto mostra que se deve ter o máximo de informações possíveis quando está se fazendo análise numa planta. Devem ser feitas quantas análises forem necessárias para ter certeza que solução encontrada é realmente a ótima.

Nos casos de (8) a (10), o VPL apresenta uma redução, enquanto o FUE mantém-se praticamente constante. A redução da produção de energia na turbina de contrapressão é maior do que o aumento na turbina de condensação, isso reduz a energia elétrica vendida, diminuindo as receitas com eletricidade e o VPL consequentemente, enquanto as receitas com álcool e açúcar permanecem constantes. Há uma compensação no FUE, a energia que seria gerada nas turbinas de condensação é utilizada no processo e turbinas de contrapressão. Como o FUE contabiliza estes dois tipos de energia, este parâmetro não sofre alteração.



**Figura 5. 6 Comparação entre o VPL e o Rendimento global para o cenário 1**

Nos casos de (14) a (17) há redução na geração de energia e nos produtos da usina de açúcar a álcool, causado pela redução da moagem e da potência gerada nas turbinas de contrapressão, levando a redução significativa no VPL da planta. A razão entre as massas que passam pelas turbinas e a massa utilizada no processo permanece praticamente constante, sendo esta razão constante, o FUE passa a depender apenas das entalpias e como as temperaturas e pressões não são alteradas, o FUE permanece praticamente inalterado.

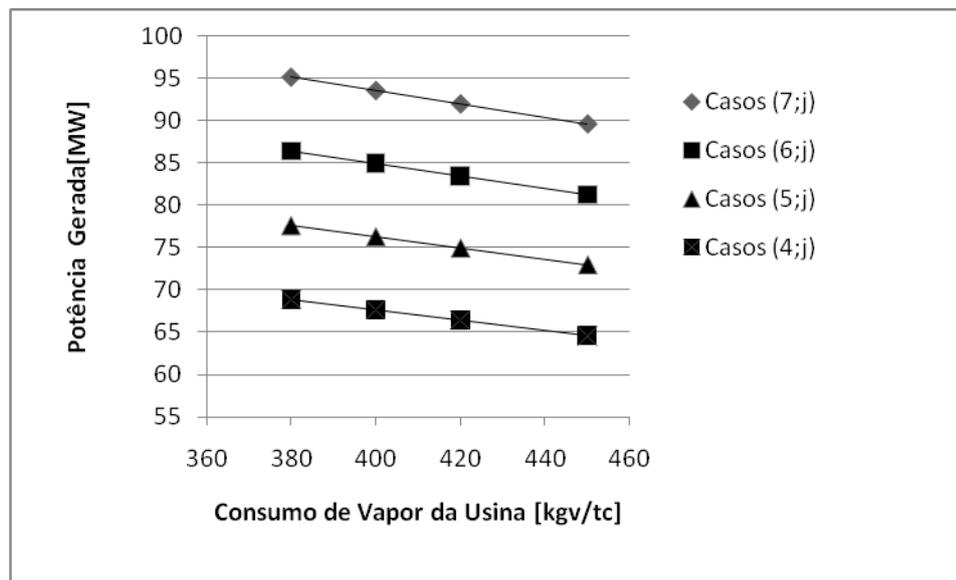
É importante notar que, quando a quantidade de vapor necessária para as turbinas é maior do que a capacidade de moagem, combustível extra é comprado para suprir essa necessidade. Este valor foi mantido constante, R\$ 30,00 por tonelada de bagaço.

### 5.3 Resultado do estudo da variação da produção de cana de açúcar e do consumo de vapor da usina

Neste segundo estudo foram variadas a produção de cana de açúcar e o consumo de vapor da usina. Variando estes dois parâmetros foram gerados 28 casos. A numeração dos casos foi feita seguindo a notação vetorial, (i, j). O índice i representa o CES (coeficiente de

expansão da safra) e o  $j$  o CVU (consumo de vapor da usina). Na tabela 4.5 podem-se encontrar os casos deste estudo.

Na figura 5. 7 estão mostradas as potências geradas para alguns casos. A potência elétrica gerada mais alta foi atingida no caso (7;1), onde o consumo de vapor da fábrica é o mais baixo e a safra atinge o máximo de produção de cana, gerando aproximadamente 100MW de energia bruta. Tecnicamente apresenta-se como o caso mais vantajoso.

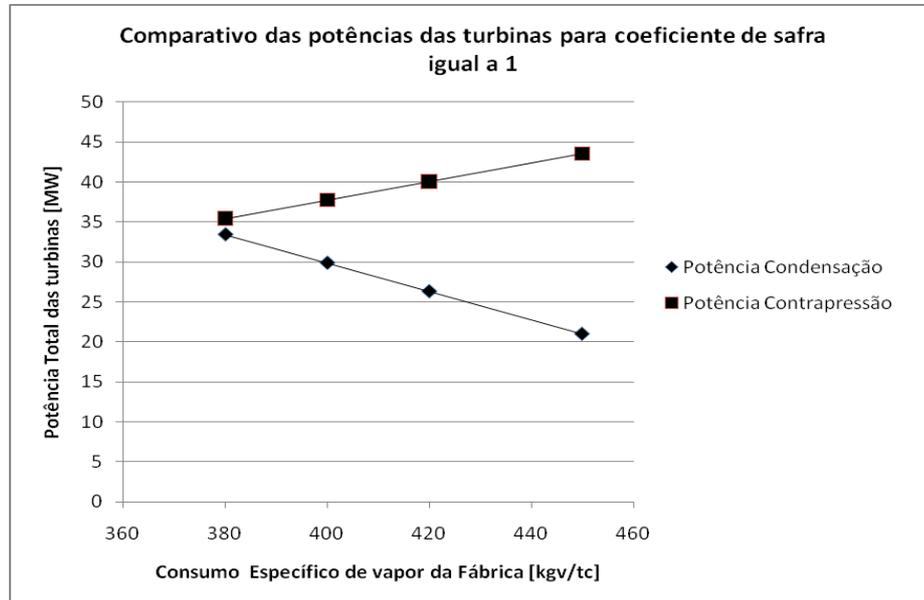


**Figura 5. 7 Potência gerada pelo consumo da usina.**

Ainda na figura 5. 7, foi observada a redução da potência gerada com o aumento do consumo de vapor da usina. A turbina de contrapressão gera menos energia do que as turbinas de condensação, como aumento do consumo de vapor desvia o vapor que iria para a turbina de condensação para as de contrapressão, isso reduz a potência total gerada nas turbinas. A cada 10 kgv/tc a mais que o processo necessite para produzir álcool e açúcar há redução de 734 kW na potência total gerada para os casos da família (6;j). Quanto maior a quantidade de cana moída, maior a queda da produção energética, atingindo nos casos da família (7;j) uma queda de 795kW a cada 10 kgv/tc.

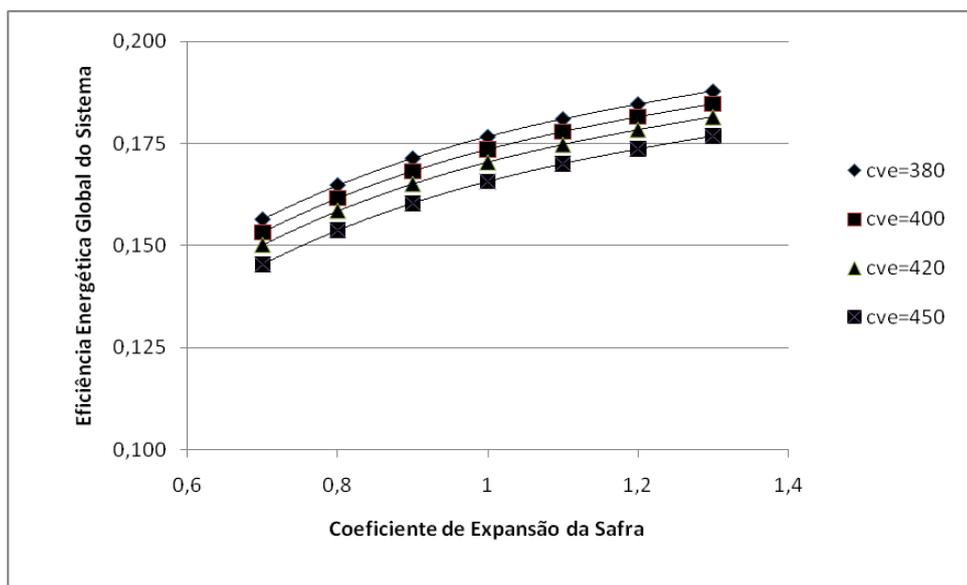
O aumento do consumo específico de vapor da fábrica desvia a maior parte do fluxo de vapor para as turbinas de contrapressão, que são menos eficientes devido à pressão de saída, bem mais elevada em turbinas de contrapressão. Dessa forma há um aumento na geração por parte da contrapressão e uma redução na geração das turbinas de condensação. Isto pode ser

observado na figura 5. 8. Essa redução na condensação é maior do que o aumento nas turbinas de contrapressão, gerando assim a redução na produção de energia.



**Figura 5. 8 Comparativo entre as potências geradas nas turbinas de contrapressão e condensação**

Como pode ser observado na figura 5. 9, o aumento da safra eleva o rendimento para o consumo de vapor da fábrica constante. E, quanto maior o consumo menor o rendimento, para uma determinada safra. Este rendimento da figura 5. 9 leva em consideração apenas a energia elétrica gerada nas turbinas, não sendo considerada no cálculo do rendimento a parcela de energia utilizada no processo de fabricação de açúcar e álcool, em forma de calor.



**Figura 5. 9 Gráfico da eficiência energética ( $\eta$ ) do sistema pelo coeficiente de expansão da safra da usina**

Como foi observado, o rendimento aumenta com a redução do consumo da fábrica. Quanto menor o consumo da fábrica, menor a necessidade da passagem de vapor pelas turbinas de contrapressão. Como todo combustível é utilizado na geração de vapor, a vazão de vapor que sai da caldeira é constante nesse segundo estudo. A maior parcela de vapor é utilizada nas turbinas de condensação, aumentando assim o rendimento elétrico da planta.

Na figura 5. 10, são mostrados os valores do FUE (fator de utilização de energia). Nota-se que o aumento do consumo de vapor da fábrica eleva o FUE. Como este fator leva em consideração tanto energia elétrica quanto térmica, ao aumentar o consumo da fábrica o vapor é desviado da turbina de condensação para as turbinas de contrapressão diminuindo o calor rejeitado no condensador e assim aumentando o FUE. Do ponto de vista energético parece ser interessante, porém, do ponto de vista econômico não, já que com os mesmo custos iniciais está sendo gerada menos energia elétrica.

Devido à proporção entre as massas da saída da caldeira e do vapor utilizado no processo se manterem constante para cada consumo específico de vapor, o aumento da safra faz com que o FUE mantenha-se praticamente constante para um dado consumo de vapor.

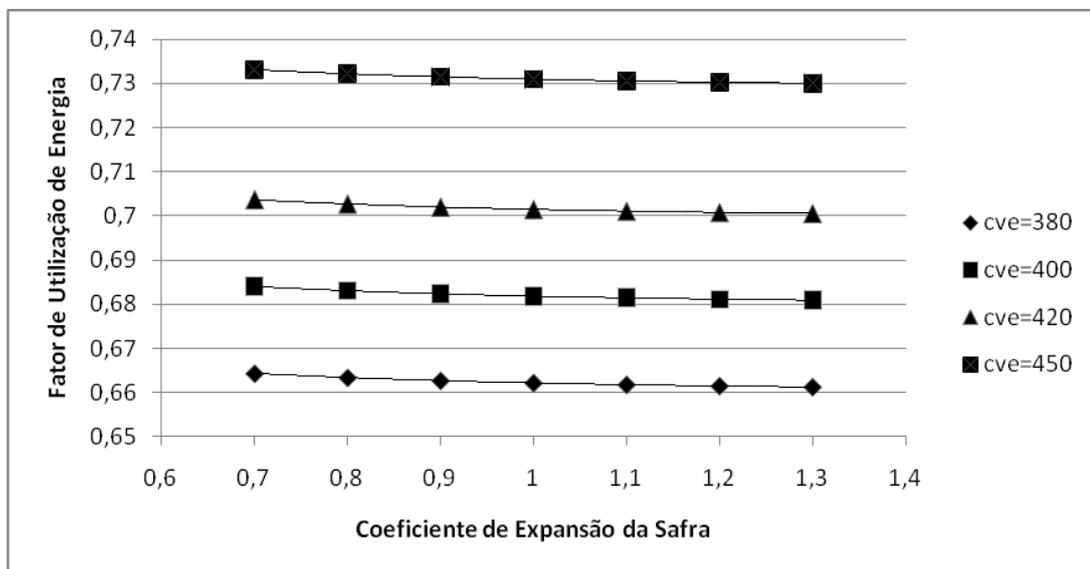
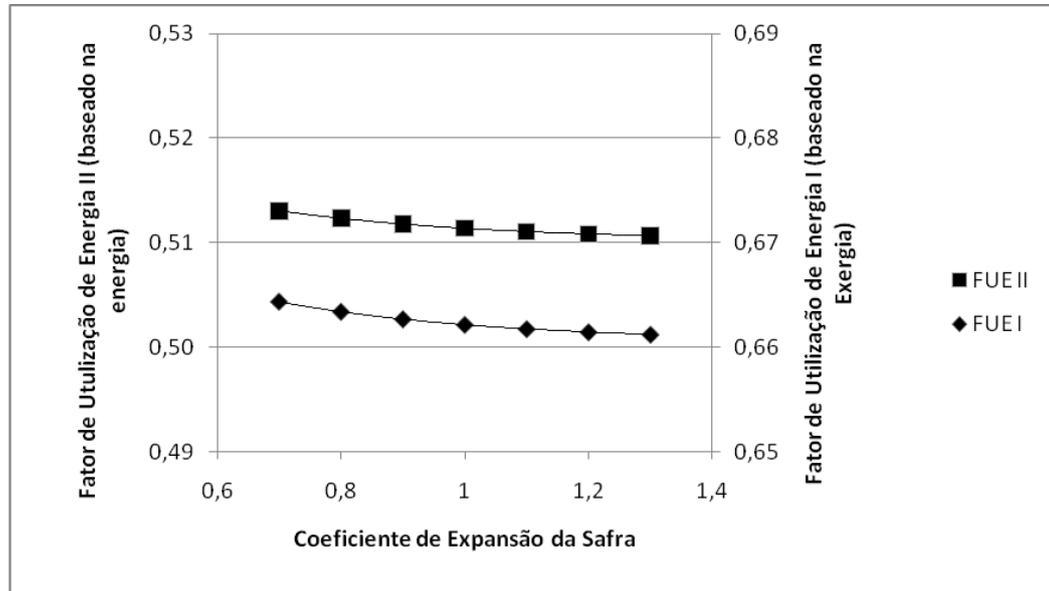


Figura 5. 10 Gráfico do fator de utilização de energia pelo coeficiente de expansão da safra da usina

Como já havia sido mostrado em Oliveira, Silva e Magnani (2009), os fatores de utilização energética e exérgica apresentam uma mesma tendência. Logo, para as condições apresentadas no estudo, seria necessária apenas uma análise dentre as duas feitas. Na figura 5.

11, é mostrado claramente que ambas as análises possuem o mesmo comportamento. O valor utilizado para consumo de vapor da fábrica foi 380kgv/tc.



**Figura 5. 11 Comparativo em os fatores de utilização energética utilizando a primeira e segunda lei para sua determinação.**

Uma característica interessante do tipo de produtos vendidos pelas usinas (açúcar e álcool) é a imensa flutuação do preço, como já foi mostrado na figura 4. 4 e na figura 4. 3. Salvo petróleo e seus derivados onde o governo consegue impor sua autoridade sobre os preços, no mercado sucroalcooleiro os preços flutuam livremente em função das variações de demanda e oferta. Pensando nisso, em parte desse estudo foi feita a variação do preço do saco de açúcar e visto qual a influência no VPL.

Inicialmente foi feita a hipótese que a usina irá destinar 50% da vazão de vapor para a produção de açúcar e a outra metade para produção de álcool. A partir daí foi obtido o gráfico da figura 5. 12, onde são mostrados os valores presentes líquidos para os casos estudados.

O aumento da produção de cana mostra-se bastante influente, como pode ser visto na figura 5. 12, pois o VPL aumenta significativamente com a expansão da safra. Nota-se também o papel importante na venda dos produtos da usina, pois mesmo com o aumento do consumo de vapor, há uma compensação nas receitas obtidas, já que mais energia elétrica é gerada na turbina de contrapressão. Os lucros de venda são bastante competitivos, comparativamente aos rendimentos obtidos através da exportação de energia, porém não são receitas muito confiáveis, pois a variação de preços é bastante grande.

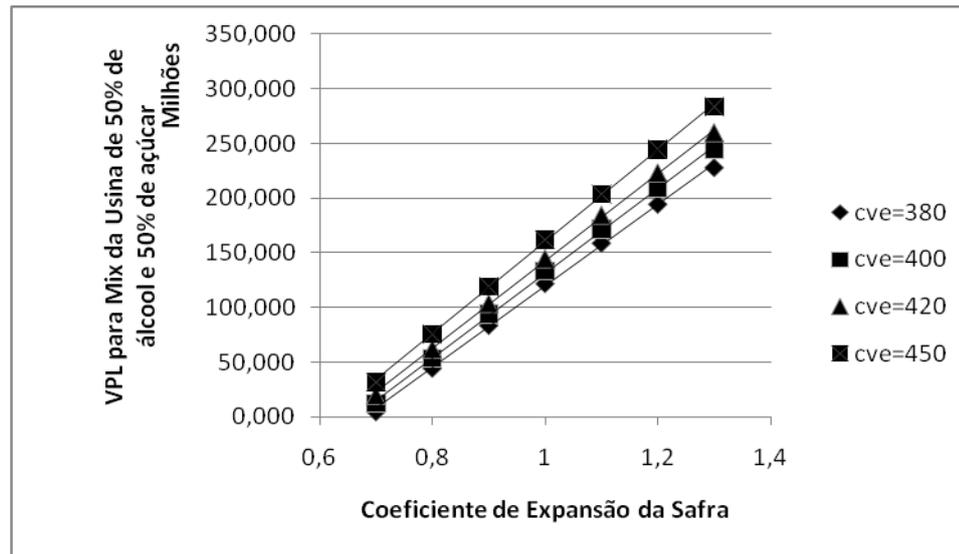
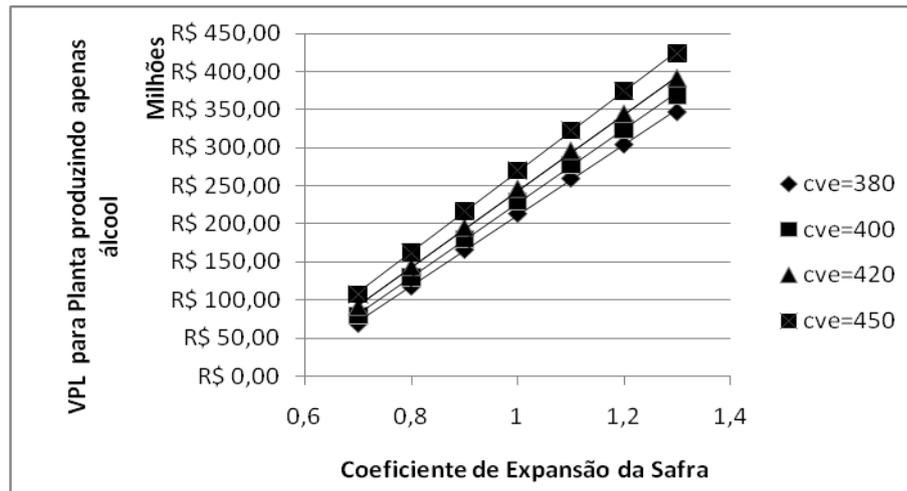


Figura 5. 12 Gráfico do VPL em função do coeficiente de expansão da safra.

Como já havia sido visto também em Oliveira, Silva e Magnani (2009), os parâmetros financeiros, TIR e o VPL, apresentam a mesma tendência. Logo, para este caso, se fosse necessária uma rápida análise financeira, com apenas dos fatores poderia ser tomada a decisão de investimento. Porém como já foi dito neste capítulo, ambos os parâmetros tem relevância na análise financeira do projeto.

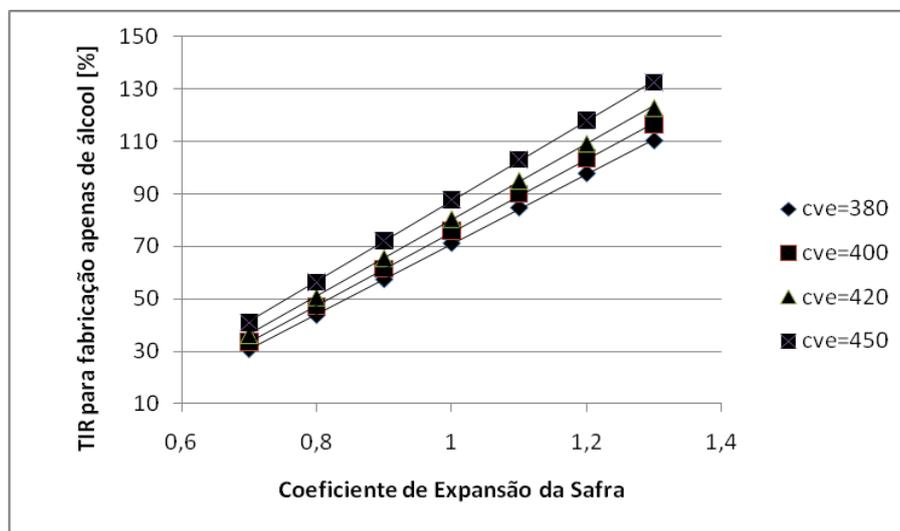
Na figura 5. 13 é mostrado como o VPL varia com a safra, produzindo apenas álcool. Como o álcool apresenta um menor consumo de vapor para sua produção do que o açúcar, segundo Castro e Andrade (2006), para uma mesma vazão de vapor disponível na usina pode-se produzir mais álcool, e assim aumentar o VPL com a venda de mais álcool. É preciso salientar que esta análise foi feita com preços constantes. Foi feita a média dos valores de venda de álcool e açúcar disponíveis no site da UNICA (União da Indústria de Cana de Açúcar).

Além de analisar a produção apenas de álcool ou apenas de açúcar, também foi feita outra análise onde o preço do açúcar foi variado, para descobrir qual o valor do preço do açúcar onde o VPL da produção apenas de álcool se igualasse a produção apenas de açúcar. Para valores próximos de R\$ 51 pelo saco de açúcar, os valores dos VPL's tanto para produção apenas de açúcar quanto de álcool eram semelhantes.



**Figura 5. 13 Gráfico VPL para planta produzindo apenas álcool versus CES**

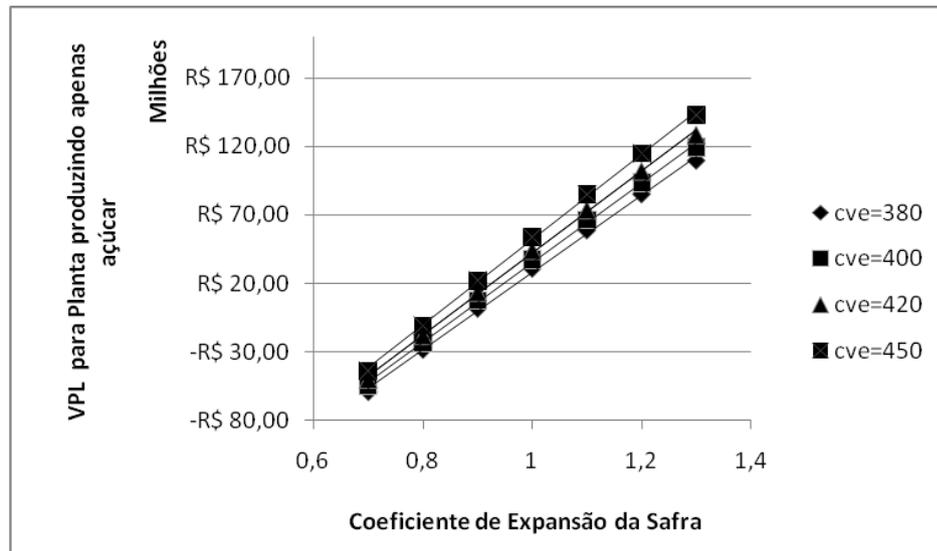
Porém, o preço nunca atingiu tal valor nos últimos anos. O valor mais alto atingido foi de R\$ 40,00, em agosto de 2006. Dessa forma, só seria interessante a fabricação apenas de açúcar caso houvesse uma significativa queda no valor de venda do álcool ou aumento nos preços do saco de açúcar. É necessário, para a tomada de decisão correta, um estudo da produção de álcool e açúcar em função dos valores de venda, para a maximização dos lucros do empreendimento. Assim é possível saber qual a dosagem ideal para o mix de álcool e açúcar.



**Figura 5. 14 Gráfico TIR para planta produzindo apenas álcool versus CES**

A figura 5. 14 mostra os valores da TIR para produção apenas de álcool na planta. Como pode ser visto, os valores de maior safra apresentam as maiores taxas de retorno. Através desse gráfico pode-se observar o comportamento similar da TIR e VPL.

A figura 5. 15 mostra os valores do VPL para produção exclusiva de açúcar comparando com a figura 5. 13, que os motra o VPL para produção exclusiva de álcool, os valores encontrados na figura 5. 15 são mais baixos do que na figura 5. 13, indicando que para essas circunstâncias, seria mais atrativo economicamente a produção apenas de álcool.



**Figura 5. 15 Gráfico VPL para planta produzindo apenas açúcar versus CES**

Depois de feitos estudos separadamente de análise financeira e energética, foi feito um estudo comparativo entre o fator de utilização de energia e o VPL, para tentar descobrir se há alguma conexão entre estes parâmetros. Foi observado que há diferenças entre as linhas de tendências para os mesmos casos. Ou seja, a análise deste parâmetro técnico (FUE) não representa bem o lado econômico do análise. Se a planta fosse avaliada financeiramente pelo fator de utilização de energia, poderia se obter resultados errados. Isso pode ser observada no gráfico apresentado na figura 5. 16. O FUE permanece constante enquanto o VPL é crescente.

As condições técnicas utilizadas na figura 5. 16 são as mesmas da figura 5. 17, mas observa-se no eixo secundário do gráfico o rendimento elétrico global da planta. Na figura, os dois parâmetros analisados apresentam uma tendência crescente com o aumento da safra, mas no caso do rendimento global nota-se uma tendência a estabilização. Enquanto o VPL é sempre crescente.

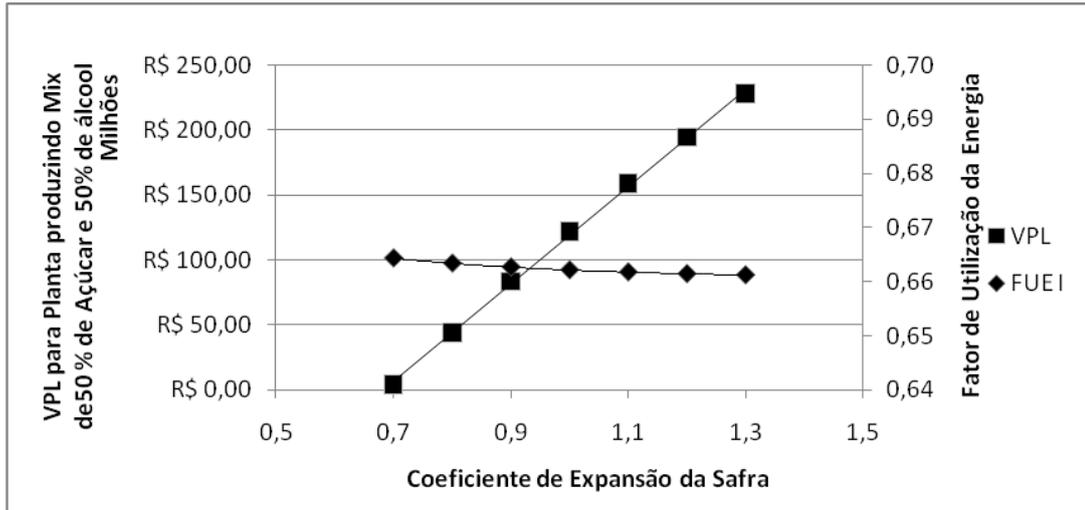


Figura 5. 16 Gráfico do VPL e fator de utilização de energia em função do CES

Se for observado do ponto de vista do fator econômico e o fator de utilização de energia, as figuras mostram que os seus comportamentos são diferentes, na figura 5. 17 o rendimento elétrico mostra um comportamento mais parecido com os parâmetros econômicos do que o fator de utilização de energia. A diferença entre os modelos sugere a necessidade dos três tipos de análise para esses casos.

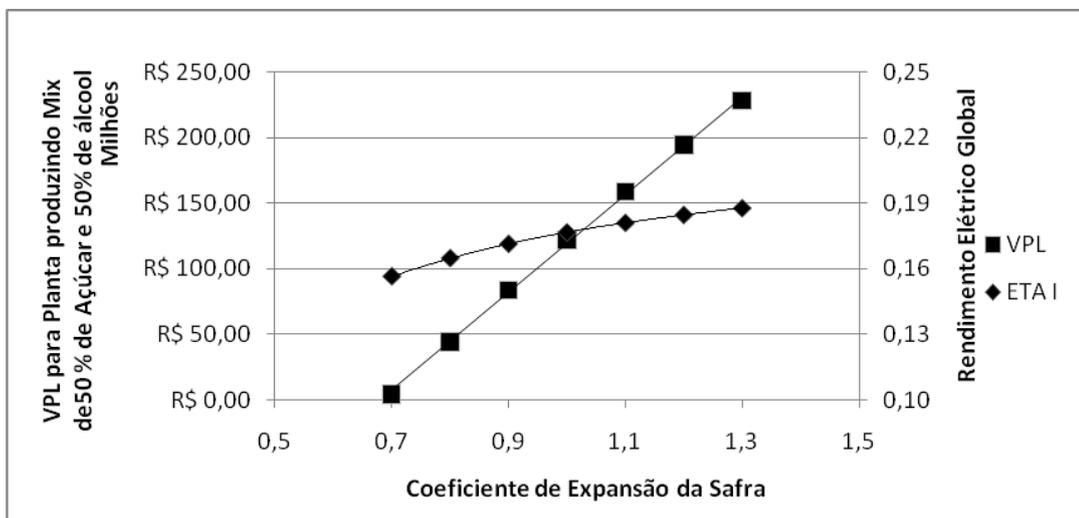


Figura 5. 17 Gráfico do VPL e rendimento elétrico global em função do CES

Neste capítulo pode ser observada a importância de alguns parâmetros tais como, cargas na moagem, nas turbinas, a quantidade de vapor consumida pela fábrica de álcool e açúcar e também a safra, para uma planta de usina de cana de açúcar e foram analisados os impactos da variação dos mesmos no seu desempenho, bem como discutidos os resultados encontrados.

## 6. Conclusões e Sugestões

### 6.1 Considerações finais

A primeira conclusão que pode ser tirada é que tanto os rendimentos energéticos e exergéticos revelam o mesmo comportamento, qualitativamente falando. O mesmo fenômeno ocorre com os fatores de utilização de energia e de exergia, tanto para o primeiro estudo (variação de cargas elétrica e térmica), quanto no segundo estudo, (variação da safra e do consumo de vapor da usina). Através desta conclusão pode-se perceber que ao invés de analisar quatro índices diferentes (rendimento energético, rendimento exergético, fator de utilização de energia, fator de utilização de exergia), esta mesma análise poderia ter sido feita com apenas dois parâmetros, um rendimento e um fator de utilização. Isto é interessante para o caso de futuras análises de plantas similares, com faixa de operação próxima a 70MW e que funcione segundo ciclo rankine, onde pode ser poupado tempo de análise.

Os parâmetros econômicos VPL e a TIR também apresentam comportamentos similares entre si. Embora possuam comportamentos similares, é importante na segunda etapa financeira dos estudos conhecerem os valores dos dois índices. Pois, o VPL traz valores absolutos em R\$ do lucro do investimento, e a TIR traz o valor percentual desse lucro. Ambas as análises são importantes para o estudo.

No primeiro estudo, onde foi estudada a variação das cargas, o caso que apresentou o melhor fator de utilização de energia foi o caso base (70MW de potência nominal), aproximadamente 74%. Já no segundo estudo, onde foi estudada a variação da safra e do consumo de vapor, o melhor foi o caso 28, onde o consumo de vapor da fábrica é 450 kgv/tc e o coeficiente de expansão da safra é 0,7, com aproximadamente 73%.

O melhor rendimento energético no segundo estudo é 19%. Este caso possui  $CVE=380$  e  $CES = 1,3$ .

Conclui-se que há robustez da planta, mas só até certo ponto. É necessário avaliar uma faixa mais abrangente de casos para garantir que a condição nominal é a condição ótima.

O VPL e a TIR variam quase linearmente com o aumento da produção de cana de açúcar. Quanto maior a quantidade de cana disponível para a usina, maior a produção de energia elétrica, álcool e açúcar.

O aumento do consumo específico da fábrica diminui a potência elétrica total gerada da planta, para uma mesma quantidade de cana disponível para moagem. Pois, há redução do vapor fornecido a turbina de condensação, que é desviado para a turbina de contrapressão para atender o aumento da demanda do processo quando há aumento do consumo da fábrica.

O rendimento elétrico aumenta com a quantidade de cana moída e diminui com o aumento do consumo da fábrica, como já havia sido dito o aumento da safra eleva a quantidade de combustível disponível podendo-se gerar mais vapor para as turbinas e o aumento do consumo específico desvia o fluxo de vapor para a turbina de contrapressão, que gera menos energia devido a pressão de saída ser mais elevada do que na turbina de condensação.

O aumento da produção de cana não altera o valor do fator de utilização de energia ou de exergia, isso ocorre, pois a razão entre as massas de vapor para o processo e para geração de energia permanece constante. O fator de utilização de energia é função das vazões e do estado energético de cada ponto, como as temperaturas e pressões não foram alteradas em nenhum dos estudos, o que pode alterar o valor deste índice é a razão entre as massas destinadas ao processo e turbina de condensação, se esta razão for mantida constante o fator de utilização também permanece constante.

Levando em consideração o atual preço de venda médio por litro de álcool, seria mais interessante do ponto de visto financeiro, fabricar apenas álcool, devido ao baixo valor do VPL apresentado com a venda apenas de açúcar. Porém, houve uma grande flutuação de preço ao longo dos anos, o ideal seria uma análise financeira na hora da fabricação, recebendo as informações de preço e cotações, para saber qual seria a melhor opção de fabricação naquele determinado momento.

Observando comparativamente o comportamento dos índices de análise da técnica da planta, o rendimento e o fator de utilização. Buscando observar se algum desses índices poderia apresentar características similares aos índices de análise financeira, o rendimento apresenta uma tendência mais compatível com o VPL. Porém, não revela grande semelhança, portanto assim, as duas análises são necessárias para o bom entendimento da planta como um todo.

## 6.2 Sugestões

A seguir são apresentadas as sugestões para trabalhos futuros.

- Implementar um sistema para geração dos casos estudados;
- Utilizar o método do Algoritmo Genético como ferramenta de otimização;
- Integrar o programa com estudos de custos de sistemas térmicos;
- Utilizar na análise financeira inflação e *Payback* Acumulado;
- Implementar uma métrica de sustentabilidade da planta;

## REFERÊNCIAS

- Accadia, M. D., Optimal operation of a complex thermal system: a case study. *International Journal of Refrigeration* 24 (2001) 290-301.
- Aljundi, I. H., Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan. *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 324–328.
- Balarine, O. F. O., “Tópicos de Matemática Financeira e Engenharia Econômica”, Editora: EdiPucrs, 2ª Edição, 2004.
- Banerjee, R. e Ram, J. R., Energy and cogeneration targeting for a sugar factory. *Applied Thermal Engineering* 23 (2003) 1567–1575.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G. and Moran, M. “Thermal Design and Optimization” book. Editora: JOHN WILEY PROFESSIO, 1ª Edição – 1995.
- Bocci, E., Di Carlo, A. e Marcelo, D., Power plant perspectives for sugarcane Mills. *Energy* 34 (2009) 689–698.
- Caliskan, H. e Hepbasli, A., Energy and exergy prices of various energy sources along with their CO<sub>2</sub> equivalents. *Energy Policy* 38 (2010) 3468 -3481.
- Cardona, E. e Piacentino, A., A methodology for Sizing a trigeneration plant in mediterranean áreas. *Applied Thermal Engineering* 23 (2003) 1665-1680.
- Carraretto, C. e Lazzaretto, A., A dynamic approach for the optimal electricity dispatch in the deregulated market. *Energy* 29 (2004) 2273-2287
- Cortés, E. e Rivera, W., Exergetic and exergoeconomic optimization of a cogeneration pulp and paper Mill plant including the use of a heat transformer. *Energy* 35 (2010) 1289–1299.
- Ferreira, R. G., “Matemática Financeira Aplicada”, Editora: Ed. Universitária da UFPE, 5ª Edição – 2000.
- Fiaschi, D. e Manfrida, G., EXERGY ANALYSIS OF THE SEMI-CLOSED GAS TURBINE COMBINED CYCLE (SCGT/CC). *Energy Convers. Mgmt Vol. 39, No. 16±18, pp. 1643±1652, 1998.*
- Gamou, S., Yokoyama, R. e Ito, K., Optimal unit sizing of cogeneration systems in consideration of uncertain energy demands as continuous random variables. *Energy Conversion and Management* 43 (2002) 1349–1361.
- Ganguly, R., Ray, T. K., Datta, A. e Gupta, A., Exergy-based performance analysis for proper O&M decisions in a steam power plant. *Energy Conversion and Management* 51 (2010) 1333–1344.
- Garcia, R. “Combustíveis e Combustão Industrial”, Editora: Interciência, 1ª Edição, 2002.
- Gharagheizi, F. e Mehdi, M., Prediction of standard chemical exergy by a three descriptors QSPR model. *Energy Conversion and Management* 48 (2007) 2453-2460.
- Gutiérrez, A. S. e Vandecasteele, C., Exergy-based indicator to evaluate the possibilities to reduce fuel consumption in lime production. *Energy* 36 (2011) 2820 – 2827.
- Ho, J. C., Chua, K.J. e Chou, S.K., Performance study of a microturbine system for cogeneration application. *Renewable Energy* 29 (2004) 1121-1133.

- Kamate, S.C. e Gangavati, P.B., Exergy analysis of cogeneration power plants in sugar industries. *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 1187–1194.
- Khan, K. H., Rasul, M.G. e Khan, M.M.K., Energy Conservation in buildings: Cogeneration and cogeneration coupled with thermal-energy storage. *Applied Energy* 77 (2004) 15-34.
- Knight, R., Linder, U., Markworth, N. e Perz, E., Thermo-economic optimization of whole gas turbine plant (GTPOM). *Applied Thermal Engineering* 24 (2004) 1725–1733.
- Kotas, T. J., “ The exergy Method of Thermal Plant Analysis”, Editora: Krieger Publish Company, 2ª Edição, 1995.
- Lobo, P.C. , Jaguaribe, E.F., Rodrigues, J. e Da Rocha, F.A.A., Economics of alternative sugar cane milling options. *Applied Thermal Engineering* 27 (2007) 1405–1413.
- Lora, E.E.S., e Nascimento, M.A.R., “ Geração Termoelétrica: Planejamento, Projeto e Operação”, Editora Interciência, Volume 1, 1ª Edição. 2004.
- Lora, E.S. e Andrade, R. V., Biomass as energy source in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 777–788.
- Magnani, F. S. e Melo, N. R., Use of the task configuration system (TCS) for the design and on-line optimization of power plants operating with variable loads. *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 455–461.
- Manolas, D. A., Frangopoulos, C. A., Gialamas, T. P. e Tsahalis, D. T., Operation Optimization of an industrial cogeneration system by a genetic Algorithm. *Energy Convers. Mgmt Vol* 38, No. 15-17, pp. 1625-1636, 1997.
- Marrero, I.O., Lefsafer, A.M., Razani, A. e Kim, K.J., Segundo Law analysis and optimization of a combined triple Power cycle. *Energy Conversion and Management* 43 (2002) 557 – 573.
- MME, “Balanço Energético Nacional 2009”, Secretaria de Energia, Ministério de Minas e Energia, 2009. Retirado da Página do Ministério de Minas e Energia: <http://www.mme.gov.br>.
- Moran, M.J. e Shapiro, H.N., “Fundamentals of Engineering Thermodynamics”, Editora: John Wiley & Sons, 5ª Edição, 2006.
- Nebra, S. A., Del Campo, E. R. B. e Cerqueira, S. A. A. G., THERMOECONOMIC ANALYSIS OF A CUBAN SUGAR CANE MILL. *Energy Convers. Mgmt Vol.* 39, No. 16±18, pp. 1773±1780, 1998.
- Oliveira, G.L.B., Silva, H.C.N., Magnani, F.S., Carvalho, J.M. e Carvalho, L.H., TECHNICAL AND FINANCIAL OPTIMIZATION OF A COGENERATION PLANT IN A SUGAR AND ALCOHOL PLANT WORKING WITH VARIABLES LOADS. *Anais do 20th International Congress of Mechanical Engineering*.
- Reddy, B.V., Ramkiran, G., Kumar, K.A. e Nag, P.K., Second law analysis of a waste heat recovery steam generator. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45 (2002) 1807 – 1814.
- Restuti, D. e Michaelowa, A., The economic potential of bagasse cogeneration as CDM projects in Indonesia. *Energy Policy* 35 (2007) 3952–3966.
- Rian, A. B. e Ertesvag, I. S., Exergy analysis of a steam production and distribution system including alternatives to throttling and the single pressure steam production. *Energy Conversion and Management* 52 (2011) 703 -712.

- Serra, L. M., Ensinas, A. V. , Nebra, S. A. e Lozano, M. A., Analysis of process steam demand reduction and electricity generation in sugar and ethanol production from sugarcane. *Energy Conversion and Management* 48 (2007) 2978–2987.
- Szargut, J., Morris, D.R., Stewart, F.R., 1988. *Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes*. Hemisphere, Edwards Brothers Inc., New York, USA, ISBN: 0891165746.
- Szko, A. S. e Tolmasquim, M. T., Analysis of Brazil’s cogeneration legal framework. *Energy Conversion and Management* 44 (2003) 369–380.
- Torres, O. F. F., “Fundamentos da Engenharia Econômica e da Análise Econômica de Projetos”, Editora: Thomson Learnig, 1ª Edição, 2006.
- Van Wylen, G.J., Sonntag, R.E. e Borgnakke, C., “ Fundamentos da Termodinâmica”, Editora Edgar Blücher, 6ª Edição, 2003.
- Vieira, L.S., Donatelli, J.L. e Cruz, M. E., Integration of an iterative methodology for exergoeconomic improvement of thermal systems with a process Simulator. *Energy Conversion and Management* 45 (2004) 2495–2523.
- Wschhusen, St. e Schmitz, G., Transient Simulation as an economical analysis method for energy supply systems for buildings or industry. *Applied Thermal Engineering* 24 (2004) 2157 – 2170.

## Apêndice A

Este apêndice contém as equações utilizadas para os cálculos das propriedades termodinâmicas, balanços mássicos e energéticos, bem como os índices de avaliação técnica e financeira da planta.

Na figura 4. 2 está representada a planta de forma esquemática. A numeração na figura serve como indicação para as equações apresentadas a seguir.

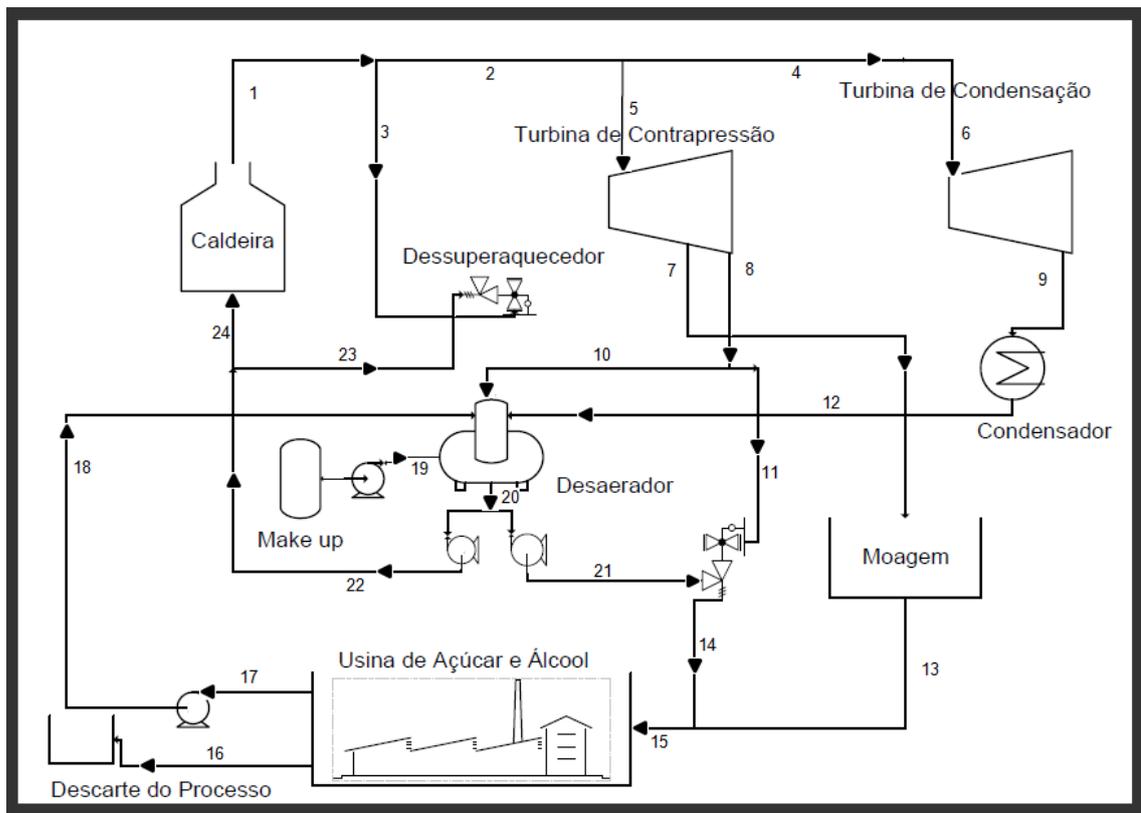


Figura 4. 2 Figura esquemática resumida da planta

Primeiramente foram estabelecidos os estados de cada ponto indicado na figura. Na tabela 4. 2 são apresentados alguns valores fixos para título, temperaturas e pressões da planta, os outros valores foram calculados a partir destes valores pré-estabelecidos em projeto. As equações abaixo mostram como foram encontradas as propriedades.

$$T_i = T_1 - dT_1, \text{ para } 2 < i < 6 \quad (\text{A.1})$$

Onde:

$T_1$  é a temperatura do vapor na saída da caldeira

$dT_1$  é a queda de temperatura do vapor ao longo da tubulação

$T_i$  é a temperatura do vapor no ponto i.

$$P_i = P_1 - dp_1, \text{ para } 3 < i < 6 \quad (\text{A.2})$$

Onde:

$P_1$  é a pressão do vapor na saída da caldeira

$dp_1$  é a queda de pressão do vapor ao longo da tubulação

$P_i$  é a pressão do vapor no ponto i.

$$T_{12} = T_9 + dT_{12} \quad (\text{A.3})$$

Onde:

$T_{12}$  é a temperatura da água na saída do condensador.

$dT_{12}$  é a queda de temperatura no condensador

$T_9$  é a temperatura de entrada do vapor no condensador.

$$T_{11} = T_{10} \quad (\text{A.4})$$

$$P_{11} = P_{10} \quad (\text{A.5})$$

$$T_i = T_{13}, \text{ para } 14 < i < 17 \quad (\text{A.6})$$

Onde:

$T_{13}$  é a temperatura do vapor na saída da moenda (valor estabelecido em projeto).

$T_i$  é a temperatura do vapor no ponto i.

$$P_i = P_{13}, \text{ para } 14 < i < 17 \quad (\text{A.7})$$

Onde:

$T_{13}$  é a pressão do vapor na saída da moenda (valor estabelecido em projeto).

$T_i$  é a pressão do vapor no ponto i.

$$T_i = T_{21}, \text{ para } 22 < i < 24 \quad (\text{A.8})$$

$$P_i = P_{21}, \text{ para } 22 < i < 24 \quad (\text{A.9})$$

$$X_i = X_{13}, \text{ para } 14 < i < 15 \quad (\text{A.10})$$

Onde:

$X_{13}$  é o título do vapor no ponto 13 (valor estabelecido em projeto).

$$X_{16} = X_{17} \quad (\text{A.11})$$

A partir das temperaturas, pressões e títulos foram usadas funções internas do EES para calcular entalpias e entropias, além de algumas temperaturas. Nessas funções são indicados a propriedade que se deseja conhecer, o fluido e outras duas propriedades conhecidas. Por exemplo, A.14, deseja-se conhecer a entalpia da água, sendo informados temperatura e pressão.

$$h_i = \text{enthalpy}(\text{water}; T=T_i; P=P_i), \text{ para } 0 < i < 14 \text{ e } 18 < i < 25 \quad (\text{A.12})$$

$$h_i = \text{enthalpy}(\text{water}; X=X_i; P=P_i), \text{ para } 15 < i < 17 \quad (\text{A.13})$$

$$s_i = \text{entropy}(\text{water}; T=T_i; P=P_i), \text{ para } 0 < i < 14 \text{ e } 18 < i < 25 \quad (\text{A.14})$$

$$s_i = \text{entropy}(\text{water}; X=X_i; P=P_i), \text{ para } 15 < i < 17 \quad (\text{A.15})$$

$$T_i = \text{temperature}(\text{water}; X=X_i; P=P_i), \text{ para } 15 < i < 18 \quad (\text{A.16})$$

Depois de calculados os estados, foram feitos os balanços mássicos nos equipamentos.

- Balanço mássico na caldeira:

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_{25} = \dot{m}_{24} \quad (\text{A.17})$$

$$\dot{m}_{25} = 0,025 \times \dot{m}_1 \quad (\text{A.18})$$

Onde:

0,025 representa o percentual definido em projeto da descarga de fundo da caldeira.

- Balanço na primeira separação depois da caldeira:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (\text{A.19})$$

- Balanço na segunda separação depois da caldeira:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_4 + \dot{m}_5 \quad (\text{A.20})$$

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_4 \quad (\text{A.21})$$

- Balanço no separador antes da caldeira:

$$\dot{m}_{22} = \dot{m}_{24} + \dot{m}_{23} \quad (\text{A.22})$$

- Balanço mássico na turbina de contrapressão:

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_7 + \dot{m}_8 \quad (\text{A.23})$$

- Balanço mássico no separador após a turbina de contrapressão:

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_{10} + \dot{m}_{11} \quad (\text{A.24})$$

- Balanço mássico na turbina de condensação:

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_9 \quad (\text{A.25})$$

- Balanço mássico no condensador:

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{12} \quad (\text{A.26})$$

- Balanço mássico na moenda:

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_{13} \quad (\text{A.27})$$

- Balanço mássico no desaerador:

$$\dot{m}_{18} + \dot{m}_{12} + \dot{m}_{19} + \dot{m}_{10} = \dot{m}_{22} + \dot{m}_{21} \quad (\text{A.28})$$

- Balanço mássico no dessuperaquecedor antes do processo:

$$\dot{m}_{11} + \dot{m}_{21} = \dot{m}_{14} \quad (\text{A.29})$$

- Balanço mássico no misturador antes do processo:

$$\dot{m}_{14} + \dot{m}_{13} = \dot{m}_{15} \quad (\text{A.30})$$

- Balanço mássico do processo:

$$\dot{m}_{17} + \dot{m}_{16} = \dot{m}_{15} \quad (\text{A.31})$$

$$\dot{m}_{17} = \dot{m}_{18} \quad (\text{A.32})$$

- Balanço mássico no separador antes da caldeira:

$$\dot{m}_{24} + \dot{m}_{23} = \dot{m}_{22} \quad (\text{A.33})$$

- Balanço mássico da água de reposição (*make up*):

$$\dot{m}_{25} + \dot{m}_{16} = \dot{m}_{19} \quad (\text{A.34})$$

- Balanço mássico no dessuperaquecedor de selagem e ejetores:

$$\dot{m}_{23} + \dot{m}_3 = \dot{m}_{selagem} + \dot{m}_{ejetores} \quad (\text{A.35})$$

Todas essas massas estão expressas em kg/s. Porém no projeto da planta as informações estavam em t/h, então os balanços também estão expressos nesta unidade através da seguinte variável:

$$\dot{V}_i = 3,6 \times \dot{m}_i, \text{ para todo } i. \quad (\text{A.36})$$

Onde:

$\dot{V}_i$  é a vazão mássica em t/h

$\dot{m}_i$  é a vazão mássica em kg/s

3,6 é o fator de conversão.

$$Moagem_{horária} = \frac{CES \times Moagem_{anual}}{t_{operação}} \quad (A.37)$$

Onde:

$Moagem_{anual}$  é o valor em toneladas de cana moídas por ano

$t_{operação}$  é tempo de operação da usina durante um ano.

CES é o coeficiente de expansão de safra adimensional.

$$\dot{V}_{vapor,processo} = \frac{CVU \times Moagem_{horaria}}{1000} \quad (A.38)$$

Onde:

$\dot{V}_{vapor,processo}$  é a vazão de vapor máxima disponível para o processo

CVU é o consumo de vapor da usina em kgv/tc.

1000 é o fator de conversão para toneladas

$$\dot{V}_{14} = \dot{V}_{vapor,processo} \quad (A.39)$$

Onde:

$\dot{V}_{14}$  é a vazão de vapor na entrada do processo.

$$\dot{V}_{disponivelcomb} = Moagem_{horaria} \times (\%bagaço) \quad (A.40)$$

Onde:

(%bagaço) é a porcentagem de bagaço na cana.

Os balanços energéticos feitos estão representados nas equações abaixo:

- Caldeira:

$$\dot{Q}_{caldeira} = \dot{m}_{comb} \times PCI_{comb} \times \eta_{caldeira} \quad (A.41)$$

Onde:

$\eta_{caldeira}$  é o rendimento da caldeira

$PCI_{comb}$  é o poder calorífico inferior do combustível em kJ/kg

$\dot{m}_{comb}$  é a vazão mássica de combustível em kg/s

$$\eta_{caldeira} = (1,32 \times 10^{-3}) \times \dot{V}_1 + 88,60 \quad (\text{A.42})$$

Onde:

$\dot{V}_1$  é a vazão na saída da caldeira.

$1,32 \times 10^{-3}$  é o valor encontrado na interpolação dos pontos de trabalho da caldeira

$88,60$  é o valor encontrado na interpolação dos pontos de trabalho da caldeira

$$\dot{Q}_{caldeira} = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_{25} h_{25} - \dot{m}_{24} h_{24} \quad (\text{A.43})$$

-Dessuperaquecedor para ejetores e selagem:

$$\dot{m}_{ejetores} h_{ejetores} + \dot{m}_{selagem} h_{selagem} = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{23} h_{23} \quad (\text{A.44})$$

-Desaerador:

$$\dot{m}_{18} h_{18} + \dot{m}_{12} h_{12} + \dot{m}_{19} h_{19} + \dot{m}_{10} h_{10} = \dot{m}_{22} h_{22} + \dot{m}_{21} h_{21} \quad (\text{A.45})$$

-Turbina de Contrapressão:

$$\dot{W}_{contra} = \eta_{redutor} \cdot \eta_{turbina-contra} \cdot (\dot{m}_5 \cdot h_5 - \dot{m}_8 \cdot h_8 - \dot{m}_7 \cdot h_7) \quad (\text{A.46})$$

Onde:

$\dot{W}_{contra}$  é a potência gerada pela turbina de contrapressão.

$\eta_{redutor}$  é o rendimento do redutor.

$\eta_{turbina-contra}$  é o rendimento da turbina de contrapressão.

- Turbina de Condensação:

$$\dot{W}_{cond} = \eta_{redutor} \cdot \eta_{turbina-cond} \cdot (\dot{m}_6 \cdot h_6 - \dot{m}_9 \cdot h_9) \quad (\text{A.47})$$

Onde:

$\dot{W}_{cond}$  é a potência gerada pela turbina de condensação.

-Processo:

$$\dot{Q}_{processo} = (\dot{m}_{15} \cdot h_{15} - \dot{m}_{17} \cdot h_{17} - \dot{m}_{16} \cdot h_{16}) \quad (\text{A.48})$$

Onde

$\dot{Q}_{processo}$  é o calor utilizado no processo de fabricação de açúcar e álcool

- Moagem:

$$\dot{W}_{\text{moagem}} = (\dot{m}_7 \cdot h_7 - \dot{m}_{13} \cdot h_{13}) \quad (\text{A.49})$$

Onde:

$\dot{W}_{\text{moagem}}$  é a potência consumida pelas turbinas da moenda.

- Geração:

$$\dot{W}_{\text{total}} = \dot{W}_{\text{cond}} + \dot{W}_{\text{contra}} \quad (\text{A.50})$$

$\dot{W}_{\text{cond}}$  é a potência gerada pela turbina de condensação.

$\dot{W}_{\text{contra}}$  é a potência gerada pela turbina de contrapressão.

$\dot{W}_{\text{total}}$  é a potência total gerada na usina.

O próximo passo foi calcular a exergia de cada ponto, bem como a exergia química do combustível. Assim seria possível calcular os rendimentos exergéticos e irreversibilidades da planta. O estado morto adotado foi de temperatura 25°C e pressão 1atm.

$$ex_i = (h_i - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_i - s_0) \quad (\text{A.51})$$

Onde:

$ex_i$  é a exergia física específica

$h_0$  é a entalpia do estado morto

$s_0$  é a entropia do estado morto

$T_0$  é a temperatura do estado morto

$$Ex_i = \dot{m}_i ex_i \quad (\text{A.52})$$

$$\varphi_{dry} = \frac{\left(1,0438 + 0,1882 \cdot \frac{h}{\text{car}}\right) - 0,2509 \cdot \left(1 + 0,7256 \cdot \frac{h}{\text{car}}\right) + 0,0383 \cdot \left(\frac{n}{\text{car}}\right)}{\left(1 - 0,3035 \cdot \frac{o}{\text{car}}\right)} \quad (\text{A.53})$$

Onde:

$h$  é a concentração de hidrogênio no combustível

$n$  é a concentração de nitrogênio no combustível

o é a concentração de oxigênio no combustível  
 car é a concentração de carbono no combustível

$$h_{fg} = \text{enthalpy}(\text{water}; T=T_0; X=1) \quad (\text{A.54})$$

Onde:

$h_{fg}$  é a entalpia da água contida no combustível.

$$\text{energia}_{\text{agua}} = (w/100) \cdot h_{fg} \quad (\text{A.55})$$

Onde:

w é a porcentagem de umidade no combustível.

$\text{energia}_{\text{água}}$  é a energia da água contida no combustível.

$$PSI_{comb} = \varphi_{dry} (PCI_{comb} + (w/100) \cdot h_{fg}) \quad (\text{A.58})$$

$$\dot{E}x_{comb} = \frac{(PSI_{comb} \cdot \dot{V}_{utilizado-comb})}{3,6} \quad (\text{A.60})$$

Calculadas as exergias, a seguir são apresentadas as equações de irreversibilidade, rendimento e FUE dos principais equipamentos e da planta:

$$\dot{I}_{caldeira} = \dot{E}x_{fuel} + \dot{E}x_{24} - \dot{E}x_{25} - \dot{E}x_1 \quad (\text{A.61})$$

$$\dot{I}_{turbina} = \dot{E}x_5 - \dot{E}x_8 - \dot{E}x_7 - \dot{W}_{contra} \quad (\text{A.62})$$

$$\dot{I}_{turbina2} = \dot{E}x_6 - \dot{E}x_9 - \dot{W}_{cond} \quad (\text{A.63})$$

$$\dot{I}_{turbina\text{total}} = \dot{I}_{turbina} + \dot{I}_{turbina2} \quad (\text{A.64})$$

$$\dot{I}_{condensador} = \dot{E}x_9 - \dot{E}x_{12} - \dot{E}x_{out} + \dot{E}x_{in} - \dot{W}_{fan} \quad (\text{A.65})$$

$$\dot{I}_{desaerador} = \dot{E}x_{19} + \dot{E}x_{10} + \dot{E}x_{12} + \dot{E}x_{18} - \dot{E}x_{22} - \dot{E}x_{21} \quad (\text{A.66})$$

$$\dot{I}_{processo} = \dot{E}x_{15} - \dot{E}x_{17} - \dot{E}x_{16} \quad (\text{A.67})$$

$$\dot{I}_{ciclo} = \dot{I}_{turbina-total} + \dot{I}_{condensador} + \dot{I}_{caldeira} + \dot{I}_{desaerador} \quad (\text{A.68})$$

$$\eta_{II-caldeira} = \frac{\dot{E}x_{25} + \dot{E}x_1 - \dot{E}x_{24}}{\dot{E}x_{comb}} \quad (\text{A.69})$$

$$\eta_{II-turbinas} = 1 - \frac{\dot{I}_{turbina-total}}{\dot{E}x_5 - \dot{E}x_7 - \dot{E}x_8} \quad (\text{A.70})$$

$$\eta_{II-condensador} = \frac{\dot{E}x_{out} - \dot{E}x_{in}}{\dot{E}x_9 - \dot{E}x_{12}} \quad (\text{A.71})$$

$$\eta_{II-ciclo} = \frac{\dot{W}_{total}}{\dot{E}x_{comb}} \quad (\text{A.72})$$

$$FUE_{II-ciclo} = \frac{\dot{W}_{total} + \dot{m}_6(h_6 - h_{10}) + \dot{m}_{14}(h_{14} - h_{15})}{\dot{E}x_{comb}} \quad (\text{A.73})$$

$$\eta_{ciclo} = \frac{\dot{W}_{total}}{PCI_{comb} \cdot \left( \frac{\dot{V}_{disponivelcomb}}{3,6} \right)} \quad (\text{A.74})$$

$$FUE_{I-ciclo} = \frac{\dot{W}_{total} + \dot{m}_6(h_6 - h_{10}) + \dot{m}_{14}(h_{14} - h_{15})}{PCI_{comb} \cdot \left( \frac{\dot{V}_{disponivelcomb}}{3,6} \right)} \quad (\text{A.75})$$

Depois de calcular os parâmetros de avaliação técnica, foi feita a parte financeira do estudo. Inicialmente foram calculados os custos totais da usina e suas possíveis receitas

$$\dot{W}_{central} = c \arg a_1 \cdot \dot{W}_{contra} + c \arg a_2 \cdot \dot{W}_{cond} \quad (\text{A.76})$$

$$I_{inicial} = (C_{caldeira} + C_{turbinas}) \cdot 5 \quad (\text{A.77})$$

$$V_{emprestimo} = P_e \cdot I_{inicial} \quad (\text{A.79})$$

$$V_{\text{parcela}} = \frac{V_{\text{emprestimo}}}{t_{\text{amort}}} \quad (\text{A.80})$$

As equações de custos nas usinas foram obtidas através da interpolação de dados de empresa de projetos.

$$C_{\text{manutencao}} = K_1 \times \left(1,5^{\left(\frac{\dot{W}_{\text{central}} - 10000}{20000}\right)}\right) \quad (\text{A.81})$$

$$C_{\text{seguro}} = K_2 \times \left(3^{\left(\frac{\dot{W}_{\text{central}} - 10000}{20000}\right)}\right) \quad (\text{A.82})$$

$$C_{\text{quimica}} = K_3 \times \left(1,5^{\left(\frac{\dot{W}_{\text{central}} - 10000}{20000}\right)}\right) \quad (\text{A.83})$$

$$C_{\text{salarios}} = K_4 \times \left(1,2^{\left(\frac{\dot{W}_{\text{central}} - 10000}{20000}\right)}\right) \quad (\text{A.84})$$

$$C_{\text{alimentacao}} = K_5 \times \left(1,4^{\left(\frac{\dot{W}_{\text{central}} - 10000}{20000}\right)}\right) \quad (\text{A.85})$$

$$C_{\text{tm-as-pessoal}} = K_6 \times \left(1,4^{\left(\frac{\dot{W}_{\text{central}} - 10000}{20000}\right)}\right) \quad (\text{A.86})$$

$$C_{\text{aneel}} = K_7 \times \left(2,5^{\left(\frac{\dot{W}_{\text{central}} - 10000}{20000}\right)}\right) \quad (\text{A.87})$$

**Tabela A. 1 Valores obtidos da interpolação.**

<b>Dado</b>	<b>Valor</b>
K <sub>1</sub>	720000
K <sub>2</sub>	153516
K <sub>3</sub>	300000
K <sub>4</sub>	688800
K <sub>5</sub>	52800
K <sub>6</sub>	157920
K <sub>7</sub>	30384

$$C_{\text{imp}} = 0,1 \times R_{\text{energia-exp}} \quad (\text{A.88})$$

Onde,

0,1 é o percentual de imposto por recebimento.

$$\dot{V}_{\text{bagaco}} = \dot{V}_{\text{utilizado-comb}} \times t_{\text{operacao}} \quad (\text{A.89})$$

$$C_{\text{comb}} = C_{\text{usto}_{\text{comb}}} \times \dot{V}_{\text{bagaco}} \quad (\text{A.90})$$

$$C_{\text{op}} = C_{\text{aneel}} + C_{\text{trans-pessoal}} + C_{\text{alimentacao}} + C_{\text{salario}} + C_{\text{quimica}} \quad (\text{A.91})$$

$$C_{\text{total-variavel}} = C_{\text{comb}} + C_{\text{op}} + C_{\text{manutencao}} + C_{\text{seguro}} + C_{\text{imposto}} \quad (\text{A.92})$$

$$C_{\text{total-fixa}} = C_{\text{ad min}} \quad (\text{A.93})$$

$$C_{\text{total-geral}} = C_{\text{total-fixa}} + C_{\text{total-variavel}} \quad (\text{A.94})$$

$$c_{\text{parasita}} = c_{\text{pa}} \times \dot{W}_{\text{central}} \quad (\text{A.95})$$

Onde,

$c_{\text{pa}}$  é o percentual de consumo parasita

$$E_{\text{gerada}} = \dot{W}_{\text{central}} \times t_{\text{operacao}} \quad (\text{A.96})$$

$$E_{\text{consumo-int}} = c_{\text{parasita}} \times t_{\text{operacao}} \quad (\text{A.97})$$

$$E_{\text{exportada}} = E_{\text{gerada}} - E_{\text{consumo-int}} \quad (\text{A.98})$$

$$R_{\text{energia-exp}} = \frac{E_{\text{exportada}} \times \text{Pr}_{\text{energia}}}{1000} \quad (\text{A.99})$$

$$R_{\text{ICMS}} = a * I_{\text{inicial}} \quad (\text{A.100})$$

Onde,

$a$  é o percentual de auxílio ICMS

$$Pd_{\text{acucar}} = \left( \frac{\text{mix}_{\text{acucar}} \times \dot{V}_{14} \times 1000}{\text{cons}_{\text{acucar}}} \right) \times t_{\text{operacao}} \quad (\text{A.101})$$

$$Pd_{acucar-saco} = \frac{Pd_{acucar}}{50} \quad (\text{A.102})$$

$$Pd_{alcohol} = \left( \frac{mix_{alcohol} \times \dot{V}_{14} \times 1000}{cons_{alcohol}} \right) \times t_{operacao} \quad (\text{A.103})$$

$$R_{alcohol} = Pd_{alcohol} \times Pr_{alcohol} \quad (\text{A.104})$$

$$R_{acucar} = Pd_{acucar-saco} \times Pr_{saco} \quad (\text{A.105})$$

$$R_{vapor} = R_{acucar} + R_{alcohol} \quad (\text{A.106})$$

$$R_{excesso-comb} = \dot{V}_{utilizado-comb} \times (1 - \alpha) \times t_{operacao} \times Custo_{comb} \quad (\text{A.107})$$

$$Pa_j = \left( -V_{pe} + (1 + i_{emp})^j \right) \quad (\text{A.108})$$

$$P_{-icms}_j = \left( \frac{R_{icms}}{np_{icms}} \right) \quad (\text{A.109})$$

$$R_{total} = R_{vapor} + R_{excesso-comb} + R_{energia-exp} \quad (\text{A.110})$$

$$D_{total} = -C_{total} \quad (\text{A.111})$$

$$FC_i = Pa_i + P_{-icms}_i + R_{total}_i + D_{total}_i \quad (\text{A.112})$$

$$\sum_{j=0}^N \frac{FC(j)}{(1 + TIR)^j} + Investimento\ inicial = 0 \quad (\text{A.113})$$

$$VPL = Investimento\ Inicial + \sum_{j=1}^N \frac{FC(j)}{(1 + i)^j} \quad (\text{A.114})$$

$$T_{out-cond} = T_{in-cond} + dT_{cond} \quad (\text{A.115})$$

$$P_{out-cond} = P_{in-cond} - dP_{cond} \quad (\text{A.116})$$

$$h_{in-cond} = \text{enthalpy}(\text{water}; T = T_{in-cond}; P = P_{in-cond}) \quad (\text{A.117})$$

$$S_{in-cond} = \text{entropy}(\text{water}; T = T_{in-cond}; P = P_{in-cond}) \quad (\text{A.118})$$

$$h_{\text{out-cond}} = \text{enthalpy}(\text{water}; T = T_{\text{out-cond}}; P = P_{\text{out-cond}}) \quad (\text{A.119})$$

$$s_{\text{out-cond}} = \text{entropy}(\text{water}; T = T_{\text{out-cond}}; P = P_{\text{out-cond}}) \quad (\text{A.120})$$

$$\dot{E}x_{\text{out-cond}} = \dot{m}_{\text{resf}} ((h_{\text{out-cond}} - h_0) - (T_0 + 273,15)(s_{\text{out-cond}} - s_0)) \quad (\text{A.121})$$

$$\dot{E}x_{\text{in-cond}} = \dot{m}_{\text{resf}} ((h_{\text{in-cond}} - h_0) - (T_0 + 273,15)(s_{\text{in-cond}} - s_0)) \quad (\text{A.122})$$

$$T_{\text{out-gerador}} = T_{\text{in-gerador}} + dT_{\text{gerador}} \quad (\text{A.123})$$

$$P_{\text{out-gerador}} = P_{\text{in-gerador}} - dP_{\text{gerador}} \quad (\text{A.124})$$

$$h_{\text{in-gerador}} = \text{enthalpy}(\text{water}; T = T_{\text{in-gerador}}; P = P_{\text{in-gerador}}) \quad (\text{A.125})$$

$$s_{\text{in-gerador}} = \text{entropy}(\text{water}; T = T_{\text{in-gerador}}; P = P_{\text{in-gerador}}) \quad (\text{A.126})$$

$$h_{\text{out-gerador}} = \text{enthalpy}(\text{water}; T = T_{\text{out-gerador}}; P = P_{\text{out-gerador}}) \quad (\text{A.127})$$

$$s_{\text{out-gerador}} = \text{entropy}(\text{water}; T = T_{\text{out-gerador}}; P = P_{\text{out-gerador}}) \quad (\text{A.128})$$

$$h_{\text{in-red}} = \text{enthalpy}(\text{water}; T = T_{\text{in-red}}; P = P_{\text{in-red}}) \quad (\text{A.129})$$

$$s_{\text{in-red}} = \text{entropy}(\text{water}; T = T_{\text{in-red}}; P = P_{\text{in-red}}) \quad (\text{A.130})$$

$$h_{\text{out-red}} = \text{enthalpy}(\text{water}; T = T_{\text{out-red}}; P = P_{\text{out-red}}) \quad (\text{A.131})$$

$$s_{\text{out-red}} = \text{entropy}(\text{water}; T = T_{\text{out-red}}; P = P_{\text{out-red}}) \quad (\text{A.132})$$

$$\dot{Q}_{it} = \dot{m}_{\text{resf1}} (h_{\text{out-red}} - h_{\text{in-red}}) \quad (\text{A.133})$$

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \dot{m}_{\text{resf2}} (h_{\text{out-cond}} - h_{\text{in-cond}}) \quad (\text{A.134})$$

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \dot{m}_8 (h_8 - h_9) \quad (\text{A.135})$$

$$M_{resf} = \dot{m}_{resf1} + \dot{m}_{resf2} \quad (\text{A.136})$$

$$\dot{Q}_{it-ger} = \left(\frac{2,09}{100}\right) \times \dot{W}_{central} \quad (\text{A.137})$$

$$\dot{Q}_{it-red} = \left(\frac{1,92}{100}\right) \times \dot{W}_{central} \quad (\text{A.138})$$

$$\dot{Q}_{it} = \dot{Q}_{it-red} + \dot{Q}_{it-ger} \quad (\text{A.139})$$

**Tabela A. 2 Dados utilizados na solução das equações.**

<b>Dado</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Tempo de operação da planta	4500	h
Porcentagem de empréstimo	80	%
Tempo de pagamento do empréstimo	8	anos
Custo do bagaço	30,00	R\$/tonelada
$\gamma$ - Fator de ampliação/redução do preço da tarifa elétrica.	1	adimensional
Preço do MWh	170,00	R\$
Porcentagem de consumo parasita (cpa)	10	%
Porcentagem de auxílio do ICMS(a)	4,5	%
Peso do saco de açúcar	50	kg
Número de Parcelas para receber auxílio ICMS	4	adimensional
Tempo de análise financeira	15	anos