

LUIGI MARIANI FILHO

**UTILIZAÇÃO DA PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA AUMENTO DA
CAPACIDADE ENERGÉTICA DE PLANTAS DE UTILIDADES**

Trabalho de conclusão do curso
de graduação do Departamento
de Engenharia Mecânica da
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo.

São Paulo
2006

LUIGI MARIANI FILHO

**UTILIZAÇÃO DA PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA AUMENTO DA
CAPACIDADE ENERGÉTICA DE PLANTAS DE UTILIDADES**

Trabalho de conclusão do curso
de graduação do Departamento
de Engenharia Mecânica da
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo.

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Silvio de Oliveira Junior

São Paulo
2006

FICHA CATALOGRÁFICA

Mariani, Luigi Filho

Utilização da palha de cana-de-açúcar para aumento da capacidade energética de plantas de utilidades / L.M.Filho – São Paulo, 2006. 58p.

Trabalho de conclusão de curso - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica

1.Co-geração de energia 2.Aproveitamento da palha de cana-de-açúcar. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica III.t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família

AGRADECIMENTOS

Ao professor Silvio de Oliveira Junior, pela orientação e pelo constante estímulo transmitido durante todo o trabalho.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente, na execução deste trabalho.

RESUMO

A elevação recente dos preços do petróleo, no mercado internacional, aponta para a necessidade de buscar alternativas de suprimento de energia, priorizando aquelas cujas fontes sejam renováveis. A produção de agroenergia, em larga escala, além dos custos inferiores em relação ao petróleo, apresenta vantagens ambientais, e gera renda e emprego no setor rural. Dessa maneira, o trabalho visa avaliar a viabilidade técnico econômica do aproveitamento da palha da cana-de-açúcar como um meio de incrementar a geração de energia elétrica em uma planta de utilidades de usina de açúcar e álcool. Cada tonelada de cana produz 140 kg de palha, sendo que o valor de seu poder calorífico inferior – PCI – é da ordem de 15 MJ/Kg (base seca). A planta energética analisada neste trabalho gera um excedente de 4,17 MWh de energia elétrica, tendo como fonte energética bagaço e palha de cana. Comparando-se o custo de produção deste excedente de energia com seu preço de venda, chega-se a um valor líquido de R\$165,83/h. Portanto, para as condições de análise, é viável o aproveitamento da palha como alternativa energética.

ABSTRACT

The recent rise of the petrol prices, in the worldwide market, points to the necessity of searching new energy alternatives, prioritizing those whose sources are renewable. The agro-energy production, on a large scale, beyond the lower costs compared to the petrol, brings ambient advantages, and generates income and job in the agricultural sector. In this way, this work aims to evaluate the economic viability technician of the sugar cane straw exploitation, as a way to develop the electricity generation in plant of utilities. Each ton of sugar cane produces 140 kg of straw, and the value of its inferior calorific power is 15 MJ/Kg (dry base). The analyzed energy plant in this work generates an excess of 4,17 MWh of electric energy, having as energy source sugar cane straw. Comparing the production costs of this energy excess with its price of sale, results in a profit of R\$165,83/h. Therefore, for the analysis conditions, the exploitation of the energy straw is a viable alternative.

Lista de Figuras

Figura 1: Esquema de produção de açúcar e álcool	3
Figura 2: Distribuição canavieira no Estado de São Paulo 05/06.....	11
Figura 3: Exemplo de enfardadora.....	22
Figura 4: Caminhão transportando os fardos de palha	23
Figura 5: Recolhimento da palha com forrageira.....	23
Figura 6: Ciclo de Rankine	28
Figura 7: Diagrama T-s do ciclo de Rankine	29
Figura 9 : Ciclo I	35
Figura 10 : Ciclo II	37

Lista de Tabelas

Tabela 1: Produtividade por região	10
Tabela 2: Principais combustíveis seus aspectos	14
Tabela 3: Variedades de cana e composição	18
Tabela 4: Produção de colmos e palha por variedade	18
Tabela 5: Resíduos da queima da palha.....	19
Tabela 6: Poder calorífico da palha e bagaço	20
Tabela 7: Custos operacionais.....	27

Lista de Gráficos

Gráfico 1: Produção por região	11
Gráfico 2: Evolução da produtividade de cana no Estado de São Paulo	12
Gráfico 3: Matriz energética mundial.....	13
Gráfico 4: Matriz energética brasileira.....	13
Gráfico 5: Distribuição regional de usinas que produzem eletricidade	17

Sumário

1. Introdução	1
2. Processo de fabricação do açúcar e álcool.....	3
2.1 Matéria prima – Cana-de-açúcar.....	4
2.2 Pesagem	5
2.3 Amostragem.....	5
2.4 Descarga e armazenamento.....	5
2.5 Lavagem da cana	5
2.6 Preparo da cana.....	6
2.7 Extração do caldo.....	6
2.8 Tratamento do caldo	6
2.9 Produção de etanol.....	7
2.9.1 Fermentação.....	7
2.9.2 Destilação.....	8
2.9.3 Destilação do vinho para obtenção do etanol	8
2.10 Produção de açúcar	9
2.10.1 Evaporação.....	9
2.10.2 Cozimento.....	9
3. Produtividade de cana.....	10
4. Panorama energético atual e perspectivas	12
5. Co-geração de energia.....	15
6. Geração de eletricidade a partir da biomassa.....	16
7. Biomassa – Potencial energético da cana	17
8. Características dos resíduos da colheita.....	19
9. Métodos de recolhimento da palha	20
9.1 Método I.....	20
9.2 Método II	21
9.3 Método III	22
10. Experimento	24
10.1 Introdução	24
10.2 Equipamentos utilizados	24
10.2.1 Aleiramento	24
10.2.2 Recolhimento da palha.....	25

10.2.3 Transporte	25
10.3 Rendimento dos equipamentos	25
10.3.1 Aleiramento	25
10.3.2 Forrageira.....	25
10.3.4 Transporte	26
10.4 Observações gerais	26
10.5 Custos operacionais	27
11. Ciclo termodinâmico.....	28
12. Equacionamento do ciclo de Rankine	31
12.1 Compressão isoentrópica na bomba:	31
12.2 Adição de calor a pressão constante na caldeira:.....	32
12.3 Trabalho produzido na turbina:.....	32
12.4 Rejeição de calor no condensador:	33
12.5 Rendimento térmico do ciclo de Rankine:.....	34
13. Equacionamento do ciclo real da Usina	34
13.1 Ciclo I	35
13.2 Ciclo II	37
14. Viabilidade.....	38
15. Conclusão.....	39
16. Anexo I	40
17. Anexo II	44
18. Referências	46

1. Introdução

A demanda energética vem aumentando proporcionalmente ao desenvolvimento do país. Contudo, a oferta de energia no Brasil não acompanha tal crescimento. Este desequilíbrio entre geração e consumo já vem ocorrendo há algum tempo. A realidade do setor elétrico brasileiro é consequência, principalmente, da crise financeira que impossibilita os investimentos necessários para garantir a oferta de energia para o país.

Em 2001 o Brasil passou por um período crítico na geração de energia elétrica, que culminou em um grande *black-out*, fenômeno conhecido como “apagão”. Isto porque o setor energético é baseado na geração de usinas hidrelétricas, as quais dependem da água como fonte energética. Como naquele ano houve um longo período de estiagem, e consequentemente os níveis dos reservatórios baixaram, então foi inevitável que ocorresse falta de eletricidade.

A elevação recente dos preços do petróleo, no mercado internacional, aponta para a necessidade de buscar alternativas de suprimento de energia, tanto elétrica como para transporte. É necessário que haja desenvolvimento de meios alternativos de geração de energia, priorizando aqueles cujas fontes energéticas sejam renováveis.

A produção de agroenergia, em larga escala, além dos custos inferiores em relação ao petróleo, apresenta vantagens ambientais, e gera renda e emprego no setor rural. Em outras palavras, promove o desenvolvimento sustentável do interior do Brasil, em especial nas regiões remotas.

Em usinas do setor sucroalcooleiro, a principal fonte de energia é o bagaço da cana-de-açúcar, que quando queimado nos geradores de vapor, transferem energia ao vapor, que por sua vez aciona turbinas acopladas a geradores de eletricidade, os quais geram energia elétrica, que pode ser vendida, ou consumida pela própria usina.

Além do bagaço, um outro subproduto é a palha da cana-de-açúcar. Esta, geralmente é queimada no canavial durante o processo de colheita da

cana, desperdiçando-se assim todo seu potencial energético. O bagaço é uma fonte alternativa para amenizar a falta de energia elétrica no Brasil, visto que essa biomassa é renovável, não agride o meio ambiente, é abundante, além de estar concentrada na região centro-sul do país, que demanda a maior parte da energia gerada no Brasil.

Outro fator que favorece o aproveitamento da palha da cana é o Projeto de Lei 0380/2001, do Estado de São Paulo, que proíbe a queima da cana-de-açúcar na lavoura, gradativamente até 2021, para área mecanizável, e até 2031 para área não mecanizável.

2. Processo de fabricação do açúcar e álcool

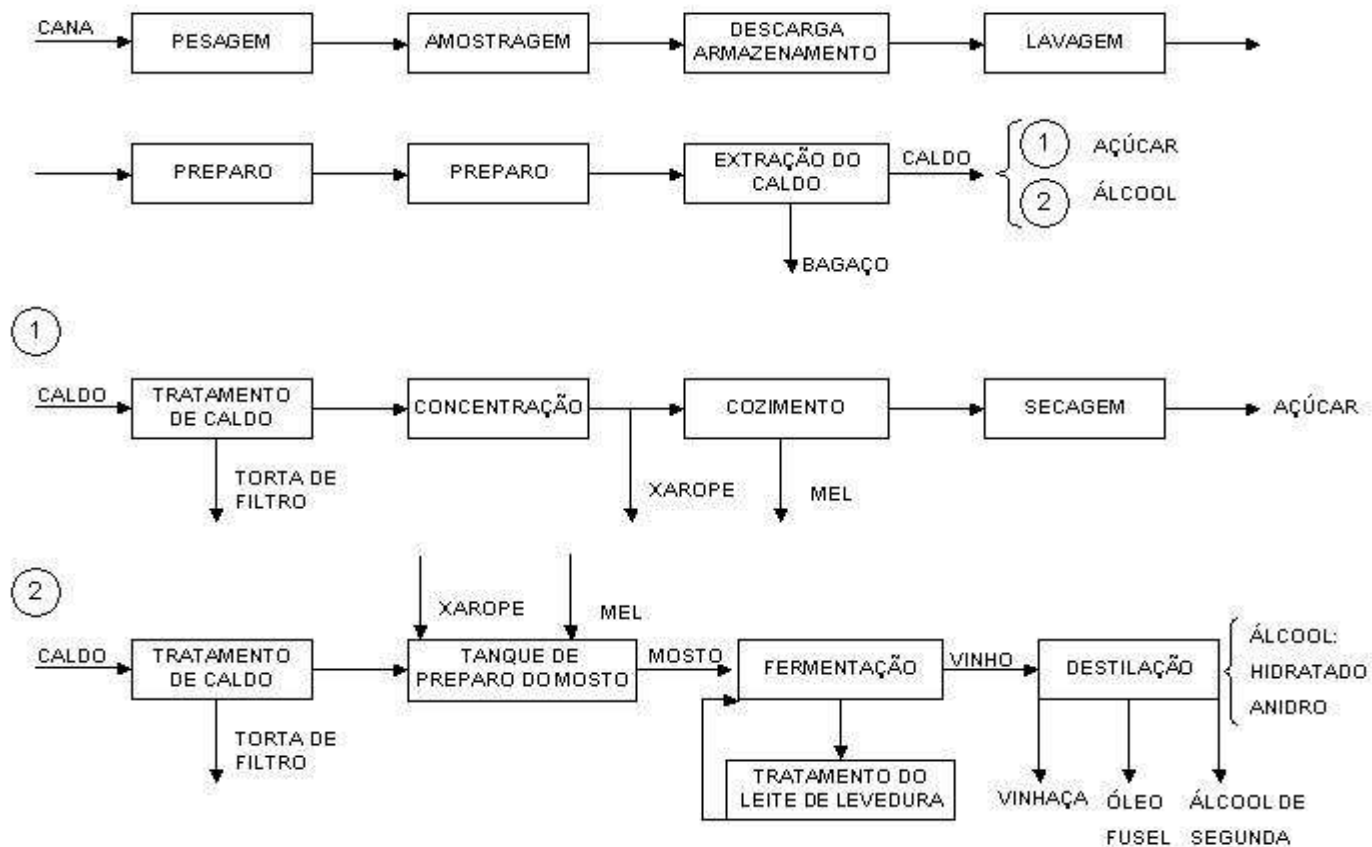


Figura 1: Esquema de produção de açúcar e álcool

A seguir serão descritos os principais processos para a produção de açúcar.

2.1 Matéria prima – Cana-de-açúcar

Do ponto de vista da utilização industrial, a cana é constituída de fibra e caldo, sendo este a matéria-prima real. A fibra constitui-se de todo material insolúvel em água, e o caldo é uma solução contendo água e todos os sólidos solúveis, tais como, os açúcares, as cinzas, materiais nitrogenados e outros.

A composição química da cana é bastante variável quantitativamente, sendo, porém, semelhante qualitativamente. Essa variação é influenciada por diversos fatores, entre os quais se destacam: variedade da cana, região de cultivo, clima, solo, adubação, etc.

O método de colheita mais utilizado atualmente é o de queima da palha antes do corte. O processo de colheita mecanizada é parcialmente empregado no Brasil, encontrando alguns obstáculos, tais como irregularidades topográficas e de ordem social, no que se refere à atividade dos bóias-frias. Entretanto, conforme previsto no Projeto de Lei 0380/2001, do Estado de São Paulo, que proíbe a queima da cana-de-açúcar na lavoura, gradativamente até 2021, para área mecanizável, e até 2031 para área não mecanizável, essa realidade terá de ser mudada.

O meio de transporte mais empregado atualmente é por meio de caminhões. Neles, a cana é transportada inteira ou em toletes.

2.2 Pesagem

A operação de pesagem da cana deve ser rigorosamente executada, uma vez que é feito, através dela o controle tanto agrícola quanto industrial da unidade produtora.

2.3 Amostragem

Após a pesagem, as amostras de matéria prima são enviadas ao laboratório onde são analisadas em condições padronizadas. São determinados os teores de pol (é a porcentagem em massa que indica o teor de sacarose do caldo), Brix (porcentagem em massa de sólidos solúveis contidos no caldo) e fibra. É através dessas análises que se efetua o pagamento da cana pelo teor de sacarose.

2.4 Descarga e armazenamento

Normalmente, a descarga da cana na usina é totalmente mecanizada. A pratica de estoque de cana não é recomendada. Caso estocada deve obedecer certos prazos de armazenamento caso contrario, pode ocorrer modificações na cana.

2.5 Lavagem da cana

A pratica do carregamento mecânico da cana colhida aumenta a quantidade de impurezas transportadas à usina, principalmente areia, argila, palha e pedras.

A presença dessa matéria estranha, além de desgaste dos equipamentos por erosão, causa o aumento do tempo de decantação do caldo, levando a um aumento de açúcar por inversão da sacarose (sacarose → glicose + frutose), entre outras reações indesejáveis.

Para reduzir essas inconveniências, procede-se a lavagem da cana antes de processa-la.

2.6 Preparo da cana

O principal objetivo do preparo, é desintegrar a cana-de-açúcar, de modo que seja facilitada a extração do caldo contido em suas células. Além disso, o preparo é importante para incrementar a capacidade das moendas pelo aumento da densidade da alimentação, tornando-a compacta e homogênea.

Atualmente, na indústria sucroalcooleira, os equipamentos mais utilizados no preparo da cana são as facas rotativas seguidas dos desfibradores.

As facas rotativas proporcionam a obtenção de um colchão de cana de espessura quase uniforme, possibilitando uma melhor alimentação das moendas.

Seguindo-se às facas, vêm os desfibradores, que têm por objetivo destruir por completo a estrutura da cana, dando um ganho significativo na extração do caldo.

2.7 Extração do caldo

A extração do caldo de cana para fabricação de açúcar ou etanol é tradicionalmente realizada pelo processo de moagem, apesar de vários países praticarem largamente a tecnologia de extração por difusão.

No Brasil, no entanto este processo não é difundido, empregando-se, normalmente, tandens (conjunto de cilindros) de moendas para extrair o máximo de sacarose de cana, previamente preparada pelas facas e desfibrador.

2.8 Tratamento do caldo

Previamente ao processamento industrial, o caldo, proveniente da seção de extração, passa por algumas etapas de tratamento. A tecnologia para tratamento do caldo para álcool ainda não está bem estabelecida. Verifica-se,

no parque industrial brasileiro, que algumas unidades eliminaram o processo de tratamento, sendo o caldo peneirado após a extração, e enviado diretamente à seção de fermentação.

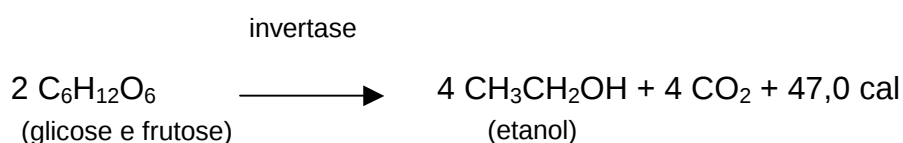
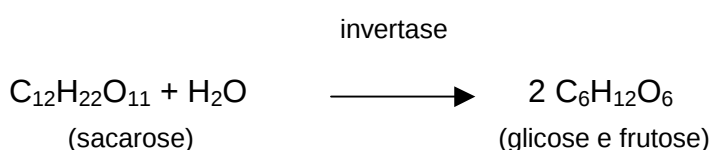
O caldo destinado à produção de açúcar é peneirado e bombeado para a torre de sulfitação. Em seguida, faz-se a alcalinização com leite de cal, aquecendo-se em seguida, para efetuar-se a separação do precipitado por sedimentação e decantação. Após a decantação, o caldo segue para a seção de evaporação enquanto que o lodo decantado é filtrado.

2.9 Produção de etanol

O caldo misto, proveniente da extração e após tratamento, é enviado à etapa de fermentação. Previamente, porém, o mosto a ser fermentado deve ter concentração acertada para valores adequados. Desta forma, é feita dosagem do caldo misto com melaço (mel residual da fabricação de açúcar) ou xarope proveniente dos evaporadores.

2.9.1 Fermentação

A fermentação alcoólica consiste na transformação dos açúcares do mosto em etanol, gás carbônico e energia, sob ação enzimática das leveduras. São mostradas abaixo as reações de sacarificação e fermentação alcoólica, respectivamente.



2.9.2 Destilação

A destilação é uma operação unitária de separação que se baseia nas diferenças de volatilidade dos componentes de uma mistura líquida a serem separados.

Ao se aquecer uma mistura líquida homogênea até a ebulição, as bolhas de vapor produzidas serão mais ricas nos componentes mais voláteis e, portanto, o líquido remanescente terá composição diferente da mistura original. Se o vapor produzido for removido e condensado, terá também composição diferente da mistura original.

Repetindo-se esta operação varias vezes e utilizando-se condensado de uma operação como mistura da operação seguinte, pode-se efetuar a separação dos componentes constituintes da mistura original.

2.9.3 Destilação do vinho para obtenção do etanol

O vinho resultante da centrifugação do mosto fermentado é enviado para a dorna volante, o qual alimenta a destilaria, cuja finalidade é purificar e concentrar o álcool obtido na fermentação.

A destilaria é constituída por uma serie de colunas de destilação, variando em numero conforme o tipo e qualidade do álcool.

Extrai-se também dessa coluna o óleo fusel, constituído de produtos secundários de fermentação.

O álcool hidratado é resfriado, passa por controle de qualidade, sendo estocado ou enviado para a desidratação para a produção de álcool anidro.

2.10 Produção de açúcar

2.10.1 Evaporação

A evaporação constitui o primeiro estágio de concentração do caldo misto proveniente da seção de tratamento.

Na indústria sucroalcooleira brasileira o sistema de evaporação mais encontrado é o de múltiplo efeito em correntes paralelas. O tipo de evaporador usado é de tubos verticais, de fluxo ascendente, formado por um corpo cilíndrico vertical.

2.10.2 Cozimento

O xarope proveniente da seção de evaporação, possui viscosidade tão elevada que não pode ser mais concentrado em evaporadores comuns.

A solução para este problema é a utilização de tachos à vácuo, denominados cozedores, que operam por batelada e permitem alcançar maiores concentrações do xarope, que juntamente com os cristais formados passa a se denominar massa cozida.

3. Produtividade de cana

O Brasil é um dos líderes mundiais na produção e exportação de vários produtos agropecuários, sendo o primeiro produtor de cana-de-açúcar e exportador de açúcar e álcool do mundo. Metade da produção de açúcar é exportada e gera mais de 2 bilhões de dólares anualmente para a balança comercial brasileira. O Estado de São Paulo é responsável por 60% de todo o açúcar e álcool produzido no País e por 70% das exportações nacionais de açúcar (União da Agroindústria Canavieira de São Paulo).

Conforme indicado na tabela1, a Conab constatou que o Brasil deverá colher 450,2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar para todos os usos, com crescimento de 7,8% em relação à safra passada comparando-se com os dados do IBGE. A Região Centro-Sul será responsável pela produção de 84,2% do total, e a Região Norte/Nordeste com 15,8%. Há de se ressaltar que o aumento na produção está se dando pela incorporação de novas áreas, onde o Centro-Sul deverá crescer 8,7% totalizando 4.887,8 mil hectares e no Norte/Nordeste 4,5% com mais 1.206,6 mil hectares. A produtividade média no Brasil foi estimada 73870 kg/ha, sendo que no Centro-Sul foi de 77577 kg/ha e no Norte/Nordeste de 58856 kg/ha.

Tabela 1: Produtividade por região

Região	ÁREA (em mil ha)			PRODUTIVIDADE (em kg/ha)			PRODUÇÃO (em mil t)		
	Safra	Safra	VAR. %	Safra 04/05	Safra 05/06	VAR. %	Safra 04/05	Safra 05/06	VAR. %
	04/05 IBGE	05/06 CONAB		IBGE	CONAB		IBGE	CONAB	
Norte	15,69	16,20	3,30	65.424,00	66.352,00	1,40	1.026,50	1.074,90	4,70
Nordeste	1.138,88	1.190,40	4,50	57.599,00	58.754,00	2,00	65.598,30	69.940,60	6,60
Norte/Nordeste	1.154,57	1.206,60	4,50	57.705,00	58.856,00	2,00	66.624,80	71.015,50	6,60
Centro-Oeste	531,33	593,20	11,60	73.732,00	74.450,00	1,00	39.175,90	44.164,00	12,70
Sudeste	3.517,37	3.827,30	8,80	78.636,00	78.778,00	0,20	276.592,90	301.505,40	9,00
Sul	447,38	467,30	4,50	78.639,00	71.713,00	(8,80)	35.181,40	33.511,40	(4,70)
Centro-Sul	4.496,08	4.887,80	8,70	78.057,00	77.577,00	(0,60)	350.950,20	379.180,80	8,00
Brasil	5.650,65	6.094,40	7,90	73.899,00	73.870,00	-	417.575,00	450.196,30	7,80

PRODUÇÃO SAFRA 05/06 (em mil t) - CONAB

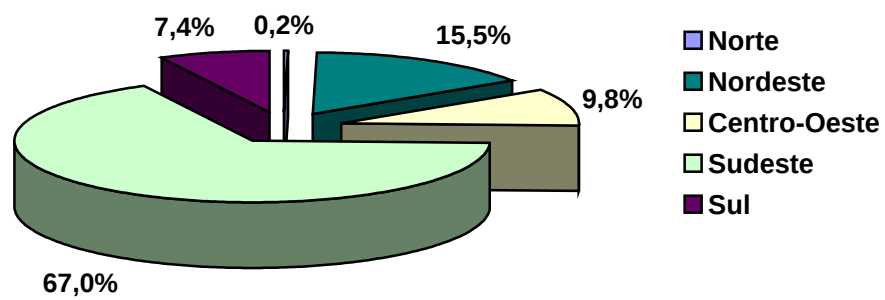


Gráfico 1: Produção por região

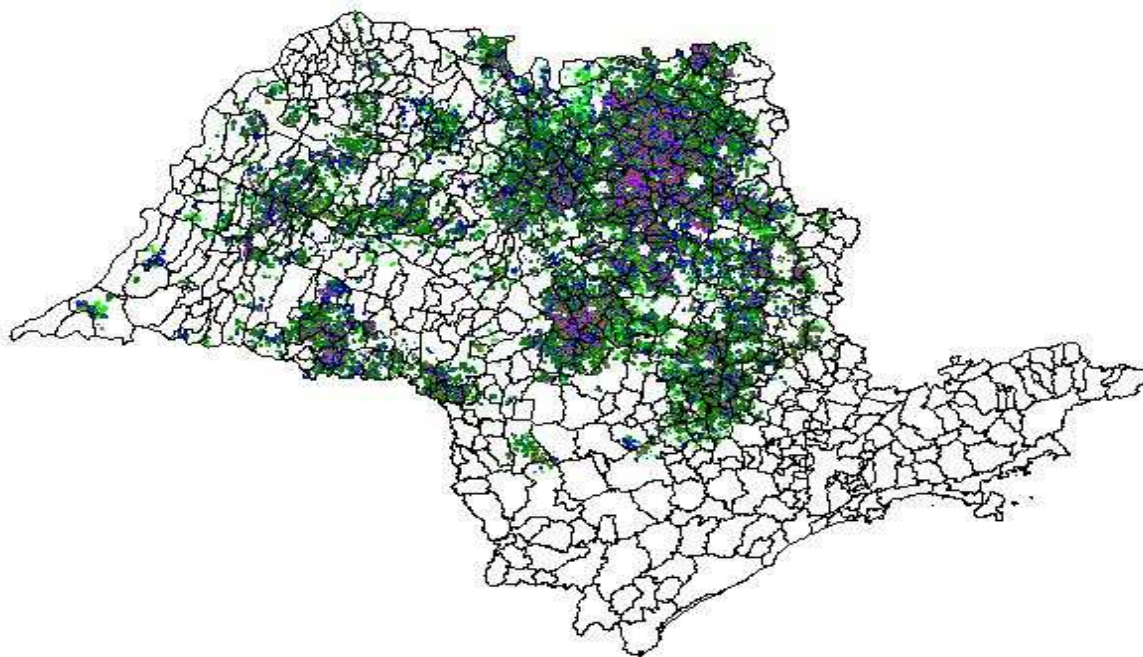


Figura 2: Distribuição canavieira no Estado de São Paulo 05/06

A safra 05/06 de cana-de-açúcar conta com 205 unidades produtoras em operação na Região Centro-Sul, de acordo com o último levantamento da Unica. Desse total, 125 estão instaladas no Estado de São Paulo. Outras 24 usinas estão em plena safra no Paraná e 19 em Minas Gerais.

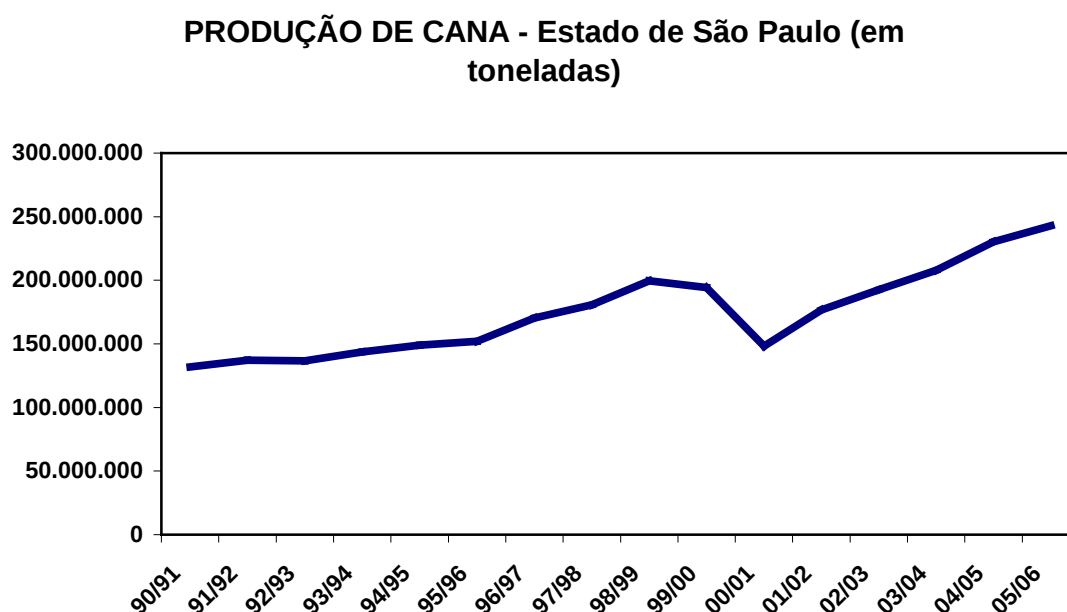


Gráfico 2: Evolução da produtividade de cana no Estado de São Paulo

4. Panorama energético atual e perspectivas

A demanda projetada de energia no mundo aumentará 1,7% ao ano, de 2000 a 2030, quando alcançará 15,3 bilhões de toneladas equivalentes de petróleo (TEP, ou toe, na sigla internacional, em inglês) por ano, de acordo com o cenário base, traçado pelo Instituto Internacional de Economia (Mussa, 2003). Em condições circunstanciais, sem alteração da matriz energética mundial, os combustíveis fósseis responderiam por 90% do aumento projetado na demanda mundial, até 2030. Entretanto, o esgotamento progressivo das reservas mundiais de petróleo é uma realidade cada vez menos contestada. A Bristish Petroleum, em seu estudo “Revisão Estatística de Energia Mundial de 2004”, afirma que atualmente as reservas mundiais de petróleo durariam em

torno de 41 anos, as de gás natural, 67 anos, e as reservas brasileiras de petróleo, 18 anos.

A matriz energética mundial tem participação total de 80% de fontes de carbono fóssil, sendo 36% de petróleo, 23% de carvão e 21% de gás natural (Gráfico 3). O Brasil se destaca entre as economias industrializadas pela elevada participação das fontes renováveis em sua matriz energética. De acordo com o Balanço Energético Nacional – BEN (com dados preliminares de 2005) – 30% da matriz energética brasileira é devida à energia gerada por biomassa. Aproximadamente 47% desse percentual tem como fonte energética produtos oriundos da cana-de-açúcar. Ainda segundo o BEN, esta fonte de energia teve um crescimento de 3,3% em relação ao ano de 2004, e espera-se para os próximos anos um crescimento muito superior a esse.

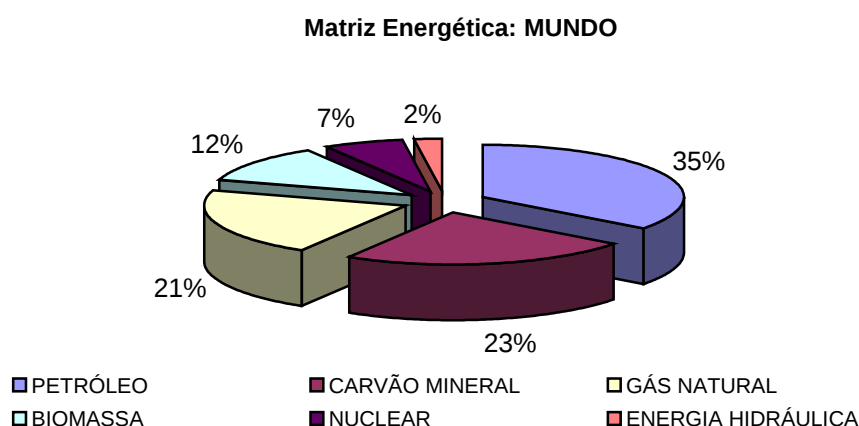


Gráfico 3: Matriz energética mundial

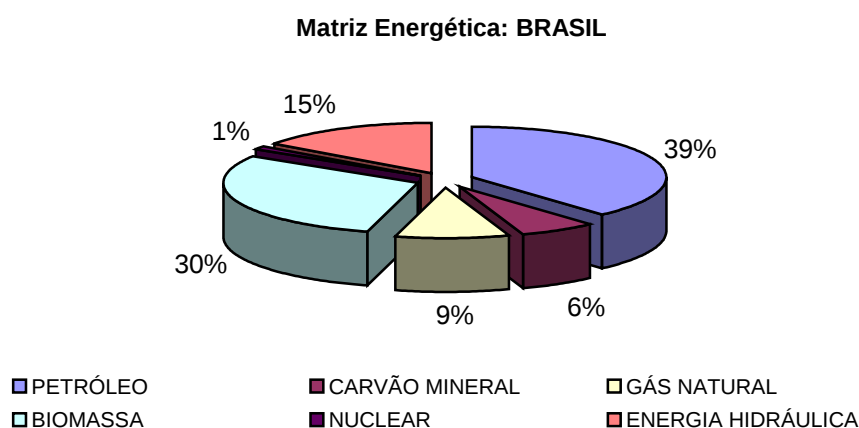


Gráfico 4: Matriz energética brasileira

A tabela esquematizada abaixo mostra a análise das principais fontes da matriz energética, demonstrando aspectos positivos e negativos de cada uma.

Tabela 2: Principais combustíveis seus aspectos		
Combustível	Aspectos positivos	Aspectos negativos
Carvão	• Abundante, economicamente acessível, uso seguro • Fácil de transportar e de armazenar • Amplamente distribuído	• Alta emissão de gases de efeito estufa • Necessita portentosos investimentos para desenvolvimento de tecnologias que reduzam as emissões de gases de efeito estufa (GEE) a níveis aceitáveis • Extração perigosa
Petróleo	• Conveniente • Alta densidade energética • Fácil de transportar e de armazenar • Co-evolução da fonte energética com os equipamentos para seu uso	• Fortemente poluidor da atmosfera • Preços voláteis • Concentração geográfica das jazidas • Produto cartelizado e mercado manipulável • Vulnerabilidade de interrupção de oferta e instabilidade geopolítica • Riscos de transporte e armazenamento • Reservas em esgotamento
Gás	• Eficiente e conveniente • Combustível multiuso • Alta densidade energética	• Produto emissor de gases de efeito estufa • Transporte e armazenamento caro e arriscado • Requer infra-estrutura cara, própria e inflexível • Volatilidade de preços • Jazidas concentradas geograficamente • Produto cartelizado e mercado manipulável
Nuclear	• Não há emissões de gases de efeito estufa • Poucas limitações de recursos • Alta densidade energética	• Baixa aceitação da sociedade • Sem solução para eliminação dos resíduos • Operação arriscada e perigosa • Muito intensivo em capital
Renováveis	• Baixas emissões de gases de efeito estufa • Sustentabilidade	• Custos altos • Fontes intermitentes • Distribuição desigual • Estágio tecnológico inferior às demais fontes em uso

O cenário de referência da World Energy Outlook (WEO 2000) projeta que a demanda por energia renovável crescerá 2,3% ao ano, ao longo das duas próximas décadas, portanto, acima do crescimento médio da demanda geral de energia. Excetuando-se a hidroelétrica, a demanda total crescerá em torno de 2,8% ao ano. Entretanto, esta projeção não prevê intervenções externas no mercado, como políticas públicas ou pressões sociais.

5. Co-geração de energia

Co-geração é definida como o processo de transformação de uma forma de energia em mais de uma forma de energia útil, sendo que as formas de energia útil mais freqüentes são a energia mecânica (movimentar máquinas, equipamentos e turbinas associadas a geradores de energia elétrica) e a térmica (geração de vapor). A co-geração apresenta alta eficiência energética, pois há pouco desperdício de energia térmica (ao contrário do que ocorre nas termoeletricas puras), pois essa energia é utilizada em processos industriais, como secagem, evaporação, aquecimento, cozimento, destilação, etc.

Esses conceitos aplicam-se principalmente à indústria sucroalcooleira. No processamento da cana-de-açúcar, há alta demanda de energia térmica, mecânica e elétrica. Após a extração do caldo, é possível queimar o bagaço e resíduos da cana, por meio de caldeiras, produzindo vapor que é utilizado para obter as três fontes de energia. É importante ressaltar que, do total da energia contida na cana-de-açúcar, o álcool responde por cerca de um terço, estando o restante distribuído entre o bagaço, os ponteiros e a palha.

Autores como Van Wylen e Sonntag (1976), estudaram os aspectos termodinâmicos da obtenção de eletricidade por co-geração no ciclo Rankine. Neste, utiliza-se uma caldeira, em que uma fonte de energia (bagaço ou a palha da cana), gera vapor em alta pressão, com temperatura superior ao ponto de ebulição da água. A liberação do vapor ocorre através de sistemas mecânicos, movimentando máquinas, transferindo calor para processos industriais, ou movimentando turbinas para gerar energia elétrica. O ciclo se completa com o retorno do vapor condensado à caldeira, para ser novamente aquecido.

Inicialmente, o bagaço de cana, que corresponde 25% a 30% do peso da cana processada com 50% de umidade, era utilizado nas usinas principalmente para suprir uma demanda térmica. Apenas recentemente o bagaço vem sendo utilizado para gerar vapor, com grande flexibilidade para ser transformado em formas de energia como eletricidade. O aumento do custo da energia, seja elétrica ou oriunda do petróleo, tornou mais atraente a utilização desta biomassa para co-geração de energia.

Essa possibilidade atraiu os interesses dos formuladores de políticas de abastecimento energético, em especial no final do século XX. Recentemente, o governo brasileiro regulamentou a compra de energia elétrica dos autoprodutores, assim entendida a pessoa jurídica ou consórcio, com concessão ou autorização para gerar eletricidade para seu uso exclusivo e que pode vender ao concessionário de energia elétrica eventuais excedentes para venda aos seus clientes.

6. Geração de eletricidade a partir da biomassa

Segundo a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) a matriz de energia elétrica do Brasil é dividida de acordo com o tipo da fonte energética utilizada para geração de eletricidade. A biomassa é responsável por cerca de 3% da geração, valor muito pequeno comparado com a geração hidrelétrica, que corresponde a maior produtividade, com aproximadamente 70 % da produção.

Atualmente, o potencial autorizado para empreendimentos de geração de energia elétrica, de acordo com a ANEEL, é de 2.420 MW, quando se consideram apenas centrais geradoras que utilizam bagaço de cana-de-açúcar como fonte de combustível.

A Unica (União da Agroindústria canavieira de São Paulo) informa que, no Estado de São Paulo, o setor sucroalcooleiro gera para consumo próprio entre 1.200 e 1.500 MW. O potencial de geração de energia da agroindústria canavieira está em torno de 12.000 MW.

Ainda segundo a ANEEL, as Usinas situadas na região Sudeste, principalmente no Estado de São Paulo, geram 66% de toda energia elétrica produzida a partir da biomassa, seguida pela região Nordeste, com 17% do total.

Eletricidade gerada em Usinas de todo Brasil

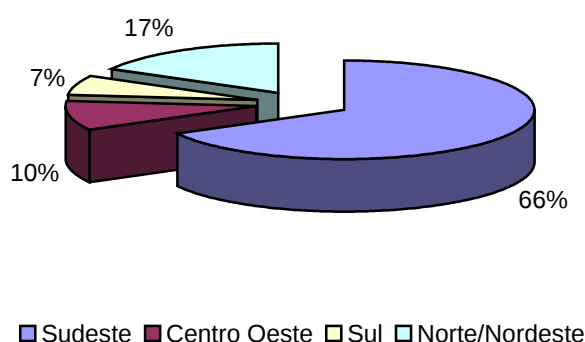


Gráfico 5: Distribuição regional de usinas que produzem eletricidade

7. Biomassa – Potencial energético da cana

A biomassa é toda matéria orgânica com exceção dos combustíveis fósseis. A prática do uso da biomassa como fonte de combustível na indústria, estende-se desde o setor alimentício até o de cerâmicas. Além disso, os combustíveis de biomassa também são usados para co-geração de energia, como exemplo, o uso da palha e do bagaço da cana em uma usina produtora de açúcar e álcool, voltado para geração de vapor e eletricidade.

De acordo com a Copersucar, é possível considerar que o índice de resíduos de colheita, em matéria seca, é de 140 kg por tonelada de cana-de-açúcar, embora haja diversas variedades cultivadas em todo o país.

Ripoli e Molina Júnior estimaram que, de 1 hectare de canavial, pode-se obter em torno de 280.394 MJ, em equivalentes energéticos, assim distribuídos: 20,09% na forma de álcool, 40,03% no aproveitamento do bagaço

como combustível para fornalhas de caldeiras de usinas e destilarias, e os restantes 39,88% estariam contidos no material remanescente da colheita (ponteiros, folhas verdes e palhas).

Trento Filho (1997) determinou a razão entre a quantidade de palha que permanece no campo após a colheita, e a área colhida. A tabela3 abaixo mostra os resultados da análise.

Tabela 3: Variedades de cana e composição

Variedade		SP80-185	SP79-1011	SP79-2233	RB78 5148	Média
Cana	t/ha	108	129	149	-	-
Folhas Secas	t/ha	14,0	11,4	13,6	8,2	11,8
Folhas Verdes	t/ha	1,3	1,9	1,2	1,7	1,6
Ponteiros	t/ha	0,3	0,3	0,2	0,5	0,3
Total de Palha	t/ha	15,6	13,6	15,0	10,4	13,7

A Copersucar (1999) analisou a relação entre a produção de colmos e palha da cana. Os dados estão na tabela4 abaixo:

Tabela 4: Produção de colmos e palha por variedade

Variedades	Colmos (t/ha)	Palha (t/ha)	Palha/Colmos (%)
SP79-1011	98,5	15,5	15,7
SP80-1842	100,9	12,6	11,5
RB72 454	104,1	15,2	14,6
Média	104,0	14,4	13,9

8. Características dos resíduos da colheita

Para avaliar a energia contida em um determinado combustível, é comum o uso do conceito do poder calorífico. Este pode ser definido como sendo a quantidade de calor liberado por um combustível durante sua combustão completa (25°C). Se o combustível contiver hidrogênio, um dos produtos da combustão será a água, que poderá ocorrer nas formas líquida, vapor ou líquida mais vapor. Caso a água encontre-se na fase líquida, o calorímetro registrará uma quantidade de calor maior do que se ela estivesse na forma de vapor. Desta maneira, é possível definir dois tipos de poder calorífico:

- PCS: poder calorífico superior, quando a água é completamente condensada;
- PCI: poder calorífico inferior, quando a água formada encontra-se totalmente na fase de vapor.

Os resíduos constituem a maior parte do total de biomassa produzida, e são importantes fontes energéticas. Estudando com mais detalhe a composição dos resíduos da queima do palhço, de acordo com PROJETO BRA/96/631-PNUD/COPERSUCAR, foram obtidos os resultados mostrados na tabela 5 a seguir:

Tabela 5: Resíduos da queima da palha

Material	Cinzas(%) ¹	Voláteis(%) ¹	Carbono fixo (%) ¹	Umidade (%)	PCS (MJ/kg) ¹
Folhas Secas	3,3	85,8	10,8	11,3	17,36
Folhas Verdes	3,2	85,2	11,7	66,7	17,38
Ponteiros	4,3	84,1	11,6	82,5	16,27

¹base seca

É possível observar que existe grande variação no teor de umidade entre os componentes da palha, nas condições logo após a colheita. Entretanto, a composição de cinzas, voláteis, carbono fixo e PCS variam muito pouco.

A variedade da cana não afeta os valores obtidos para poder calorífico superior, nem os da composição. Porém, há influência nos teores de outros componentes químicos constituintes da cana, como cálcio e fósforo.

Segundo a Copersucar(1999), através de ensaios foi possível determinar valores de PCS e PCI para bagaço enfardado, palha enfardada e palha solta. A tabela 6 resume os resultados:

Tabela 6: Poder calorífico da palha e bagaço

Poder Calorífico	Bagaço Enfardado	Palha Enfardada	Palha Solta
MJ/kg (base seca)			
Superior	18,3	17,4	14,3 – 15,1
Inferior	17,1	16,1	13,3 – 14,1

9. Métodos de recolhimento da palha

Existem, atualmente, inúmeras maneiras de se recolher a palha da cana do campo, sendo os três métodos mais usuais apresentados a seguir.

9.1 Método I

Este método consiste basicamente de três etapas: colheita mecanizada da cana, aleiramento e enfardamento da palha.

Neste processo, a colheita é mecanizada, sem queima da cana, sendo esta levada posteriormente à indústria. A palha deve ficar exposta ao sol, no campo, durante alguns dias (5 a 8), até que atinja umidade entre 12 e 15%. Após essa etapa, a palha é aleirada e recolhida do solo por uma enfardadora.

O aleiramento consiste, basicamente, em se amontoar ou empilhar o material contido sobre o solo, em leiras ou camadas contínuas, espaçadas umas das outras, dependendo da declividade do terreno, da densidade do material derrubado e do tipo de equipamento utilizado ou disponível.

Já o enfardamento é o processo de compactação do material em grandes pacotes (fardos) que podem ser manuseados com mais facilidade.

- **Vantagens:** neste sistema, a principal vantagem é o aumento considerável da densidade da palha após o enfardamento, favorecendo o transporte para a usina.
- **Desvantagens:** existência de várias operações. Depois de aleirada, a palha é enfardada e depositada no campo, onde uma equipe de funcionários recolhe os fardos e os colocam em caminhões.

9.2 Método II

Neste método, a colheita da cana é mecanizada, porém não se separa a palha da cana. Isso é obtido com o desligamento dos exaustores da colhedeira, e desta forma a palha é transportada juntamente com a cana até a indústria, onde será separada em uma estação de limpeza a seco.

- **Vantagens:** tem como principal vantagem o aproveitamento do mesmo sistema de transporte da cana, utilizando todo o sistema de logística existente na usina.
- **Desvantagens:** diminuição da densidade da carga carregada, visto que a palha ocupa espaço anteriormente preenchido pela cana, que é mais densa, havendo então a necessidade de redimensionamento do sistema de transporte. A umidade da palha é alta, em torno de 50%, já que esta é enviada para a usina logo após a colheita, não permanecendo no campo exposta ao sol. Há a necessidade de se construir uma estação de limpeza a seco, cuja função é de separar a palha da cana e eliminar impurezas como terra e pedras, além de triturar a palha para deixá-la com a granulometria semelhante a do bagaço.

9.3 Método III

O último método consiste em colheita mecanizada, separação e trituração da palha por meio de forrageira.

A colheita é realizada com os exaustores da colhedeira ligados, a fim de se separar a palha da cana, enviando esta para a usina, deixando a palha no campo exposta ao sol durante alguns dias (5 a 8), com o objetivo de diminuir sua umidade (12 a 15% de umidade). A palha é aleirada e recolhida por uma forrageira, que deposita o material já triturado em caminhões específicos, que a transporta para a usina.

- **Vantagens:** após ser exposta ao sol, a palha oferece condições ideais como combustível, aumentando seu poder calorífico inferior (PCI) de 7.524 kJ/kg (umidade de 50%) para 14.630 kJ/kg (com umidade entre 12 e 15%). Outra vantagem é o trituramento da palha, que chega pronta para ser utilizada nas caldeiras da usina, não havendo necessidade de adequações ou instalação novos de equipamentos.
- **Desvantagens:** a principal desvantagem apresentada por esse sistema é a baixa densidade da palha, o que acarreta aumento no custo de transporte.

As figuras a seguir ilustram os processos discutidos nos itens anteriores.



Figura 3: Exemplo de enfardadora



Figura 4: Caminhão transportando os fardos de palha



Figura 5: Recolhimento da palha com forrageira

10. Experimento

A Usina Nova América, situada no oeste do Estado de São Paulo, realizou um experimento adotando o método III de recolhimento (item 9.3). Os resultados e a descrição mais detalhada do processo estão evidenciados a seguir.

10.1 Introdução

Este experimento objetivou avaliar o desempenho e a qualidade do material recolhido pela Forrageira modelo Jaguar 860 – Claas, a partir de resíduos da colheita mecanizada da cana crua (sem queima), aleirado e formando uma linha de alimentação para a máquina.

O teste foi realizado em terrenos argilosos, áreas de cana orgânica, próximos da usina, com raio médio de 6 km, objetivando a redução do custo do transporte e o acompanhamento futuro da incidência de pragas e ervas daninhas que pudessem influenciar negativamente o desempenho da cultura da cana.

O material recolhido foi destinado ao uso como combustível na caldeira para a produção de vapor.

10.2 Equipamentos utilizados

10.2.1 Aleiramento

Trator:

Valmet 785 – 80% da área trabalhada

Valmet 985 – 20% da área trabalhada

Implemento:

Prata 1000 mod. P200 – Largura 3,00m

D.M.B – Largura 3,00m

O implemento Prata mod. P200 mostrou que em terrenos irregulares não consegue oferecer qualidade no aleiramento, além de apresentar problemas em sua estrutura, tais como trincas.

O implemento D.M.B. conseguiu acompanhar as irregularidades do terreno, porém não teve bom desempenho para ajustar a quantidade de palha a ser retirada, ocasionando quebra dos “dedos” com muita frequência.

Desta maneira, é necessário buscar no mercado um implemento com tecnologia mais avançada, que possa acompanhar as irregularidades dos terrenos e desenvolver a operação de aleiramento com mais qualidade. A empresa Claas já está desenvolvendo um implemento que atende a essas necessidades.

10.2.2 Recolhimento da palha

Modelo Jaguar 860 – Claas, com motor de 435 HP e alimentador de 3,00m.

10.2.3 Transporte

Para transportar o material recolhido foram utilizados caminhões de uma transportadora prestadora de serviços para a usina. Estes possuem 4,00m de altura em relação ao solo e volume total de 54m³.

10.3 Rendimento dos equipamentos

10.3.1 Aleiramento

As atividades de aleiramento da palha tiveram início em agosto de 2001, e terminaram em meados de novembro do mesmo ano. A área total aleirada foi de aproximadamente 941 ha. O equipamento trabalhou em média 22,7 ha/h (operando em 2ª marcha), e apresentou um consumo de diesel próximo a 6 l/h.

10.3.2 Forrageira

Durante o período do experimento, a máquina operou por quase 600 horas. Deste total, aproximadamente 30 horas são atribuídas à locomoção (ida

e volta ao local de trabalho). Abaixo são mostrados alguns dados que resumem o processo.

- Produção total: 5.051 t de material recolhido
- Produção total por ha: 5,4 t/ha
- Rendimento: 8,4 t/h
- Consumo de diesel: 25,5 l/h

10.3.4 Transporte

Foram utilizados 5 caminhões para o transporte da palha recolhida. Detalhes do transporte:

- Raio médio distante da usina: 6 km
- Carga média: 4,95 t/viagem
- Tempo de carregamento: 35 min.
- Tempo do ciclo: 80 min
- Carga/hora: 1,7

O consumo de diesel não foi controlado pelo fato do transporte ter sido contratado via prestadora de serviços.

10.4 Observações gerais

1. A forrageira Jaguar 860 possui dispositivo detector de metais muito sensível, que em solos argilosos, como no caso do experimento, desarma o alimentados da máquina com muita frequência, pois este tipo de solo possui ferro em sua composição. Para melhorar o desempenho do equipamento, o dispositivo precisa ser melhor calibrado para torná-lo menos sensível. O técnico responsável pela operação da máquina fez um teste desligando o detector de metais, e com isso reduziu o tempo de carregamento para 10m min. Entretanto, durante a operação, um material metálico entrou no equipamento e danificou uma das facas. Isso fez com que a máquina ficasse parada durante mais de 3 horas para manutenção. Desta forma ficou claro que o detector de metais é imprescindível no processo.

De acordo com o proprietário da forrageira (prestador de serviço), o fabricante está desenvolvendo um novo detector de metais mais específico para o recolhimento da palha.

2. A vida média do jogo de facas superou as expectativas, suportando recolher em torno de 1.543 toneladas de palha. Foi preciso limpar a máquina várias vezes, devido ao acúmulo de terra no picador e nas paletas do ventilador.
3. A forrageira tem potencial para operar até 20 horas por dia, porém operou na faixa de 13 horas por dia, produzindo 8,4 t/h. Fatores climáticos impediram um melhor rendimento, como excesso de chuva e alto índice de umidade no terreno durante o período noturno, que impediu a realização do trabalho em dois turnos. Acredita-se que em períodos mais secos seja possível um melhor rendimento de horas máquina, podendo atingir até 160 toneladas por dia.
4. A forrageira Jaguar 860 operou em um período de 600 horas, não apresentando falhas mecânicas que mereçam destaque. O consumo de óleo diesel foi de 25,5 l/h, em média.
5. O índice de umidade do material recolhido foi de 23,3%, ou seja, 76,7% de matéria seca. O índice de impurezas foi de 7,8%.

10.5 Custos operacionais

De acordo com os dados fornecidos pela Usina Nova América, os custos envolvidos no recolhimento e transporte da palha estão descritos na tabela 7.

Tabela 7: Custos operacionais

Descrição das operações	R\$/t	Custo Total
Aleiramento da palha	3,30	16.668
Recolhimento da palha	13,13	66.294
Transporte da palha	6,50	32.832
Óleo diesel/lubrificantes	1,88	9.471
Aluguel de veículos	1,40	7.071
Acompanhamento técnico na lavoura	0,83	4.167
Transporte de máquinas	0,25	1.263
Peças de reposição	3,98	20.078
TOTAL	R\$ 31,25	R\$ 157.844

11. Ciclo termodinâmico

A planta energética instalada na Usina Nova América funciona conforme o ciclo termodinâmico de Rankine. Este ciclo pode ser resumido em quatro processos, os quais ocorrem em regime permanente. São eles:

- 1-2 Processo de bombeamento adiabático e reversível;
- 2-3 Transferência de calor a pressão constante, na caldeira;
- 3-4 Expansão adiabática e reversível do vapor na turbina;
- Transferência de calor a pressão constante no condensador (no caso da Usina, o processo industrial pode ser representado como um grande trocador de calor).

. A figura 6 abaixo ilustra, de modo simplificado, o ciclo encontrado na Usina.

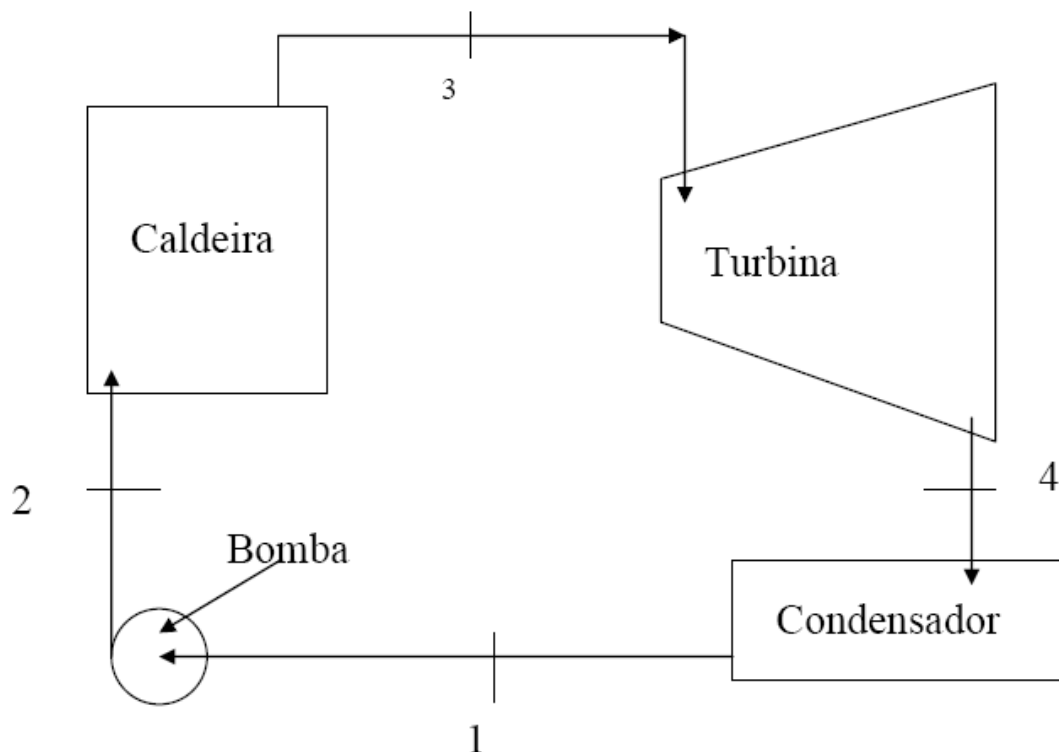


Figura 6: Ciclo de Rankine

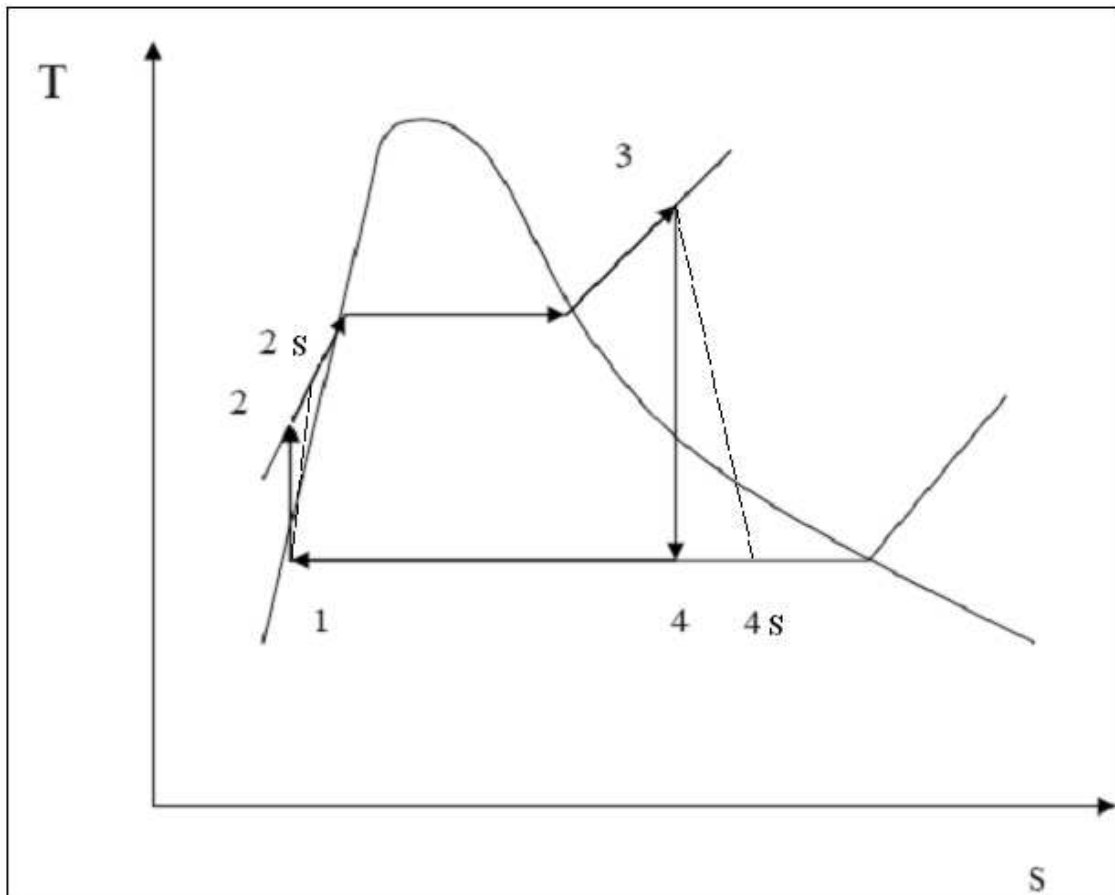


Figura 7: Diagrama T-s do ciclo de Rankine

Como ocorre em todo processo real, o ciclo termodinâmico apresenta algumas ineficiências. Estas estão presentes em praticamente todos os processos do ciclo. As perdas mais importantes são:

- Perdas na turbina

As perdas principais na turbina são aquelas associadas ao escoamento do fluido de trabalho através dos canais e palhetas da turbina. A transferência de calor para o meio também representa uma das perdas, mas, normalmente, não é significativa. É importante ressaltar que as perdas na turbina são muito importantes no afastamento do ciclo real em relação ao ideal. O diagrama T-s indicado na figura 7 mostra os processos de expansão que ocorrem na turbina real e na ideal. O ponto 4s do diagrama representa o estado após uma expansão isoentrópica e o ponto 4 representa o estado real do vapor na saída da turbina. Os sistemas de controle também podem provocar uma perda na

turbina, particularmente se for usado um processo de estrangulamento para controlar a turbina.

- Perdas na bomba:

As perdas na bomba são análogas àsquelas da turbina e decorrem principalmente das irreversibilidades associadas ao escoamento do fluido. A transferência de calor é, usualmente, uma perda secundária. O diagrama T-s representado pela figura 7 mostra os processos que ocorrem em uma bomba real e em uma ideal. É possível notar que o estado final do processo de bombeamento isoentrópico é representado pelo ponto 2_s e que o estado final do processo real é representado pelo ponto 2. É importante observar que as perdas na bomba são muito menores do que aquelas relativas à operação da turbina porque a potência utilizada no acionamento das bombas é muito menor do que a potência produzida nas turbinas.

- Perdas nas tubulações:

A perda de carga, provocada pelo atrito, e a transferência de calor ao ambiente são as perdas mais importantes nas tubulações. Tanto a perda de carga como a transferência de calor provocam uma diminuição da disponibilidade do vapor que entra na turbina.

- Perdas no condensador:

As perdas no condensador são relativamente pequenas. Uma dessas perdas é o resfriamento abaixo da temperatura de saturação do líquido que deixa o condensador. Isso representa uma perda, pois é necessário que ocorra uma troca de calor adicional para trazer a água até sua temperatura de saturação.

12. EQUACIONAMENTO DO CICLO DE RANKINE

12.1 Compressão isoentrópica na bomba:

O fluido de trabalho neste ciclo é a água, que entra como líquido saturado e sai como líquido comprimido. Da primeira Lei aplicada a um volume de controle operando em regime permanente, por unidade de massa:

$$Q_{1-2s} = W_{1-2s} + (h_{2s} - h_1) + \left(\frac{V_{2s}^2 - V_1^2}{2} \right) + g \cdot (Z_{2s} - Z_1) \quad (1)$$

Desprezando-se a variação da energia cinética e potencial e sendo o calor trocado na bomba ideal igual a zero, teremos:

$$W_{1-2s} = (h_1 - h_{2s}) \quad (2)$$

Desprezando-se a variação da energia cinética e potencial e sendo o calor trocado na bomba ideal igual a zero, teremos:

$$T \cdot ds = dh - v \cdot dp \quad (3)$$

Sendo isoentrópico o processo na bomba ideal, teremos:

$$\begin{aligned} ds &= 0 \\ dh &= v \cdot dp \end{aligned} \quad (4)$$

Integrando a equação (4) teremos:

$$(h_{2s} - h_1) = v_1 \cdot (p_{2s} - p_1) \quad (5)$$

Substituindo (5) em (2), teremos o trabalho da bomba:

$$W_{b_iso} = W_{1-2s} = v_1 \cdot (p_1 - p_{2s}) \quad (6)$$

Considerando agora o caso real, ou seja, no qual o processo de bombeamento não é reversível, é possível determinar o rendimento da bomba da seguinte maneira:

$$\eta_b = \frac{W_{1-2s}}{W_{1-2}}, \quad (7)$$

Sendo W_{1-2} o trabalho real de bombeamento do fluido, que é obtido pela seguinte equação:

$$W_b = W_{1-2} = (h_1 - h_2) \quad (8)$$

12.2 Adição de calor a pressão constante na caldeira:

Da primeira Lei aplicada a um volume de controle operando em regime permanente:

$$Q_{2-3} = W_{2-3} + (h_3 - h_2) + \left(\frac{V_3^2 - V_2^2}{2} \right) + g.(Z_3 - Z_2) \quad (9)$$

Desprezando-se a variação da energia cinética e potencial e sendo zero o trabalho na caldeira, teremos:

$$Q_h = Q_{2-3} = (h_3 - h_2) \quad (10)$$

12.3 Trabalho produzido na turbina:

Da primeira Lei aplicada a um volume de controle operando em regime permanente:

$$Q_{3-4s} = W_{3-4s} + (h_{4s} - h_3) + \left(\frac{V_{4s}^2 - V_3^2}{2} \right) + g.(Z_{4s} - Z_3) \quad (9)$$

Desprezando-se a variação da energia cinética e potencial e sendo o calor trocado na turbina ideal igual a zero, teremos:

$$W_{t_iso} = W_{3-4s} = (h_3 - h_{4s}) \quad (10)$$

Assim como considerado no cálculo de rendimento da bomba, pode-se determinar o rendimento da turbina de modo semelhante, conforme equação abaixo:

$$\eta_t = \frac{W_{3-4}}{W_{3-4s}}, \quad (11)$$

Sendo W_{3-4} o trabalho real realizado pela turbina, que é obtido pela seguinte equação:

$$W_t = W_{3-4} = (h_3 - h_4) \quad (12)$$

12.4 Rejeição de calor no condensador:

Da primeira Lei aplicada a um volume de controle operando em regime permanente:

$$Q_{4-1} = W_{4-1} + (h_1 - h_4) + \left(\frac{V_1^2 - V_4^2}{2} \right) + g \cdot (Z_1 - Z_4) \quad (13)$$

Desprezando-se a variação da energia cinética e potencial e sendo zero o trabalho no condensador, teremos:

$$Q_L = Q_{4-1} = (h_1 - h_4) \quad (14)$$

12.5 Rendimento térmico do ciclo de Rankine:

$$\eta_T = \frac{W_{liq}}{Q_H} = \frac{W_t + W_b}{Q_H}$$

$$\eta_T = \frac{(h_3 - h_4) + (h_1 - h_2)}{(h_3 - h_2)} = \frac{(h_3 - h_2) + (h_1 - h_4)}{(h_3 - h_2)}$$

$$\eta_T = 1 + \frac{(h_1 - h_4)}{(h_3 - h_2)} \quad (15)$$

13. EQUACIONAMENTO DO CICLO REAL DA USINA

Para realizar o equacionamento, para posterior simulação do ciclo termodinâmico real instalado na Usina Nova América, é necessário que sejam feitas algumas considerações importantes. Para isso, será feita uma simplificação do processo, resumindo-o em dois ciclos de Rankine adaptados. A planta energética completa está ilustrada na figura 8.

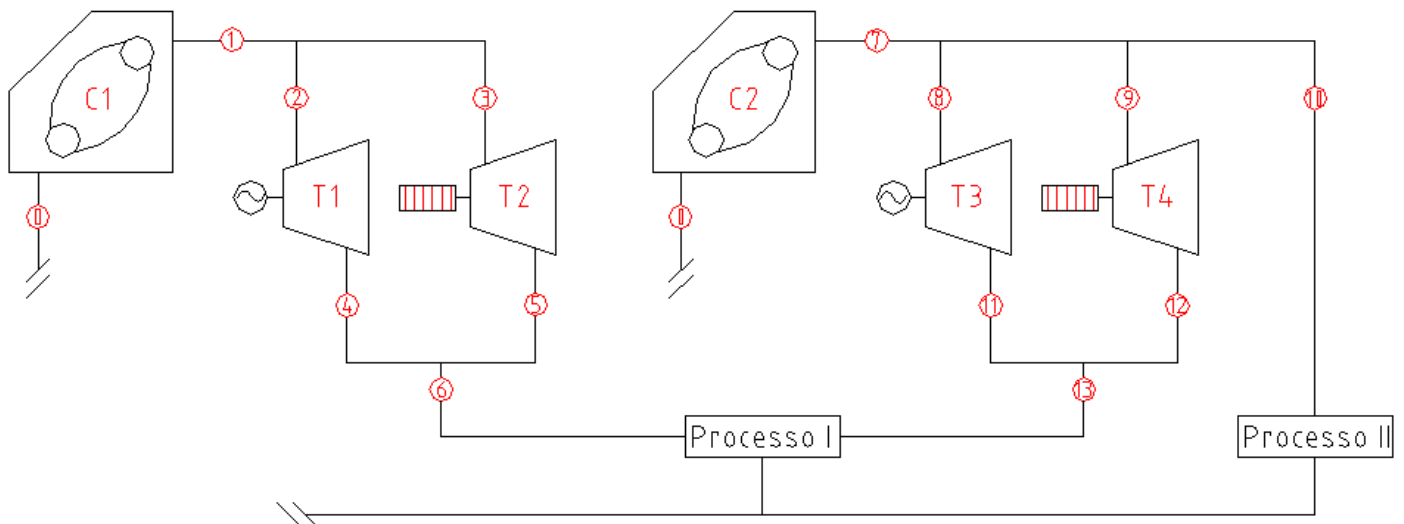


Figura 8 - Planta energética

13.1 Ciclo I

Este ciclo possui uma caldeira que opera com vapor a uma pressão de 43 bar. Uma parte do vapor vindo da caldeira é destinada a um conjunto de turbinas e turbo-bombas responsáveis pelo acionamento de equipamentos mecânicos. A parcela restante de vapor é expandida em uma turbina a contrapressão, que por sua vez está acoplada a um gerador elétrico. A energia elétrica produzida é destinada para suprir a demanda interna da Usina, e o restante é vendido à concessionária local de distribuição de energia. A figura 9 abaixo representa o ciclo I.

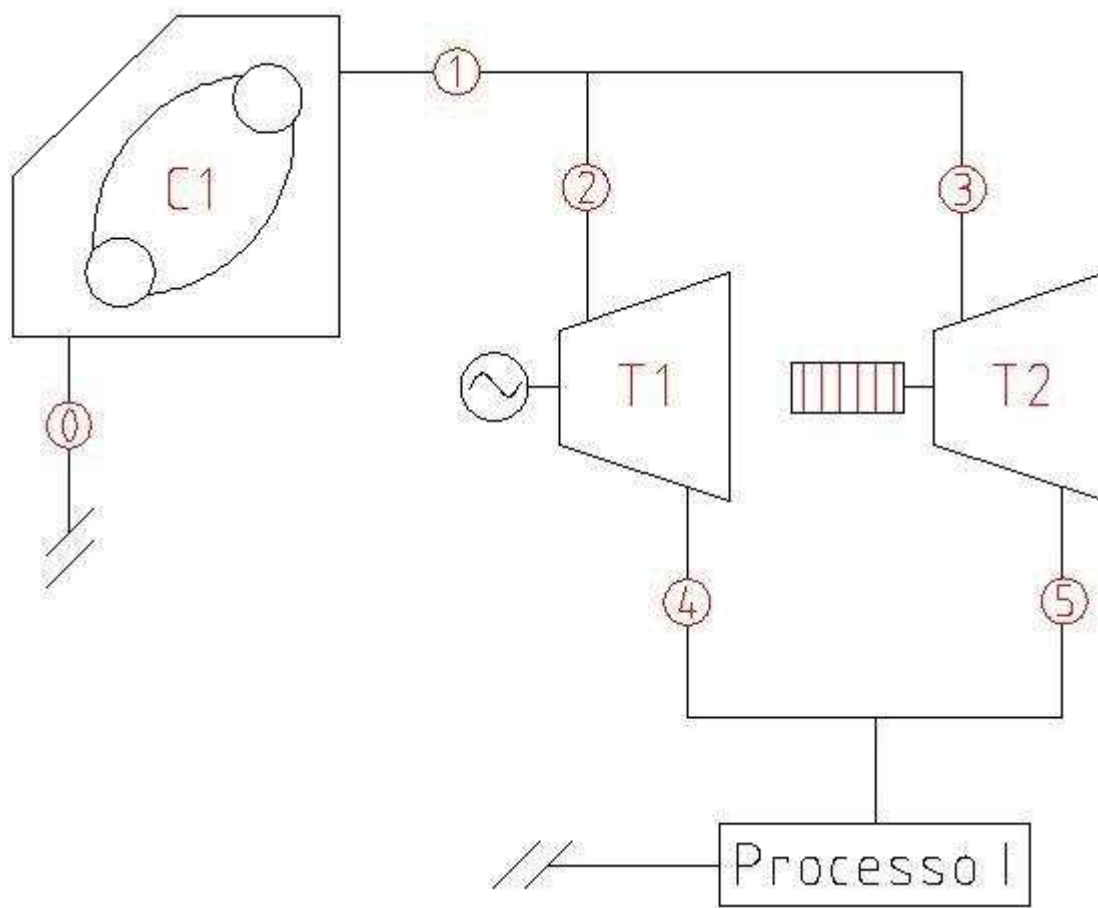


Figura 9 : Ciclo I

A água entra na caldeira C1 a 110 °C e a 43 bar. O combustível utilizado é o bagaço da cana-de-açúcar, que é consumido a uma taxa de 18 kg/s. A caldeira apresenta um rendimento de aproximadamente 90%, desta maneira

uma parcela da energia liberada na combustão do bagaço é perdida para o ambiente.

Na saída da caldeira (ponto 1) o vapor superaquecido está a 400°C e a mesma pressão da entrada (ponto 0). A linha de vapor desse processo é composta, resumidamente, de dois caminhos. Um leva uma parcela do vapor para a turbina (T1) responsável pelo acionamento de um gerador elétrico. A parcela restante é destinada a um conjunto de turbo-bombas, que faz o bombeamento da água, e também a cinco turbinas, que acionam a moenda da usina.

O vapor extraído dos dois conjuntos (T1 e T2) está a uma temperatura de 145 °C e pressão de 2,5 bar. Este vapor é consumido em diversos processos da usina, como por exemplo, em evaporadores e outros sistemas de troca de calor.

O trabalho realizado pela turbina T1 (acoplada a um gerador) é de 12,25 MW, com um rendimento isoentrópico de 73%. O anexo I contém as equações de balanço de massa e energia correspondentes aos pontos ilustrados na figura do ciclo I.

Neste ciclo, o único combustível utilizado foi o bagaço. Quando, além do bagaço, utiliza-se também a palha da cana-de-açúcar como combustível adicional, tem-se um aumento na taxa de geração de energia, pois o trabalho realizado de 16,41 MW é superior ao anterior. As equações do ciclo encontram-se no anexo I.

Desta maneira, a diferença entre o trabalho gerado quando utilizado o combustível palha+bagaço e somente bagaço é de 4,17 MW. A viabilidade econômica desse excedente de energia será analisada posteriormente.

13.2 Ciclo II

Este ciclo é similar ao anterior. Possui um conjunto de cinco caldeiras que operam com vapor a uma pressão de 22 bar. Uma parte do vapor vindo das caldeiras é destinada a um conjunto de turbinas e turbo-bombas responsáveis pelo acionamento de equipamentos mecânicos. Uma outra parcela de vapor é expandida em uma turbina a contrapressão, que por sua vez está acoplada a um gerador elétrico. O restante do vapor é consumido em processos da usina. A figura 10 abaixo representa o ciclo II.

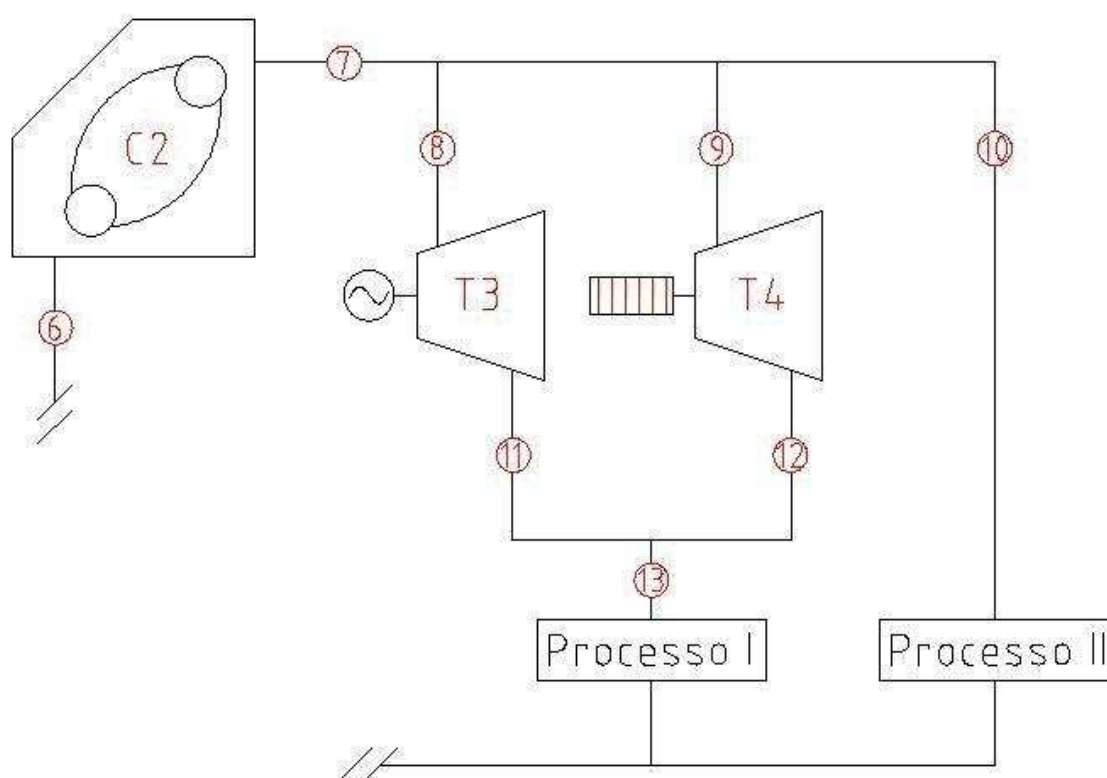


Figura 10 : Ciclo II

O ciclo II possui turbinas que apresentam rendimento inferior às do ciclo I. Com isso, a palha será queimada somente no ciclo I, visto que suas turbinas apresentam melhor desempenho. As equações referentes ao ciclo II encontram-se no anexo II.

14. Viabilidade

Muitas usinas do setor sucroalcooleiro, como já foi mencionado algumas vezes neste trabalho, produzem energia elétrica. Esta é utilizada para suprir a demanda interna, e o restante é vendido às concessionárias que administram a distribuição de eletricidade da região.

Segundo informações obtidas com o Ministério de Minas e Energia, o preço de venda pago às usinas pela energia elétrica produzida é de R\$93,77 por MWh.

Desta maneira, o preço de venda da energia excedente de 4,17 MW é de R\$390,83. Considerando que o consumo da palha é de 2 kg/s, em uma hora serão consumidos 7,2 t, com custo total de R\$225,00, visto que o custo por tonelada de palha recolhida é de R\$31,25. Portanto, a diferença entre o preço de venda (R\$390,83) e o custo (R\$225,00) é de R\$165,83/h. A tabela abaixo resume os valores discutidos anteriormente.

	Bagaço	Bagaço + Palha
Energia produzida [MWh]	12,25	16,41
Energia consumida [MWh]	12,25	12,25
Energia vendida [MWh]	-	4,17
Preço de venda R\$/h	-	390,83
Custo adicional R\$/h	-	225,00
Lucro R\$/h	-	165,83

Figura 11: Análise econômica

15. Conclusão

Existe grande disponibilidade de palha na lavoura, visto que 14% da cana-de-açúcar é constituído de palha, e conseqüentemente muita energia é desperdiçada, pois este potencial energético não é aproveitado. Aliado a isto, é observada uma crescente demanda de energia elétrica, e pouco investimento no setor energético.

Desta maneira, o excedente de energia gerada pela Usina, que no caso analisado é de 4,17 MWh, pode ser vendido às concessionárias que controlam a geração e distribuição de energia elétrica da região. Com isso, a Usina pode lucrar aproximadamente R\$166,00 por hora, visto que o preço de venda estabelecido pelo governo pelo MWh é de R\$93,77.

A co-geração de energia vem sendo utilizada pelas usinas do setor sucroalcooleiro. Por outro lado não há políticas estabelecidas para o setor, como financiamento de máquinas e equipamentos, além da falta de garantia do preço para comercialização da energia elétrica.

Mesmo assim, a exploração da palha de cana-de-açúcar é uma grande oportunidade de negocio para o setor sucroalcooleiro. É preciso que haja um comprometimento entre governo e usinas produtoras de açúcar e álcool, visando um aproveitamento sustentável dessa biomassa disponível na lavoura da cana.

16. Anexo I

Ciclo I – bagaço

- Entre 0 e 1:

$$m_{\text{bagaço1}}=13\text{kg/s}$$

$$\text{PCI}_{\text{bagaço}}=7500\text{kJ/kg}$$

$$T_0=110\text{ }^{\circ}\text{C e } P_0=43\text{ bar}$$

$$T_1=400\text{ }^{\circ}\text{C e } P_1=43\text{ bar}$$

$$\eta_{\text{caldeira}}=90\%$$

$$Q_{01} = m_{\text{bagaço1}} \cdot \text{PCI}_{\text{bagaço}} \cdot \frac{\eta_{\text{caldeira}}}{100}$$

$$h_1 = h(\text{'Steam'}; T=T_1; P=P_1)$$

$$h_0 = h(\text{'Steam'}; T=T_0; P=P_0)$$

$$m_1 = \frac{Q_{01}}{h_1 - h_0}$$

Os resultados das equações acima são os seguintes:

$$Q_{01}=87,75\text{MW}$$

$$m_1=31,98\text{ kg/s}$$

- Entre 2 e 4:

$$T_2=400\text{ }^{\circ}\text{C e } P_2=43\text{ bar}$$

$$T_4=145\text{ }^{\circ}\text{C e } P_4=2,5\text{ bar}$$

$$m_2=m_1-m_3$$

$$m_3=5\text{ kg/s}$$

$$h_2 = h(\text{'Steam'}; P=P_2; T=T_2)$$

$$h_4 = h(\text{'Steam'}; P=P_4; T=T_4)$$

$$w_1 = m_2 \cdot (h_2 - h_4)$$

$$s_2 = s(\text{'Steam'}; P=P_2; T=T_1)$$

$$h_{4s} = h(\text{'Steam'}; P=P_4; s=s_2)$$

$$w_{1s} = m_2 \cdot (h_2 - h_{4s})$$

$$n_{1s} = \frac{W_1}{W_{1s}} \cdot 100$$

Os resultados das equações acima são os seguintes:

$$m_2=26,98 \text{ kg/s}$$

$$W_1=12,25 \text{ MW}$$

$$n_{1s}=73,1 \%$$

- Entre 3 e 5:

$$T_3=400 \text{ °C e } P_3=43 \text{ bar}$$

$$T_5=145 \text{ °C e } P_5=2,5 \text{ bar}$$

$$m_3=5 \text{ kg/s}$$

$$h_3 = h ('Steam' ; P = P_3 ; T = T_3)$$

$$h_5 = h ('Steam' ; P = P_5 ; T = T_5)$$

$$W_2 = m_3 \cdot (h_3 - h_5)$$

$$s_3 = s ('Steam' ; P = P_3 ; T = T_1)$$

$$h_{5s} = h ('Steam' ; P = P_5 ; s = s_3)$$

$$W_{2s} = m_3 \cdot (h_3 - h_{5s})$$

$$n_{2s} = \frac{W_2}{W_{2s}} \cdot 100$$

Os resultados das equações acima são os seguintes:

$$W_2=2,27 \text{ MW}$$

$$n_{2s}=73,1 \%$$

Ciclo I – palha + bagaço

- Entre 0 e 1:

$$m_{\text{bagaço}1}=13\text{kg/s}$$

$$PCI_{\text{bagaço}}=7500\text{kJ/kg}$$

$$m_{\text{palha}1}=2 \text{ kg/s}$$

$$PCI_{\text{palha}}=7500\text{kJ/kg}$$

$T_0=110\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $P_0=43\text{ bar}$

$T_1=400\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $P_1=43\text{ bar}$

$\eta_{\text{caldeira}}=90\%$

$$Q_{01} = m_{\text{bagaço}01} \cdot \text{PCI}_{\text{bagaço}} \cdot \frac{\eta_{\text{caldeira}}}{100}$$

$$h_1 = h(\text{'Steam'}; T=T_1; P=P_1)$$

$$h_0 = h(\text{'Steam'}; T=T_0; P=P_0)$$

$$m_1 = \frac{Q_{01}}{h_1 - h_0}$$

Os resultados das equações acima são os seguintes:

$Q_{01}=112,95\text{ MW}$

$m_1=41,17\text{ kg/s}$

- Entre 2 e 4:

$T_2=400\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $P_2=43\text{ bar}$

$T_4=145\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $P_4=2,5\text{ bar}$

$m_2=m_1-m_3$

$m_3=5\text{ kg/s}$

$$h_2 = h(\text{'Steam'}; P=P_2; T=T_2)$$

$$h_4 = h(\text{'Steam'}; P=P_4; T=T_4)$$

$$w_1 = m_2 \cdot (h_2 - h_4)$$

$$s_2 = s(\text{'Steam'}; P=P_2; T=T_1)$$

$$h_{4s} = h(\text{'Steam'}; P=P_4; s=s_2)$$

$$w_{1s} = m_2 \cdot (h_2 - h_{4s})$$

$$\eta_{1s} = \frac{w_1}{w_{1s}} \cdot 100$$

Os resultados das equações acima são os seguintes:

$m_2=36,17\text{ kg/s}$

$w_1=16,41\text{ MW}$

$\eta_{1s}=73,1\%$

- Entre 3 e 5:

$T_3=400\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $P_3=43\text{ bar}$

$T_5=145\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $P_5=2,5\text{ bar}$

$m_3=5\text{ kg/s}$

$$h_3 = h ('Steam' ; P = P_3 ; T = T_3)$$

$$h_5 = h ('Steam' ; P = P_5 ; T = T_5)$$

$$w_2 = m_3 \cdot (h_3 - h_5)$$

$$s_3 = s ('Steam' ; P = P_3 ; T = T_1)$$

$$h_{5s} = h ('Steam' ; P = P_5 ; s = s_3)$$

$$w_{2s} = m_3 \cdot (h_3 - h_{5s})$$

$$n_{2s} = \frac{w_2}{w_{2s}} \cdot 100$$

Os resultados das equações acima são os seguintes:

$w_2=2,27\text{ MW}$

$n_{2s}=73,1\text{ \%}$

17. Anexo II

Ciclo II - bagaço

- Entre 6 e 7:

$$m_{\text{bagaço2}} = 31,5 \text{ kg/s}$$

$$PCI_{\text{bagaço}} = 7500 \text{ kJ/kg}$$

$$T_6 = 110 \text{ °C e } P_6 = 22 \text{ bar}$$

$$T_7 = 300 \text{ °C e } P_7 = 22 \text{ bar}$$

$$m_9 = 56,11 \text{ kg/s}$$

$$m_{10} = 3,88 \text{ kg/s}$$

$$\eta_{\text{caldeira}} = 90\%$$

$$Q_{67} = m_{\text{bagaço2}} \cdot PCI_{\text{bagaço}} \cdot \frac{\eta_{\text{caldeira}}}{100}$$

$$h_7 = h(\text{'Steam'}; T = T_7; P = P_7)$$

$$h_6 = h(\text{'Steam'}; T = T_6; P = P_6)$$

$$m_7 = \frac{Q_{67}}{h_7 - h_6}$$

$$m_8 = m_7 - m_9 - m_{10}$$

Os resultados das equações acima são os seguintes:

$$Q_{67} = 212,62 \text{ MW}$$

$$m_7 = 83,25 \text{ kg/s}$$

- Entre 8 e 11:

$$T_8 = 300 \text{ °C e } P_{11} = 22 \text{ bar}$$

$$T_{11} = 145 \text{ °C e } P_8 = 2,5 \text{ bar}$$

$$m_8 = 23,26 \text{ kg/s}$$

$$h_8 = h(\text{'Steam'}; P = P_8; T = T_8)$$

$$h_{11} = h(\text{'Steam'}; P = P_{11}; T = T_{11})$$

$$w_3 = m_8 \cdot (h_8 - h_{11})$$

$$s_8 = s(\text{'Steam'}; P = P_8; T = T_8)$$

$$h_{11s} = h(\text{'Steam'}; P = P_{11}; s = s_8)$$

$$w_{3s} = m_8 \cdot (h_8 - h_{11s})$$

$$n_{3s} = \frac{w_3}{w_{3s}} \cdot 100$$

Os resultados das equações acima são os seguintes:

$$W_3=6,11\text{MW}$$

$$n_{2s}=60,21 \%$$

- Entre 9 e 12:

$$T_9=300 \text{ }^\circ\text{C e } P_9=22 \text{ bar}$$

$$T_{12}=145 \text{ }^\circ\text{C e } P_{12}=2,5 \text{ bar}$$

$$m_9=56,11 \text{ kg/s}$$

$$h_9 = h ('Steam' ; P = P_9 ; T = T_9)$$

$$h_{12} = h ('Steam' ; P = P_{12} ; T = T_{12})$$

$$w_4 = m_9 \cdot (h_9 - h_{12})$$

$$s_4 = s ('Steam' ; P = P_9 ; T = T_9)$$

$$h_{12s} = h ('Steam' ; P = P_{12} ; s = s_4)$$

$$w_{4s} = m_9 \cdot (h_9 - h_{12s})$$

$$n_{4s} = \frac{w_4}{w_{4s}} \cdot 100$$

Os resultados das equações acima são os seguintes:

$$W_4=14,7 \text{ MW}$$

$$n_{4s}=60,21 \%$$

18. Referências

ANEEL, Ministério de Minas e Energia. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/> > Acesso em Maio de 2006.

Brasil. Ministério de Minas e Energia. **Balanço energético nacional**. Disponível em: <<http://ftp.mme.gov.br/Pub/Balanco/BEN/Portugues>> Acesso em Maio de 2006.

CAMARGO, Carlos Augusto de. **Conservação de energia na indústria do açúcar e do álcool**, São Paulo: Ipt, 1990.

CONAB, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Disponível em: < http://www.conab.gov.br/download/safra/Primeiro_Levantamento_Cana_2006-07_maio06.pdf > Acesso em Maio de 2006.

CTC. **Centro de Tecnologia Canavieira**. Disponível em: < <http://www.ctc.com.br/php/pagina.php?doc=home> > Acesso em Abril de 2006.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**, 5ª Edição, Rio de Janeiro: LTC, 2003.

UNICA. **União da Agroindústria Canavieira de São Paulo**. Disponível em: < <http://www.portalunica.com.br/portalunica/> > Acesso em Março de 2006.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica**, São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2003.

T.C.C. RIPOLI; M.L.C. RIPOLI. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**, Piracicaba, 2004.

COPERSUCAR. Disponível em www.copersucar.com.br Acesso em Junho de 2006