

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

ALTERNATIVAS PARA A COGERAÇÃO DE ENERGIA EM UMA
INDÚSTRIA DE CHAPAS DE FIBRA DE MADEIRA

VANTUIR BAPTISTA PEREIRA JÚNIOR
Engenheiro Mecânico

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas do Campus de Botucatu – UNESP, para obtenção do título de Mestre em Agronomia, Área de Concentração em Energia na Agricultura

BOTUCATU – SP
Julho – 2001

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU**

**ALTERNATIVAS PARA A COGERAÇÃO DE ENERGIA EM UMA
INDÚSTRIA DE CHAPAS DE FIBRA DE MADEIRA**

VANTUIR BAPTISTA PEREIRA JÚNIOR
Engenheiro Mecânico

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas do Campus de Botucatu – UNESP, para obtenção do título de Mestre em Agronomia, Área de Concentração em Energia na Agricultura

BOTUCATU – SP
Julho – 2001

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU**

**ALTERNATIVAS PARA A COGERAÇÃO DE ENERGIA EM UMA
INDÚSTRIA DE CHAPAS DE FIBRA DE MADEIRA**

VANTUIR BAPTISTA PEREIRA JÚNIOR
Engenheiro Mecânico

PROF. DR. LUIZ GONZAGA DE SOUZA
(Orientador)

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas do Campus de
Botucatu – UNESP, para obtenção do título
de Mestre em Agronomia, Área de
Concentração em Energia na Agricultura

BOTUCATU – SP
Julho – 2001

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “ALTERNATIVAS PARA A COGERAÇÃO DE ENERGIA EM UMA
INDUSTRIA DE CHAPAS DE FIBRA DE MADEIRA”

AUTOR: VANTUIR BAPTISTA PEREIRA JÚNIOR

ORIENTADOR: **PROF. DR. LUIZ GONZAGA DE SOUZA**

Aprovado pela Comissão Examinadora

PROF.

PROF.

PROF.

PROF.

PROF.

Data da Realização:

Aos meus pais e a

minha irmã que sempre

torceram por mim, todo meu

respeito, carinho e admiração.

Aos meus queridos sogro e sogra.

À minha esposa e aos meus

filhos Bianca, Bárbara

e Bruno, de todo coração.

Dedico

AGRADECIMENTO ESPECIAL

Ao Prof. Dr. Luiz Gonzaga de
Souza que sempre esteve
presente de maneira valiosa,
amiga e sábia.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só se fez possível graças à colaboração direta e indireta de muitas pessoas, às quais sou eternamente grato. Dentre todos que me ajudaram destaco:

- Duratex S.A. de Botucatu pela possibilidade de permitir a minha frequência às aulas das disciplinas que cursei, e por acreditar que o conhecimento e o aperfeiçoamento do ser humano são parte do caminho e da construção de dias melhores.
- Ao Engº Carlos Alberto Popolo pelo apoio e pelo voto de confiança depositado nesta empreitada.
- Aos professores do curso de pós-graduação da Área de Energia na Agricultura pelos valiosos ensinamentos recebidos.
- Aos funcionários da seção de pós-graduação, pela paciência, atenção e prestatividade.
- A todos os colegas pelo apoio e pela possibilidade do convívio e da amizade.
- A Sandra Cristina Casagrandi Courbassier, pelo apoio e pela valiosa ajuda prestada.

Entre o possível e o impossível existe uma fronteira, a qual movemos e expandimos a cada dia, com muita luta, dedicação e trabalho. Se pararmos ela nos engole e tudo se torna impossível...

O Autor

Julho/2001

SUMÁRIO

	Página
1 RESUMO.....	10
2 INTRODUÇÃO.....	12
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	17
3.1 Crescimento econômico e consumo de energia	17
3.2 Setor elétrico	19
3.3 Produção de energia elétrica junto ao setor de papel e celulose e sucro alcooleiro	23
3.4 Experiências e perspectivas mundiais do uso de biomassa.....	26
3.5 O uso da biomassa florestal como fonte de energia	29
3.6 Geração de resíduos na indústria madeireira	32
3.7 Tecnologias de produção de energia a partir da biomassa	34
3.7.1 Sistemas a vapor.....	34
3.7.2 Gaseificação	36
3.7.2.1 Ciclo simples de turbina a gás (CS).....	42
3.7.2.2 Turbina a gás com injeção de vapor (ISTG)	42
3.7.2.3 Turbina a gás com injeção de vapor e resfriamento intermediário (ISTIG)	43
3.7.2.4 Ciclo combinado – turbina a gás e turbina a vapor (CC)	43
4 MATERIAL E MÉTODO	44
4.1 Material.....	44
4.1.1 Fábrica de chapas de fibra dura (hardboard).....	44
4.1.2 Dados de consumo de energia elétrica e produção de chapas de fibra.....	45
4.1.3 Geração de resíduos.....	46
4.1.3.1 Cascas de eucalipt	46
4.1.3.2 Pó de lixamento, corte e refilo de chapas de fibra	47
4.1.3.3 Chapas refugadas	47
4.1.4 Consumo de combustíveis.....	48
4.1.5 Ciclos termodinâmicos.....	48
4.1.5.1 Ciclo termodinâmico existente	48
4.1.5.2 Ciclo termodinâmico proposto utilizando os resíduos disponíveis e turbina a vapor.....	50
4.1.5.3 Ciclo termodinâmico proposto utilizando gás natural e resíduos do processo.....	53
4.2 Métodos.....	55

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1 Fluxograma de produção	56
5.2 Quantificação dos resíduos gerados no processo de fabricação	58
5.2.1 Cascas de eucalipto	58
5.2.2 Pó de lixamento, corte e refilo de chapas de fibra	58
5.2.3 Chapas refugadas	58
5.3 Qualificação dos resíduos gerados	59
5.3.1 Cálculo do poder calorífico efetivo dos resíduos e dos cavacos de eucalipto (em base seca)	59
5.3.1.1 Cascas de eucalipto	59
5.3.1.2 Pó de lixamento, serra e chapas refugadas	60
5.3.1.3 Cavacos de eucalipto	61
5.4 Dados e parâmetros do ciclo termodinâmico atual	62
5.5 Ciclo termodinâmico proposto utilizando os resíduos disponíveis e turbina a vapor	63
5.5.1 Quantidade de vapor que pode se obter com a queima de resíduos	63
5.5.1.1 Vapor que pode ser obtido com a queima de cascas	63
5.5.1.2 Vapor que pode ser obtido com a queima de pó de lixamento, serras e chapas refugadas	64
5.5.2 Quantidade de cavacos necessários para complementação da matriz de combustíveis	64
5.5.2.1 Cálculo do consumo de vapor na turbina	65
5.5.3 Análise econômico-financeira	67
5.5.3.1 Análise pelo método do valor presente (em 10 anos)	69
5.5.3.2 Cálculo da T.I.R (taxa interna retorno)	70
5.6 Ciclo termodinâmico proposto utilizando gás natural e resíduos do processo	71
5.6.1 Vapor que pode ser obtido através da queima dos resíduos	71
5.6.2 Vapor que pode ser obtido através do aproveitamento dos gases de saída da turbina	72
5.6.3 Análise econômico-financeira	73
5.6.3.1 Análise pelo método do valor presente (em 10 anos)	75
5.6.3.2 Cálculo da T.I.R. (taxa interna retorno)	76
6 CONCLUSÕES	77
7 SUMMARY	80
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
APÊNDICE A	86
APÊNDICE B	95
APÊNDICE C	99

1. RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o potencial de geração de energia a partir dos resíduos em uma fábrica de painéis de fibra de madeira, e através dos mesmos promover a cogeração e a geração própria de energia elétrica, melhorando assim a competitividade de seus produtos através da redução de custos e ao mesmo tempo, contribuindo para a expansão da base de geração de energia elétrica no país.

Para a realização do trabalho foram obtidos dados de produção de chapas da unidade fabril da Empresa Duratex de Botucatu no período de 1998 a maio de 2001, bem como o consumo de energia elétrica neste período. Foram coletados, também, dados para a quantificação de resíduos decorrentes do processo de fabricação de chapas, sua análise química e verificação do poder calorífico.

Os dados referentes aos resíduos permitiram estimar a quantidade de vapor que se obtém através da queima dos mesmos como combustível em caldeiras.

Os dados obtidos junto ao processo de fabricação, referentes ao consumo de vapor, no período em questão (1998 a maio de 2001), possibilitaram determinar também a necessidade de energia térmica no processo de fabricação de chapas de fibra.

Frente às necessidades de energia térmica e elétrica determinadas, foram estudadas alternativas de cogeração de energia com a utilização de gás natural (para queima em turbinas a gás) e biomassa, aliadas à queima dos resíduos.

Foi possível avaliar os investimentos propostos sob o aspecto econômico pela análise do valor presente e pela taxa interna de retorno.

A cogeração através da utilização de gás natural, aliado à queima de resíduos para a produção vapor saturado, para aquecimento, mostrou-se a alternativa mais indicada. A complementação da matriz energética com biomassa oriunda de florestas de eucalipto, em substituição ao óleo combustível, necessita de grandes áreas plantadas.

Verificou-se ainda que, com o preço da energia elétrica praticada no mercado, tanto os investimentos para cogeração a partir da utilização de biomassa, quanto pela utilização de gás natural são desfavoráveis, salvo se o custo da energia elétrica assumir valores maiores que US\$ 47,46/MWh no caso da utilização apenas de biomassa, US\$ 44,70/MWh para a utilização de gás natural e resíduos, ou a falta de fornecimento da mesma vier a ocorrer.

2. INTRODUÇÃO

A crise de combustíveis derivados de petróleo na década de 1970, levou o governo brasileiro, na época, a estimular a conservação de energia e a incentivar o aproveitamento inteligente e racional dos insumos energéticos. Dada a diminuição dos investimentos públicos no setor elétrico, bem aquém do necessário para satisfazer a demanda, o risco de racionamento de energia elétrica se torna cada vez maior. Este alerta vem recebendo receptividade nos setores industriais, que estão se precavendo através de autogeração de energia elétrica ou da cogeração, que pode ser otimizada com a operação em paralelo junto à concessionária local (Wehr et al, 1992).

Muitos processos industriais em plantas químicas de papel e celulose, açúcar e álcool, alimentícias e inúmeras outras, demandam energia térmica (em forma de vapor) e energia elétrica. Impulsionados pelos crescentes custos dos insumos energéticos, quer dos combustíveis utilizados na geração de vapor, quer de energia elétrica comprada das

concessionárias, as indústrias devem permanentemente buscar a forma mais econômica de utilização de energia.

A cogeração de energia, ou seja a produção simultânea de energia térmica e elétrica a partir de uma fonte primária de energia, é uma forma racional e econômica de otimização de recursos. Segundo IPESI (2001), o governo federal, através da Agência Nacional de Energia Elétrica-ANEEL, vem agindo no sentido de retirar os obstáculos que inibiam os investimentos dos produtores independentes em projetos de cogeração de energia elétrica. A desregulamentação do setor energético, a criação do Mercado Atacadista de Energia (MAE) e a fixação de preços e contratos de médio e longo prazos estão afastando a insegurança dos potenciais cogeneradores, especialmente na agroindústria.

Reflexos destas medidas já produziram aumento de encomendas de equipamentos de pequeno e médio porte para a geração de energia, como turbinas e geradores. Cálculos de fabricantes estimam que em 2000 foram vendidos equipamentos para gerar cerca de 600 MW em centrais térmicas de até 50 MW. Diante da necessidade de aumento da oferta de energia elétrica estes números não são insignificantes, porém o potencial para geração de energia com biomassa, gás de alto forno, lenha, resíduos industriais e outros é muito maior.

Para alguns fabricantes de equipamentos e produtores independentes de energia, as medidas governamentais corrigem em parte os enganos cometidos no lançamento do Programa Prioritário de Termoelétricas, em fevereiro de 2000, diante da eminência de uma crise energética. Crise para a qual, aliás, o governo vinha sendo alertado pela indústria desde o início da década passada. O atual governo em várias oportunidades procurou eximir-se de culpa, argumentando que, ao assumir em 1994, encontrou 23 usinas hidrelétricas com as obras paralisadas e, de lá para cá, ampliou em 25% a oferta de energia

elétrica. A alternativa termoelétrica previa a construção de 49 usinas a gás que agregariam à capacidade energética do País um total de 15 mil MW até 2003.

Entre as críticas ao programa, está a de que os equipamentos utilizados neste tipo de usina não têm produção local e, portanto, teriam de ser importados. Além disso, o mercado mundial de turbinas a gás estava muito aquecido e os fabricantes mundiais, com suas produções tomadas; sem contar que o combustível, o gás, também importado, tem preços fixados em dólares e o fornecimento em reais. Num país com sérios problemas para equilibrar sua balança comercial, o caráter emergencial parecia ser a única justificativa para a existência do programa.

Passado mais um ano de seu lançamento, o balanço do programa foi negativo. Das 49 usinas previstas, apenas 16 foram licitadas. Sómente os projetos com participação da Petrobrás saíram do papel, pois os investidores não estavam dispostos a assumir o risco cambial do gás importado da Bolívia, com preços atrelados ao dólar.

Quando do lançamento do programa termoelétrico já existiam inúmeros estudos sobre a viabilidade e o potencial do emprego da biomassa para a geração de energia no Brasil. As críticas apontam também para o fato de que o governo não demonstrou o mesmo empenho na criação de um programa nesta área, nem a mesma abrangência, sem contar as inúmeras vantagens comparativas das térmicas movidas à biomassa.

O combustível (bagaço de cana, óleos vegetais e outros resíduos de processos) é nacional e os equipamentos podem ter produção 100% local, enquanto no caso das termoelétricas são importados de 50 a 95% dos equipamentos, dependendo do porte da usina. Além disso, num momento em que tanto se fala em efeito estufa e aquecimento do

planeta, ao contrário dos combustíveis fósseis (gás, diesel), o balanço da biomassa é zero. A nova safra absorve todo o CO₂ produzido no processo.

Segundo estudos, realizados inclusive com a participação ou patrocínio de órgãos governamentais, é enorme o potencial do emprego da biomassa para a geração de energia no Brasil: só com bagaço de cana poderiam ser gerados 4 mil MW/ano, quase um terço do programa das termoeletricas.

Segundo IPESI (2001), as instalações para geração de energia já existentes nas usinas de açúcar e álcool do Centro-Sul poderiam fornecer 1000 MW de excedentes. Com novas tecnologias, como a gaseificação do bagaço, este montante poderia ser multiplicado por até cinco vezes.

Além disso, a geração de energia não é novidade para alguns setores, caso das usinas sucro-alcooleiras, que já utilizam o bagaço na cogeração de energia para consumo próprio. Segundo técnicos do setor, na maioria dos casos os equipamentos são antigos, de baixa capacidade e produtividade. Se otimizados, poderiam contribuir em projetos de co-geração de energia.

O presente trabalho tem por objetivo quantificar os resíduos gerados em uma fábrica de painéis de fibra de madeira (Eucalipto), especificamente na unidade de fabricação da Duratex S.A., localizada em Botucatu, Estado de São Paulo e através de análises, determinar o seu poder calorífico.

Com os dados assim obtidos pretendeu-se ainda estimar a quantidade de vapor obtível através da queima dos resíduos como combustíveis em caldeiras a biomassa.

Outro objetivo deste trabalho é, através da determinação das necessidades térmicas e elétricas do processo de fabricação de chapas de fibra, propor um sistema de cogeração onde sejam utilizados resíduos do processo, gás natural ou madeira picada (biomassa) para que a unidade se torne auto-suficiente quanto à geração de energia térmica e elétrica, verificando também a viabilidade econômico-financeira.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Crescimento Econômico e Consumo de Energia

Segundo o Ministério das Minas e Energia (2000), no período de 1970 a 1980, o Produto Interno Bruto – PIB brasileiro cresceu a uma taxa média de 8,7% ao ano (a.a.), com o consumo de energia crescendo, também, a taxas anuais expressivas, a eletricidade a 12,4% a.a. e os derivados de petróleo a 8,3% a.a. Os fatores determinantes para esse resultado foram: as dimensões continentais do País, a predominância de transporte rodoviário e, ainda, o desenvolvimento da indústria de base e da infra-estrutura para o atendimento das necessidades de muitas regiões do País. Apesar dos elevados índices de consumo de eletricidade e de derivados de petróleo, a Oferta Interna de Energia - OIE cresceu 6,5% a.a., em consequência, principalmente, do pouco crescimento da biomassa (0,4% a.a.), constantemente substituída por derivados de petróleo (GLP e óleo combustível).

A partir de 1980, sob o peso do ambiente recessivo da economia do País, estas taxas declinaram e variaram consideravelmente. No período de 1980 a 1992, a economia do País cresceu a uma taxa média de apenas 1,3% a.a., com taxas variando entre (-)

4,3% em 1981 e (+)7,8% em 1985. As taxas de crescimento da demanda de energia também diminuíram, mas não na mesma proporção que as do PIB. A OIE cresceu 2,8% a.a. O consumo de eletricidade cresceu 5,4% a.a., devido, principalmente, à expansão da indústria eletrointensiva (alumínio, ferro gusa, etc.). Já o consumo de derivados de petróleo, por força de políticas de substituição, cresceu apenas 0,9% a.a. e o consumo de biomassa 1,1% a.a., esta última superior à verificada no período 70/80, principalmente, por conta do programa do álcool.

De 1992 a 1997, com a estabilização da economia, estabeleceu-se um novo ciclo de desenvolvimento que elevou as taxa de expansão da economia e do consumo de energia. Nesse período o PIB cresceu 4,1% a.a. e a OIE cresceu 4,3% a.a., com os derivados de petróleo apresentando taxa média de crescimento de 5,8%, a eletricidade de 5,0% e a biomassa de 0,6%, correspondendo, respectivamente, a elasticidades de 1,40, 1,21 e 0,14 em relação ao PIB. A eletricidade residencial e comercial, a gasolina automotiva e o querosene de aviação foram os grandes indutores das altas taxas de consumo de energia, por conta da melhor distribuição de renda, causada pelo Plano Real.

Em 1998, por força da crise nos países asiáticos, o governo brasileiro foi obrigado a tomar medidas que levaram a uma forte retração no crescimento econômico, tendo o PIB apresentado um crescimento de apenas 0,05%. Ocorre, entretanto, que os energéticos citados acima, associados ao bem estar da população, mantiveram altos níveis de consumo, acima de 5%, fato que levou a um crescimento da OIE bem acima do PIB.

Em 1999, com a desvalorização da moeda nacional, o processo de baixo desempenho da economia continuou (PIB de 0,82%) afetando significativamente o consumo de energia associado ao uso particular. Apresentaram taxas negativas de consumo: o

querosene de aviação (-6,4%), o álcool hidratado (-8%) e a gasolina automotiva (-1%). Já a energia elétrica residencial cresceu apenas 2,5%.

3.2 Setor Elétrico

Segundo o Ministério das Minas e Energia (2000), a partir dos anos 50, os estados brasileiros passaram a criar suas próprias empresas de eletricidade que foram substituindo progressivamente as empresas privadas existentes na época. Posteriormente, o Governo Federal criou a ELETROBRAS em 1963 e, desde então, a capacidade instalada de geração elétrica cresceu, atingindo valores da ordem de 64,2 GW, em dez/1999, excluídos os autoprodutores com cerca de 4,2 GW e os 6,3 GW da parte paraguaia de Itaipu, quase toda destinada ao mercado brasileiro.

Em 1999, foram acrescentados 3,04 GW à capacidade instalada de geração elétrica, sendo 2,74 GW destinada ao serviço público (inclui 0,59 GW de produção independente) e 0,29 GW para uso exclusivo de autoprodutores. Destaca-se a entrada em operação da UHE Salto Caxias – PR, com 1.240 MW; da UHE Porto Primavera – SP, com 302 MW; da UHE Três Irmãos – SP, com 161,5 MW; das UHE Canoas I e II – SP/PR, com 154,5 MW; da UHE Igarapava – MG/SP, com 210 MW e, ainda, a entrada em operação das Centrais Termelétricas de Campo Grande – MS e Cuiabá – MT, com 101,2 MW e 150 MW, respectivamente.

O Ministério de Minas e Energia (2000), por meio da Agência Nacional de Energia Elétrica, promoveu durante o ano de 1999 licitações de 5 empreendimentos de geração hidrelétrica, para produção independente, totalizando 999 MW,

constituídos das UHE's Ourinhos, Itumirim, Candonga, Quebra Queixo e Barra Grande, que demandarão investimentos da ordem de US\$ 1,2 bilhões.

Segundo o Ministério das Minas e Energia (2000), durante o ano de 1999 foram outorgados, a produtores independentes, 4 concessões referentes a processos de licitações, com editais lançados em 1998, das UHE's Irapé, Ponte de Pedra, Itapeví e Campos Novos, totalizando 1.866 MW, com investimentos da ordem de US\$ 1,4 bilhões, e 2 concessões referentes à desestatização das empresas Paranapanema e Tietê, resultantes do processo de cisão da CESP, constituídas de 16 UHE's, com potência de 4.803 MW. A geração interna de eletricidade – para uso público – de 308,2 TWh (93% hídrica), em 1999, acrescida da parte importada do Paraguai e dos auto-produtores (20,8 TWh), permitiu atender a um consumo total de 314,3 TWh (2,2% superior ao de 1998). A maioria dos municípios brasileiros possui serviço regular e confiável de eletricidade. Entretanto, apesar de mais de 92% do total de domicílios já estarem eletrificados, parte do extenso território brasileiro ainda não é coberto pela malha de transmissão. A Região Norte apresenta os maiores problemas de abastecimento de eletricidade do País, onde localidades ainda são atendidas por sistemas isolados de geração térmica a óleo diesel pouco eficientes. Isto abre um amplo mercado para investidores privados interessados no segmento de geração de pequeno e médio portes, especialmente para projetos que utilizem fontes descentralizadas de energia (por exemplo: fotovoltaica, eólica, biomassa e pequenos aproveitamentos hidráulicos).

Ainda segundo o Ministério das Minas e Energia (2000), a Constituição Federal foi alterada, a partir de 1995, eliminando restrições para investidores privados estrangeiros aportarem capital no setor energético. Leis e Decretos introduziram profundas e importantes alterações que favoreceram a condição de produção independente de

energia e modificaram profundamente o mercado de fornecimento. Em 1999 o perfil do mercado de energia elétrica brasileiro apresentava 64% de participação privada, conforme mostra a Figura 1.

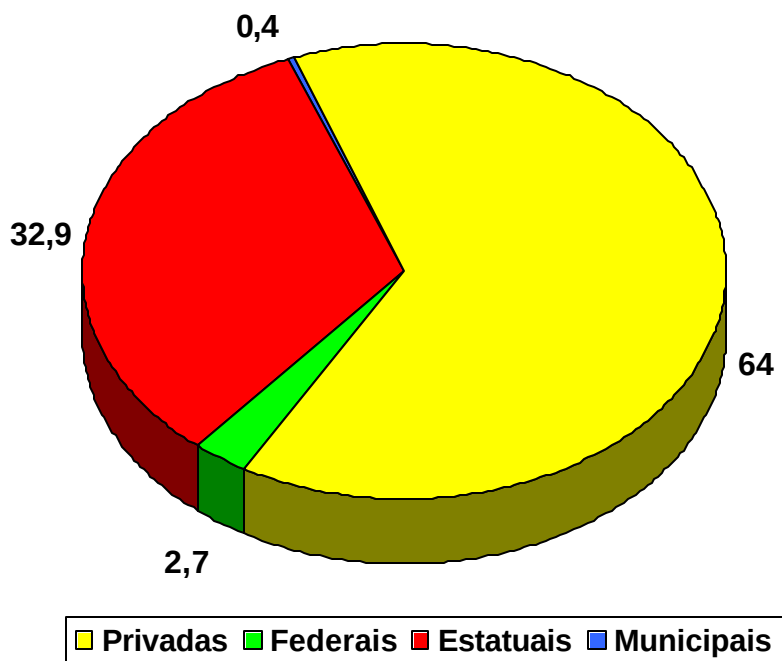


Figura 1 Participação das concessionárias de distribuição no mercado de energia elétrica

No processo de privatização foram totalizados recursos da ordem de R\$ 30 bilhões, incluída neste montante uma transferência de dívidas em torno de R\$ 6,0 bilhões.

Quadro 1. Privatizações realizadas no setor energético – em 31/12/99

EMPRESAS	DATA	% Ações Ordinárias	Valor da Venda em R\$ (x 10 ⁶)	ÁGIO
ENERGIA ELÉTRICA				
1995				
ESCELSA	11.07.95	97,27	357,92	11,8 %
1996				
LIGHT	21.05.96	50,44	2.697,94	0 %
CERJ	20.11.96	70,27	605,33	30,3 %
1997				
COELBA	31.07.97	71,14	1.730,89	77,4 %
CACHOEIRA DOURADA	05.09.97	94,18	779,76	43,5 %
AES Sul	21.10.97	90,75	1.635,00	82,6 %
RGE	21.10.97	90,91	1510,00	93,6 %
CPFL	05.11.97	57,60	3.014,91	70,1 %
ENERSUL	19.11.97	84,21	625,56	83,8 %
CEMAT	03.12.97	96,27	391,50	21,8 %
ENERGIPE	03.12.97	91,81	577,10	96,1 %
COSERN	12.12.97	80,20	676,40	73,6 %
1998				
COELGE	02.04.98	84,59	987,00	27,2 %
ELETROPAULO Metropolitana	15.04.98	74,88	2.026,73	0 %
CELPA	09.07.98	54,98	450,26	0 %
ELEKTRO	16.07.98	90,00	1.479,00	98,9 %
GERASUL	15.09.98	50,04	945,70	0 %
EBE – Bandeirante	17.09.98	74,88	1.014,52	0 %
1999				
CESP – PARANAPANEMA	28.07.99	36,92	1.239,16	90,21 %
CESP – TIETÊ	27.10.99	38,66	938,17	29,96 %
CELB	30.11.99	86,51	87,39	0 %
Sub Total – Energia Elétrica			23.770,14	

3.3 Produção de energia elétrica junto ao setor de papel e celulose e sucroalcooleiro.

O setor de papel e celulose, juntamente ao setor sucroalcooleiro são os que mais se desenvolveram no que se refere à produção própria de energia elétrica.

Segundo dados de Herrera (1999) existem no mundo 70 países produtores de cana-de-açúcar com uma área semeada de 12,7 milhões de hectares. A geração de eletricidade excedente de 50 kWh por tonelada de cana representaria para a América Latina e Caribe, cerca de $2,07 \times 10^{10}$ kWh.

Segundo Braun (1994), a cana-de-açúcar é a variedade agrônômica de maior eficiência no processo de fotossíntese, utilizando 2-3% da radiação solar incidente na produção de biomassa vegetal, permitindo classificar o bagaço como biomassa de baixo custo, o que faz rentável a geração de eletricidade com tecnologias de baixa eficiência durante a safra.

Segundo Braun (1994), em vários países latino-americanos observa-se a tendência de se incentivar a cogeração na indústria. Têm-se reportado estudos e avanços neste sentido no Brasil, Costa Rica, Jamaica, Guatemala e Honduras. Em particular, no Brasil, ante perspectivas de tarifas competitivas para a venda de eletricidade às concessionárias privatizadas, observa-se a formação de “joint venture” entre bancos e usinas de açúcar com o objetivo de aumentar a capacidade de geração e entrar no mercado de eletricidade. Um exemplo disto é o acordo entre o Banco Bradesco e várias usinas de açúcar. Um outro projeto considera a construção de uma termelétrica a bagaço a partir de excedentes deste combustível comprados de várias usinas. Segundo Walter (1996) o potencial de cogeração no Brasil quando se utilizam sistemas de condensação com altos parâmetros do vapor e tecnologias avançadas é 3663 MW e 7880 MW, respectivamente.

A tecnologia de geração de eletricidade predominante nas usinas no Brasil é a turbina de contrapressão. Como desvantagem principal deste sistema temos a pouca flexibilidade de geração e os baixos parâmetros de vapor. Vários estudos têm sido realizados sobre aspectos paramétricos e econômicos deste sistema de cogeração, segundo Walter (1996), Barreda e Llagostera (1996). As turbinas de condensação com extração e altos parâmetros de vapor permitem, além de maiores índices de geração de eletricidade e menores custos específicos, uma maior flexibilidade entre os processos de produção de eletricidade e calor. Porém existem dúvidas com relação ao custo da eletricidade no período de safra, a eficiência de geração de eletricidade e calor em relação aos indicadores do sistema quando se utilizam combustíveis auxiliares para a operação fora de safra.

Segundo Brito (1993), a biomassa florestal (lenha) tem sido uma importante fonte de energia desde os primórdios da humanidade. Com a evolução tecnológica tornou-se possível a utilização de outras fontes energéticas, perdendo a madeira (lenha) sua importância relativa. Entretanto, na atualidade, de cada duas árvores cortadas no mundo, pelo menos uma é destinada para finalidades energéticas.

Hall et al. (2000) afirmam que cerca de 20% da energia utilizada no mundo provém de fontes renováveis, sendo 13 – 14% oriundos da biomassa e 6% dos recursos hídricos. No tocante à biomassa isto representa cerca de 25 milhões de barris de petróleo por dia. Nos países em desenvolvimento esta é a fonte de energia mais importante (33% do total consumido anualmente) para cerca de 75% da população mundial que reside nestes países. Em alguns destes países, a biomassa contribui com mais de 90% do total de energia utilizada. A biomassa também é utilizada para produção de energia em alguns dos países desenvolvidos, como nos EUA, Áustria, Suécia e Finlândia.

Uma análise do Balanço Energético Nacional permite observar que: a) houve decréscimo na participação relativa (%) da biomassa florestal na matriz energética brasileira; sua participação que foi de 80,5% em 1940, passou a ser de apenas 9% em 1998; b) no entanto a sua participação quantitativa, em toneladas equivalente em petróleo (tep), tem permanecido relativamente constante, flutuando na faixa de 28 a 32 milhões de tep nas décadas de 1970 e 1980 e, contribuindo com cerca de 24 milhões de tep nos anos 1990.

Evidencia-se, assim, a importância da biomassa florestal como insumo energético, seja na dimensão histórica (temporal) ou na espacial (mundo, Brasil, estados, municípios, etc..) devendo, portanto, constar do rol de fontes energéticas consideradas quando das definições de políticas e diretrizes para o planejamento energético regional e, principalmente, não ser esquecida quando da execução dos planos elaborados (Lima & Bajay, 2000).

Outro fato que comprova esta constatação é que, em 1993, foram consumidos no Brasil cerca de 282 milhões de m^3 de biomassa florestal (madeira). Destes, 238 milhões de m^3 (85%) foram consumidos para a produção de energia e, somente 44 milhões de m^3 (15%) foram destinados para outras finalidades (Arruda, 1996 e Lima & Bajay, 2000).

A utilização racional de fontes energéticas e a otimização dos suprimentos destas, dentro das políticas econômica, social e ambiental vigentes, são os objetivos do planejamento energético. Bajay (1989) e Lima e Bajay (2000) propõem que se concentre a atenção em três objetivos sociais básicos, no cumprimento dos quais o sistema energético desempenha um papel decisivo. São eles: (a) o melhoramento da qualidade de vida

da população; (b) melhoramento da capacidade da sociedade para a sua autodeterminação e (c) o melhoramento da sustentabilidade ambiental da sociedade.

3.4 Experiências e perspectivas mundiais do uso de biomassa

A capacidade de produção elétrica a partir da biomassa existente nos EUA no início dos anos 90 foi avaliada por Williams & Larson (1996) em 8,4 GW. Grande parte desse parque foi viabilizado em poucos anos, verificando-se que a potência instalada em 1979 era de apenas 200 MW. Esses sistemas eram fundamentalmente instalações a vapor, com porte entre 5 a 50 MW e eficiências termodinâmicas relativamente baixas – entre 18 e 26%. Os custos de investimentos foram avaliados entre 1300 e 1500 US\$/kW e o custo da eletricidade gerada foi calculado entre 65 e 80 US\$/MWh. Quase 90% da capacidade era suprida com queima de madeira, restando 8% para sistemas que operavam com gás de aterro, 3% para rejeitos agrícolas diversos e apenas 1% para gás de biodigestão.

A Finlândia é um outro caso digno de destaque quanto ao emprego da biomassa na produção de eletricidade. É importante notar que, em termos relativos, o caso finlandês é mais relevante do que o norte americano, sendo o mais importante em todo mundo. Dois fatores devem ser considerados: a importância da biomassa na matriz energética e na própria economia; e a tradição existente em produção descentralizada, especialmente em cogeração.

Cerca de 30% de toda eletricidade gerada na Finlândia é produzida em sistemas de cogeração. A importância dos sistemas de produção é tão grande que a eficiência do uso de energia em Helsinki, por exemplo, é avaliada em 70%, mesmo considerado o consumo em sistemas de transportes. A biomassa, por sua vez, atende pouco menos de 20%

do consumo global de energia no país, com participação especial no setor industrial e principalmente no segmento de papel e celulose. A Finlândia desenvolveu tecnologia própria para a conversão eficiente da madeira, dos resíduos da produção de celulose e da turfa. Os sistemas industriais são, em geral, sistemas de cogeração a vapor com geradores adequados à queima de vários combustíveis, com a capacidade na faixa de 20 a 150 MW.

Na Suécia e Dinamarca, o papel da biomassa na matriz energética destaca-se como combustível industrial. No caso Sueco sabe-se que os resíduos florestais e os resíduos industriais de biomassa já contribuem de forma significativa para com a produção de eletricidade, basicamente em unidades de cogeração em fábricas de celulose e papel. A longo prazo, a biomassa pode contribuir com 25 a 40% da produção elétrica.

O governo das Filipinas optou, nos anos 80, por um programa de pequenas usinas termoeletricas – UTEs – à lenha, de forma a minimizar os problemas de abastecimento e reduzir os custos da eletrificação rural. O programa definiu como meta a construção de usinas de 3 MW integradas a módulos de 3300 ha de área plantada com florestas energéticas homogêneas. No início dos anos 90 aproximadamente um terço do programa já estava viabilizado.

Em função do sucesso da experiência filipina, o governo da Tailândia propôs há poucos anos um programa similar para a construção de 2 GW de capacidade de produção elétrica a partir da lenha. De acordo com o programa, deverão ser construídas 86 plantas a vapor, com 3,2, 10 ou 100 MW de capacidade, integradas a módulos de florestas homogêneas. É interessante notar que a Tailândia tem uma certa tradição no uso da biomassa para a produção de eletricidade já que as fábricas de extração de óleos vegetais, de

beneficiamento de arroz e as usinas de açúcar geram 15% da potência elétrica, ou 1 GW, consumida no país.

Cabe notar que nas indústrias de celulose em todo mundo, principalmente nas que fazem extração da matéria pelo processo sulfato, existe já uma tradição na produção de eletricidade em sistemas de cogeração. O combustível utilizado é a lúxívia negra, efluente do processo de digestão da madeira, que precisa ser necessariamente queimado para permitir a recuperação das soluções inorgânicas que viabilizam a obtenção da celulose.

Outra forma de produção de eletricidade a partir da biomassa está associada à incineração do lixo urbano com aproveitamento do calor na alimentação de um ciclo de potência a vapor. Existem instalações com tal princípio em alguns países europeus, tais como Holanda, Alemanha e França, no Japão e, em menor escala, na América do Norte. Estritamente do ponto de vista econômico a produção de eletricidade não é justificada em função do baixo poder calorífico do lixo e do alto teor de umidade. A lógica desta opção está na eliminação dos resíduos urbanos dado que as demais alternativas de controle são inviáveis do ponto de vista ambiental e/ou demográfico. Assim, a eletricidade torna-se um sub-produto do sistema de depuração do lixo.

3.5 O uso da biomassa florestal como fonte de energia

A biomassa, essencialmente é uma forma de energia solar armazenada, isto é, as árvores usam a luz solar, na fotossíntese, para converter CO₂ e H₂O em produtos de alto teor energético, que são os carboidratos, e oxigênio (Karchesy e Koch, 1979).

Brito (1986) afirma que no processo de combustão a energia armazenada nos carboidratos é liberada e aproveitada para geração de calor, vapor ou eletricidade. A quantidade de energia liberada pela madeira na combustão é conhecida como poder calorífico da madeira. Esta energia pode ser expressa como poder calorífico superior ou poder calorífico inferior, dependendo se o calor liberado pela condensação de água de constituição do combustível é ou não considerado.

Na determinação do poder calorífico do combustível florestal geralmente se usa o calorímetro. Os valores assim obtidos correspondem ao poder calorífico superior e são ligeiramente superiores aos observados na prática porque o calorímetro é fechado e os produtos da combustão permanecem enclausurados. Assim, ao se resfriar, o vapor d'água é condensado e libera o calor latente de vaporização. Numa fornalha industrial este calor de vaporização é perdido para a atmosfera (Karchesy e Koch, 1979), razão pela qual, na prática, deve-se trabalhar com o poder calorífico efetivo, que é obtido subtraindo-se do poder calorífico superior, o calor latente de vaporização da água formada durante o processo de combustão. A energia gerada pelo combustível florestal depende do poder calorífico e do conteúdo de umidade do mesmo. O poder calorífico depende, em primeiro lugar, da composição química do combustível. Altos conteúdos de carbono e hidrogênio significam alto poder calorífico, enquanto oxigênio apresenta efeito contrário. A composição química da madeira, excluída a água, é aproximadamente, a seguinte: carbono, 50,8%; oxigênio 31,8%; hidrogênio 6,0%; nitrogênio 0,4% e cinzas 1,0% (Hakkila, 1984). O poder calorífico da madeira não varia de maneira significativa entre as espécies e segundo Phillips (1979), um quilograma de madeira contém cerca de 20,0 MJ de energia independentemente da espécie florestal.

Os resíduos florestais podem apresentar poder calorífico diferente da madeira, principalmente devido às diferenças nas proporções de resina, lignina e celulose. A resina tem um poder calorífico bem maior do que a madeira, cerca de 39,3 MJ/kg (Howard, 1979). Por isso as coníferas, que contem maior quantidade de resina, tem maior poder calorífico, por unidade de massa, do que as folhosas. A lignina, por sua vez, apresenta maior poder calorífico do que a celulose (Hakkila, 1984). Por estas razões, isto é, maiores proporções de resina e lignina, casca, ramos e acículas apresentam poder calorífico ligeiramente maior do que a madeira, embora as diferenças não sejam grandes. Tomaselli et al. (1983) por exemplo, encontraram poder calorífico de 20,0 MJ/kg para madeira e 24,9 MJ/kg para casca, em *Pinus elliotti* plantado no Estado do Paraná.

O teor de umidade é talvez o fator que exerce maior influência sobre o uso da madeira para energia. Em primeiro lugar, a presença de água representa poder calorífico negativo pois parte da energia liberada é gasta na vaporização da água. Em segundo lugar, se o teor de umidade for muito variável pode dificultar o processo de combustão, havendo necessidade de constantes ajustes no sistema (Brito, 1986). Segundo (Hakkila, 1984), para certos tipos de fornalha, o conteúdo de umidade mais eficiente em termos de combustão varia entre 43 a 54% (em relação ao peso seco); se a madeira estiver mais seca, a combustão pode ser muito explosiva, o que resulta em maior perda de energia para a atmosfera e aumenta a emissão de partículas de carbono; se a umidade da madeira aumenta para 100 a 150% (em relação ao peso seco) a eficiência da combustão diminui drasticamente; e se ela exceder 150 a 230%, o processo de combustão não pode ser mantido.. A umidade da madeira varia consideravelmente de espécie para espécie, podendo ir de 40 a 150% em relação ao peso seco (Phillips, 1979), Mc Minn e Nutter (1981) encontraram teores de umidade variando entre

61 a 72% em relação ao peso seco, na biomassa extraída da região dos *Pinus* do Sudeste dos EUA, enquanto Tomaselli et al. (1983) encontraram valores de 189% para a madeira de *Pinus elliotti* recém cortado no Estado do Paraná. A madeira raramente é encontrada seca e por isto a sua energia potencial depende da quantidade de água que ela contém quando é queimada (Phillips, 1979).

A madeira é um combustível que queima mais limpo e, apesar de ter poder calorífico bem menor, oferece algumas vantagens sobre combustíveis convencionais como carvão e óleo. O conteúdo de cinzas da madeira é muito baixo, menos de 3% do seu peso seco. O do carvão é de 3 a 5 vezes maior (Howard, 1979). Além disto a cinza da madeira pode ser reciclada e usada como fertilizante, tanto na agricultura como na própria floresta, sendo útil principalmente para elevar o pH de solos ácidos. A quantidade de enxofre na madeira é desprezível e, portanto, não existe a formação dos altamente poluidores compostos de enxofre, que constituem um sério problema quando se queima carvão ou óleo (Howard, 1979). Os maiores problemas da madeira com relação à poluição, são as partículas de carvão e a fumaça.

3.6 Geração de resíduos na indústria madeireira

A indústria madeireira tem a característica de gerar grandes volumes de resíduos no processo de beneficiamento da madeira. Esta geração ocorre nos processos normais ou mesmo antes de a madeira ser introduzida no processo propriamente dito, pois através de inspeções, inclui-se que determinadas peças não atingirão os requisitos de qualidade para atender as exigências do mercado consumidor, tornando-se resíduo juntamente com as costaneiras, aparas, pó de serra, etc.

Atualmente, ainda é possível constatar que neste segmento industrial existe uma série de indústrias que queimam esses resíduos a céu aberto, simplesmente para livrarem-se do volume acumulado em seus parques de atividade. É importante observar que neste ramo de atividade demanda-se eletricidade para o acionamento das máquinas e calor de processo para promover a secagem da madeira. A implantação de um sistema de cogeração utilizando resíduos oriundos do processo de beneficiamento mostra-se como uma alternativa para o auto-suprimento destas demandas energéticas. Vale lembrar que o Brasil se encontra próximo à linha do equador privilegiando-se dos elevados índices de insolação e de pluviosidade que são determinantes para o crescimento da biomassa.

O setor madeireiro é o ramo de atividade que possui, atualmente, uma posição expressiva na produção de madeira beneficiada no Brasil, processando por volta de 14% do total da madeira advinda do setor florestal que engloba também o fornecimento para os setores de Celulose e Carvão vegetal, conforme dados da Sociedade Brasileira de Silvicultura.

As indústrias desse setor, produzem grande quantidade de resíduos no processo de beneficiamento da madeira. No Quadro 2 são apresentados os valores para o percentual de geração de resíduos em função do volume recebido para o beneficiamento.

Quadro 2. - Percentual médio de geração de resíduos *

Tipo de indústria	Percentual de geração de resíduos
Serrarias	50
Fábrica de Compensados	40
Fábrica de Aglomerados	30

* Fonte: FAO (1990)

O Quadro 3 mostra o consumo médio de energia elétrica e térmica por metro cúbico de madeira processada e as respectivas potências demandadas para cada modalidade de indústria, segundo dados da FAO (1990). Para a determinação dessas potências considerou-se um volume de 2000 m³ processados diariamente, de modo contínuo, utilizando-se do valor do percentual de geração de resíduos.

Quadro 3. Consumos específicos - demandas de eletricidade e calor de processo para cada segmento da indústria madeireira.

	Calor		Eletricidade	
	Específico (kWh/ m ³)	Potência (kW)	Específica (kWh/ m ³)	Potência (kW)
Serrarias	472	3933	72	600
Compensados	1541	12842	230	1917
Aglomerados	819	6825	180	1500

3.7 Tecnologias de produção de energia a partir da biomassa

Pode-se classificar as tecnologias de produção de eletricidade a partir da biomassa em dois grupos: aquelas que fazem uso desta enquanto recurso energético primário (a partir de sua combustão direta), e as tecnologias que fazem uso de combustíveis derivados – gases ou líquidos. A combustão direta da biomassa geralmente ocorre em instalações baseadas em ciclos de potência a vapor, com queima exclusiva ou queima conjunta da biomassa com um outro combustível, enquanto no segundo grupo estão as instalações de gaseificação ou pirólise integradas a turbinas a gás, motores de combustão interna ou células de combustível. A produção de eletricidade a partir de combustíveis derivados da biomassa

traz algumas vantagens potenciais em relação à outra alternativa. Uma dessas vantagens está no fato de que as eficiências de conversão poderão ser maiores, em função da queima mais eficiente e da maior eficiência de conversão dos dispositivos que serão empregados na geração de potência – turbinas a gás, motores de combustão interna e, num futuro mais distante, as células de combustível. Em função da melhor queima, também é de se esperar menores emissões de gases. O emprego de combustíveis secundários, finalmente confere uma maior flexibilidade já que esses poderão ser produzidos a partir de uma maior diversidade de recursos – diferentes resíduos agrícolas e urbanos, e diferentes culturas agrícolas.

3.7.1 *Sistemas a Vapor*

A produção de eletricidade a partir da biomassa em centrais termoeletricas que operam segundo o ciclo Rankine é uma realidade em alguns países. No entanto, as centrais hoje existentes no país operam com baixas eficiências e não serão competitivas – como aliás, a rigor, já não o são – com outras opções de geração.

A baixa eficiência das centrais convencionais a vapor, quando alimentadas por biomassa, advém do fato de que os custos unitários (\$/kW de potência instalada) são muito influenciados pelo efeito de escala. Como uma central a biomassa têm que ter pequena capacidade, em função do custo de transporte, o investimento tenderia a ser muito alto. Para que o custo de capital seja menor, a instalação é simplificada, acarretando prejuízos quanto à sua eficiência.

A baixa eficiência das centrais a vapor alimentadas por biomassa é resultante das baixas pressões e temperaturas com que o vapor é gerado (para se reduzir o custo), das baixas eficiências das turbinas a vapor empregadas, da não utilização efetiva dos

recursos de reaquecimento e regeneração, e das baixas eficiências dos geradores de vapor empregados.

Segundo Van Den Broek, 1996, avanços têm sido propostos, sobretudo no que diz respeito à geração de vapor. Na Europa e nos EUA a combustão da biomassa em leito fluidizado e em grelhas vibratórias resfriadas a água já é realidade em algumas centrais, permitindo ganhos expressivos na eficiência da combustão e, conseqüentemente, na eficiência global da central. Nos EUA, o Electric Power Research Institute – EPRI – está já há alguns anos desenvolvendo a tecnologia de queima eficiente da madeira em toras, sem necessidade de corte ou maiores beneficiamentos prévios, exceto a secagem até aproximadamente 25% de umidade absoluta, o que pode reduzir de forma significativa o investimento e os custos operacionais (Electric Power Research Institute, 1993).

Segundo Campello (1990), a eficiência total da produção de energia, por meio de turbinas ou máquinas a vapor, depende principalmente do ciclo térmico da instalação e menos da máquina térmica em si. A falta da compreensão deste fato tem levado muitos projetistas a darem uma ênfase exagerada à máquina, desprezando o ciclo propriamente dito. Este erro tem acarretado prejuízos vultuosos à indústria, principalmente nas turbinas de contra pressão, utilizadas nas usinas e nas destilarias autônomas de álcool.

Segundo Campello (1990), constitui erro a afirmação que uma turbina gasta uma determinada massa de vapor por kWh gerado, porque esse gasto depende principalmente do tipo do ciclo, da pressão e da temperatura de entrada, da contra pressão e, naturalmente, também da eficiência isoentrópica da turbina. Existem vários ciclos termodinâmicos utilizados para produção de energia através de utilização de vapor

(condensação, ressuperaquecimento, contrapressão, sangria, binário e regenerativo) sendo o de condensação o mais simples deles.

3.7.2 *Gaseificação*

Tendo em vista as limitações anteriormente comentadas quanto aos ciclos de vapor para a produção de eletricidade a partir da biomassa, existe um grande interesse em todo o mundo quanto ao desenvolvimento de tecnologias que permitam o uso da biomassa, de forma indireta, em máquinas térmicas em que os efeitos de escala sobre os custos de capital são menos pronunciados. Essas máquinas são, em primeira instância, as turbinas a gás e os motores de combustão interna. Existe também um certo interesse quanto ao emprego das células de combustível, embora esta tecnologia ainda não seja comercialmente competitiva com outras opções de geração de eletricidade.

Para que a biomassa possa ser empregada na alimentação de turbinas a gás e motores de combustão interna, é necessário que o insumo seja inicialmente submetido a um processo de gaseificação, ou de liquefação.

A alternativa de gaseificação da biomassa e acoplamento da unidade de gaseificação a uma turbina a gás é genericamente designada por alguns autores como BIG-GT – “Biomass Integrated Gasifier/Gas Turbine”. Para que a produção de eletricidade ocorra de forma eficiente, a energia associada aos gases de escape da turbina precisa ser aproveitada, seja na forma de energia térmica em sistemas de cogeração, seja na produção de vapor que alimenta uma instalação com turbina a vapor de um ciclo combinado, ou ainda na produção de

vapor que é injetado na própria turbina a gás, em turbinas comercialmente designadas como STIG (Steam Injected Gas Turbine).

A alternativa de gaseificação da biomassa para alimentação de motores de combustão interna é tradicionalmente explorada em unidades de pequeno porte, geralmente em regiões que tem restrições ao abastecimento elétrico via rede. A geração em unidades de maior porte, no entanto, ainda não é comercial porque a gaseificação da biomassa em sistemas maiores ainda está em desenvolvimento. Entretanto, face à estimativa dos altos custos, avaliações preliminares consideram que essa alternativa não deve ser factível face às demais alternativas de geração de eletricidade a partir da biomassa (Solantausta et al., 1995).

A produção de eletricidade com células de combustível acopladas à unidades de gaseificação da biomassa também têm sido considerada, mas como uma alternativa para um futuro mais distante. As células de combustível permitem a geração de eletricidade por oxidação eletroquímica de um combustível com o oxigênio do ar. Eficiências da ordem de 45 a 70% têm sido alcançadas em unidades comerciais de capacidade não superior a algumas centenas de kW. Para o aproveitamento da biomassa em tais dispositivos, a produção de hidrogênio a partir da biomassa têm recebido alguma atenção, com especial ênfase aos processos de reforma com vapor, com uso de catalisadores, similares à produção de hidrogênio a partir de metano (Overend et al., 1996). Um certo otimismo com respeito às potencialidades de longo prazo dessa tecnologia é demonstrado por Williams e Larson, 1996, que avaliam que ela pode ser mais eficiente e mais barata do que os sistemas BIG-GT de pequena capacidade. Bridgwater (1995), no entanto, considera que antes que essa alternativa possa ser considerada com seriedade, muito esforço de pesquisa e desenvolvimento precisa ainda ser despendido.

Segundo Solantausta et al. (1995), a gaseificação é um processo de conversão termoquímica realizado a altas temperaturas, envolvendo oxidação parcial dos elementos combustíveis de constituição da biomassa. Os gases produzidos na gaseificação são formados por monóxido e dióxido de carbono, hidrogênio, metano, traços de hidrocarbonetos pesados, água, nitrogênio e várias outras substâncias – pequenas partículas de coque, cinza, alcatrão e óleos – que são consideradas contaminantes. Para que ocorram as reações de conversão, um agente oxidante, como ar, oxigênio, vapor ou ainda uma mistura desses gases, precisa ser injetado no gaseificador.

Em função da diluição dos gases com nitrogênio, a gaseificação com injeção de ar resulta num gás com baixo poder calorífico (PCS da ordem de 4 a 7 MJ/Nm³), que é adequado para uso “in situ”, na queima direta em caldeiras ou fornos, ou na alimentação de motores de combustão interna e turbinas, mas não para ser transportado ou para ser empregado como gás de síntese. Entretanto, a gaseificação com injeção de ar é um processo mais barato e mais seguro. A gaseificação com injeção de oxigênio, por sua vez, permite a produção de gás com médio poder calorífico (PCS da ordem de 10 a 18 MJ/Nm³).

A maneira usual de classificação dos diversos tipos disponíveis de gaseificadores é feita em função do comportamento do leito da matéria a ser gaseificada. Uma subdivisão pode ser feita em função do movimento relativo do insumo, do agente oxidante e dos gases produzidos. Os tipos principais de gaseificadores são os de leito fixo, os de leito fluidizado e os de leito móvel. A gaseificação em leito fixo, onde a matéria a ser gaseificada só se move por ação da gravidade, é uma técnica adequada para a conversão de quantidades relativamente pequenas de biomassa. Gaseificadores de leito fixo, de fluxo ascendente, poderiam em princípio ser desenvolvidos para maiores capacidades, mas esta não têm sido a

tendência. Na geração de energia elétrica, gaseificadores de leito fixo têm sido empregados na alimentação de motores de combustão interna, em sistemas de capacidade entre 100 kW e 10 MW. Gaseificadores de fluxo descendente produzem gases com baixos teores de alcatrão e de material particulado, enquanto gaseificadores de fluxo ascendente também produzem gases com pouco particulado, mas com altos teores de alcatrão.

Gaseificadores de leito fluidizado têm sido utilizados na conversão termoquímica da turfa já há muitos anos, mas ainda não existe muita experiência na conversão da biomassa, pelo menos em grande escala. Nos equipamentos desse tipo, emprega-se um material como meio fluidizante, que arrasta consigo a biomassa, aumentando o contato desta com o elemento oxidante e, conseqüentemente, aumentando as taxas de reação.

Segundo Williams e Larson (1996), gaseificadores de leito fluidizado são mais adequados à conversão de uma maior quantidade de biomassa – sistemas com capacidade entre 10 e 20 t de biomassa por hora são operacionais. São, também mais flexíveis quanto às características do insumo, podendo ser empregados na conversão de biomassa com mínimas necessidades de processamento anterior à alimentação. Em função dessas vantagens (além do controle mais fácil), é o princípio que tem sido empregado em quase todos os projetos de desenvolvimento de sistemas IGCC. Por outro lado, além dos maiores custos operacionais, os problemas de adequação dos gases quanto à sua qualidade tendem a ser maiores. Em função da própria natureza do processo, a quantidade de material particulado arrastada tende a ser maior; um segundo aspecto é que a maior temperatura de saída dos gases permite que os álcalis saiam ainda da fase gasosa, impondo dificuldades adicionais à limpeza. Os gaseificadores que operam em leito fluidizado, podem ser classificados em leito simples, leito circulante, leito borbulhante e com leitos gêmeos.

Outra forma muito usual de classificação dos gaseificadores, em função de sua pressão operacional, é entre pressurizados e atmosféricos. Em linhas gerais, a gaseificação pressurizada é mais complexa e mais cara. O maior custo de capital, por sua vez, pode ser compensado, ao menos parcialmente, pela maior eficiência de todo o sistema IGCC. Este último ponto pode ser explicado por um conjunto de fatores, destacando-se os que se seguem:

- (i) com a gaseificação pressurizada, o gás não precisará ser comprimido antes de ser injetado na turbina a gás, reduzindo a potência dos equipamentos auxiliares;
- (ii) a limpeza dos gases a quente reduzirá perdas de pressão e perdas térmicas nessa parte do sistema. Nos sistemas atmosféricos, como os gases devem ser resfriados antes de serem comprimidos, justifica-se a limpeza a frio. Mesmo com o emprego de trocadores (ou ainda, por causa do emprego desses) para a recuperação de calor, essas perdas deverão ser maiores nos sistemas atmosféricos;
- (iii) a limpeza dos gases a frio pode impor a condensação dos alcatrões, fazendo com que o gás tenha menor poder calorífico na alimentação da turbina.

Acredita-se que os sistemas com gaseificação atmosférica podem apresentar vantagens em relação aos correspondentes com gaseificação pressurizada para sistemas IGCC com potência inferior a 60 MW. No entanto, no atual estágio de desenvolvimento, essa é ainda uma questão em aberto.

Em um estudo de análise de viabilidade de diferentes configurações de sistemas IGCC, Craig e Mann (1996) concluem que os custos de limpeza e de compressão dos gases em sistemas atmosféricos, principalmente para sistemas de menor capacidade, tendem a ser mais do que compensados pelos baixos custos do sistema de gaseificação. Já em outro

estudo, Solantausta et al. (1995) concluem que as diferenças entre os sistemas com gaseificação atmosférica e pressurizada são muito pequenas, mesmo em termos de investimento específico. Os autores consideram que só quando o custo da biomassa for muito alto, em função de sua maior eficiência, os sistemas pressurizados serão mais vantajosos.

Estimativas de custos e eficiência de sistemas BIG-GT indicam que aqueles baseados na gaseificação pressurizada têm maior investimento específico do que os sistemas com gaseificação atmosférica até capacidades da ordem de 70 a 80 MW. Em contrapartida, as eficiências dos sistemas com gaseificação pressurizada estão pelo menos um a dois pontos percentuais acima dos sistemas com gaseificação atmosférica de capacidade similar. Dessa forma, em função dos custos da biomassa, é de se esperar que uma tecnologia possa ser mais vantajosa do que a outra.

A seguir são abordadas algumas tecnologias com turbinas a gás para aplicações com biomassa gaseificada, sugeridas por Williams & Larson (1996). São elas:

- Ciclo simples de turbina a gás (CS);
- Turbina a gás com injeção de vapor (STIG);
- Turbina a gás com injeção de vapor e resfriamento intermediário (ISTIG);
- Ciclo combinado com turbina a gás e a vapor (CC).

3.7.2.1 *Ciclo simples de turbina a gás (CS)*

Este é o mais simples de todos os ciclos. O combustível é queimado em uma turbina, com ar comprimido pelo compressor (acionado pelo mesmo eixo da turbina). Os gases produtos da combustão a alta temperatura expandem-se na turbina, que esta acoplada

a um gerador, produzindo eletricidade. Os gases de exaustão, que se encontram a uma determinada temperatura, em função das condições de concepção da turbina, são usados em uma caldeira de recuperação para produzir vapor necessário à gaseificação e/ou para aplicação em processo.

3.7.2.2 Turbina a gás com injeção de vapor (STIG)

O ciclo de turbina a gás com injeção de vapor (STIG, ‘Steam Injected Gas Turbine’), é uma variação do ciclo simples de turbina a gás visto anteriormente. O vapor produzido na caldeira de recuperação é injetado no ar de descarga do compressor, aumentando assim o fluxo de massa através da turbina e também o calor específico à pressão constante dos gases dos produtos da combustão, pois o calor específico da mistura ar-vapor é superior ao do ar sómente. Como a injeção de vapor foi feita na descarga do compressor, o trabalho de compressão não será afetado. A injeção de vapor na câmara de combustão de turbinas a gás possibilita um aumento da potência elétrica e da eficiência do ciclo, além de reduzir o nível de emissão de compostos de nitrogênio de fórmula NO_x (Williams e Larson, 1996).

3.7.2.3 Turbina a gás com injeção de vapor e resfriamento intermediário (ISTIG)

É uma versão avançada da turbina a gás com injeção de vapor, apresentada anteriormente, que incorpora um resfriador intermediário no compressor (ISTIG, Intercooled Steam Injected Gás Turbine). O resfriamento permite a redução da potência consumida pelo compressor, uma vez que a temperatura de entrada no segundo compressor

será reduzida até uma temperatura próxima à temperatura do ar ambiente, mantendo-se a mesma relação de pressão total. Devido a esta diminuição da potência requerida pelo compressor, o ciclo ISTIG possibilita o aumento da potência elétrica e da eficiência.

3.7.2.4 *Ciclo combinado – Turbina a gás e turbina a vapor (CC)*

A combinação de uma turbina a gás com uma turbina a vapor é denominado ciclo combinado. Neste ciclo o vapor produzido na caldeira de recuperação é utilizado para a geração de potência adicional em um ciclo com turbina a vapor, da qual o vapor pode ser extraído para aplicação em processo. Este sistema, para configurações de porte análogo, apresenta potência aproximadamente igual à de um ciclo com injeção de vapor, porém com maior eficiência.

4. MATERIAL E MÉTODO

O presente trabalho de pesquisa foi desenvolvido na empresa Duratex S.A. , Unidade de Botucatu, onde foram analisados os pontos e as quantidades de geração de resíduos, bem como a verificação de seu poder calorífico. Foi também analisada a necessidade energética da unidade fabril em questão, sob os aspectos de energia térmica e elétrica. Através dos índices de controle da empresa determinaram-se as quantidades e os tipos de combustíveis utilizados na produção de calor e vapor para o processo.

Foram estudados 2 ciclos alternativos para produção de energia, com a finalidade de suprir sua viabilidade econômica financeira.

4.1 Material

4.1.1 *Fábrica de chapas de fibra dura (Hardboard)*

Uma das 2 fábricas de chapas dura de fibra de madeira da Duratex S/A. está localizada em Botucatu, na Fazenda Santa Luzia, a 15 km do centro urbano. A

Fábrica, onde foi desenvolvido o presente trabalho de pesquisa, é rodeada de florestas plantadas de eucalipto que são a sua única matéria-prima, e opera com 3 linhas de fabricação desde 1973, ano de início de operação da primeira linha. O Quadro 4 mostra as principais características da unidade em questão.

Quadro 4. – Dados da Fabrica Duratex – Botucatu

Item	valor
Área total	189.000 m ²
Área construída	65.000 m ²
Nº de funcionários	530
Nº linhas de produção	3
Capacidade produtiva	700 ton/dia
Tipo de produto	Chapas de fibra de madeira
Potência instalada (elétrica)	25 MW
Nº caldeiras	4
Capacidade de produção de vapor	(110 tv/h) vapor saturado 2,2 MPa
Tensão de entrada	138 kV
Subestação de entrada (capacidade do transformadores de entrada)	32 MVA (138 kV para 3,8 kV)

4.1.2 Dados de consumo de energia elétrica e produção de chapas de fibra

Para o desenvolvimento do trabalho foram coletados dados mensais de produção de chapas de fibra durante os anos de 1998, 1999, 2000 e dos primeiros cinco primeiros meses de 2001.

Foram coletados também dados de consumo de energia elétrica adquirida junto à concessionária local, no mesmo período em que foram coletados os dados de produção.

4.1.3 *Geração de resíduos*

4.1.3.1 *Cascas de eucalipto*

As toras de eucalipto são transportadas através de mesas alimentadoras até o picador. Neste trajeto, desde a descarga dos caminhões, até a entrada no picador, uma parte das cascas das toras é derrubada no chão e em seguida coletada manualmente e mecanicamente. Após tal coleta as cascas são amontoadas próximo ao pátio de cavacos.

Todos os cavacos produzidos a partir da picagem das toras passam por uma peneira que retira cascas maiores que 50mm de comprimento. Estas cascas são também amontoadas com aquelas coletadas nos transportadores de toras antes do picador.

Diariamente caminhões retiram estas cascas que, devido as condições de tamanho e entrelaçamento, não são utilizadas como combustíveis pois os transportadores de biomassa e as grelhas das caldeiras não estão preparados para queima-las da maneira como se encontram (as mesmas precisariam ser picadas antes de seu transporte e introdução nas grelhas das caldeiras). Estas cascas, até o momento, são doadas a terceiros que se responsabilizam pela retirada e transporte. Com o auxílio de balança rodoviária foram obtidas as quantidades de cascas de eucalipto geradas no manuseio e preparação da matéria prima (eucalipto). Estes dados cobrem 8,5 meses de pesagens diárias, pois tais medições e controles só aconteceram a partir de setembro de 2000.

No apêndice A, encontra-se o Quadro 5 que demonstra a verificação de peso das cargas de caminhões de cascas que foram retiradas da Fábrica.

4.1.3.2 *Pó de lixamento, corte e refilo de chapas de fibra*

Após prensadas e tratadas, as chapas de fibra são serradas e lixadas para que se obtenham as medidas finais desejadas de comprimento, largura e espessura, gerando resíduos denominados pó de lixamento e refilos. As Figuras 1, 2 e 3 do Apêndice B são fluxogramas que indicam as quantidades de pó e refilo gerados em cada linha de produção.

4.1.3.3 *Chapas refugadas*

Devido à classificação de chapas em obediência aos padrões de qualidade estabelecidos, parte do produto é rejeitada. Por não serem recicláveis dentro do processo, as chapas refugadas são picadas e posteriormente queimadas em caldeira.

As quantidades de resíduos gerados pelo lixamento das chapas (pó), pelo corte em serras e pelas chapas descartadas devido a má qualidade foram obtidas através de balanço de massa desenvolvido pela empresa de consultoria JB Engenharia, (em apêndice B).

4.1.4 *Consumo de combustíveis*

A produção de energia térmica e vapor é conseguida através da operação de caldeiras aquatubulares onde os principais combustíveis utilizados são o óleo BPF (baixo ponto de fluidez) tipo 2A, pó e particulados de chapas provenientes de lixamento, corte (trimming), chapas reprovadas, e cavacos de madeira.

As quantidades utilizadas de óleo BPF e cavacos de madeira foram obtidas das planilhas de controle de consumo dos mesmos durante os anos de 1998, 1999, 2000 até maio de 2001.

4.1.5 *Ciclos termodinâmicos*

4.1.5.1 *Ciclo termodinâmico existente*

No estudo do ciclo termodinâmico existente foram utilizados dados de vazão de vapor nas caldeiras, pressão absoluta e temperatura do vapor consumido nos vários pontos do processo, retorno de condensado e rendimento termodinâmico das caldeiras. A figura 2 demonstra o ciclo termodinâmico atual da fábrica Duratex.

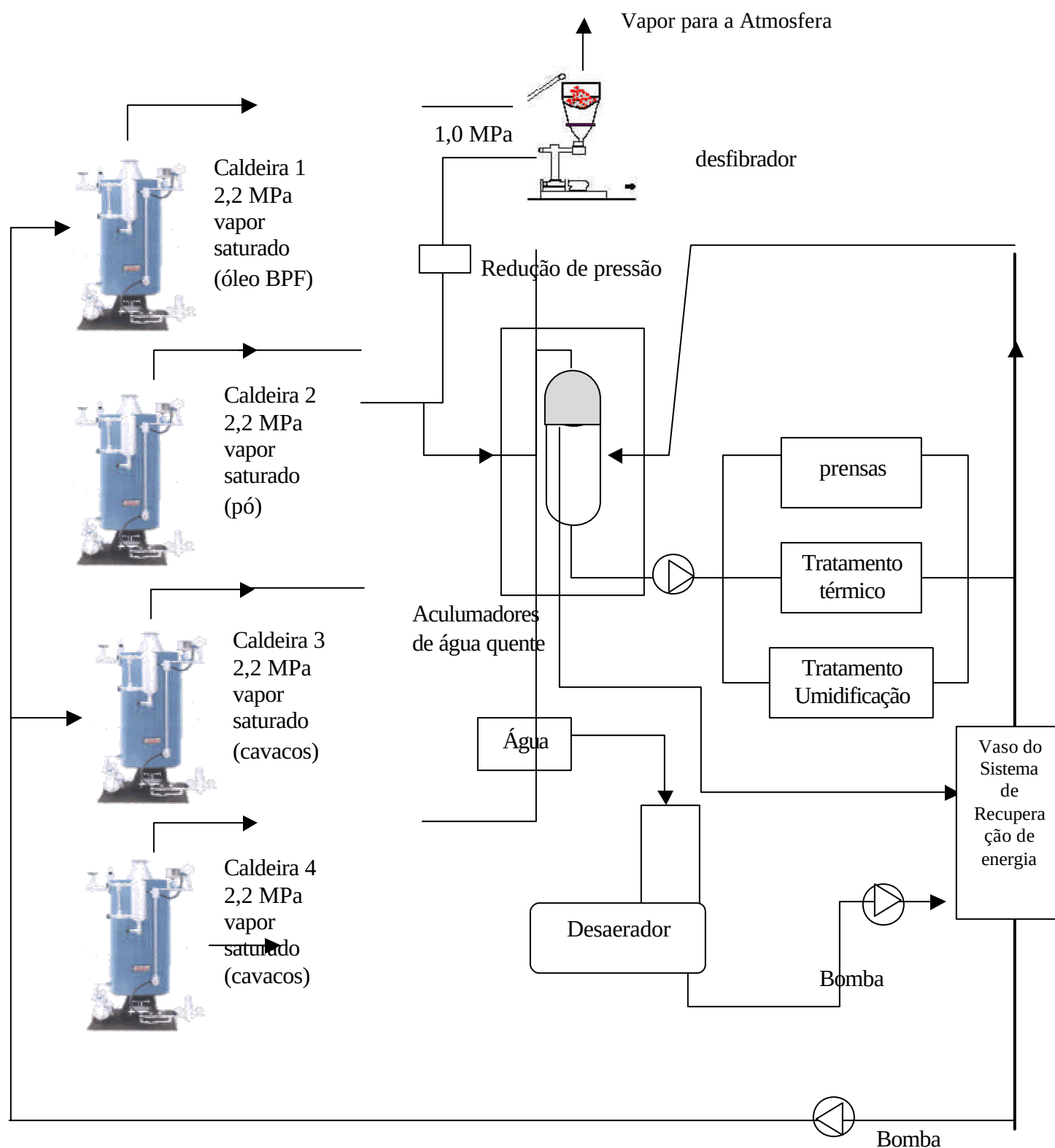


Figura 2. Ciclo termodinâmico atual da Empresa Duratex-Unidade Botucatu

O ciclo termodinâmico existente na fábrica de chapas de Botucatu (Figura 2), é composto basicamente por 4 caldeiras para geração de vapor saturado à pressão de 2,2 MPa. Sua finalidade é promover o aquecimento nos pontos de prensagem, tratamento térmico e tratamento de umidificação. Para tal o vapor é introduzido em acumuladores de água quente que operam a 2,0 MPa e dos quais através de bombas centrífugas, é feita a circulação para os pontos de utilização para aquecimento.

O vapor produzido pelas caldeiras é utilizado também para pré-aquecimento dos cavacos nos desfibradores. Uma válvula redutora de pressão possibilita o uso de vapor na desfibração a uma pressão de 1,0 MPa. Após utilização e pré-aquecimento dos cavacos na desfibração o vapor se perde para a atmosfera.

De posse do ciclo termodinâmico existente e das quantidades de energia elétrica necessária para operação da planta, foram propostos ciclos alternativos utilizando tecnologias disponíveis no mercado.

4.1.5.2 *Ciclo termodinâmico proposto utilizando os resíduos disponíveis e turbina a vapor.*

Para introdução de um sistema de cogeração que atenda as necessidades térmica e elétrica da Fábrica em questão é necessária a modificação do parque de caldeiras, pois os equipamentos existentes não dispõem de área de fornalha suficiente nem capacidade hidrostática para aumento de pressão e temperatura do vapor produzido, limitando assim a entalpia do vapor obtenível e também sua capacidade de produção.

Desta forma, no ciclo termodinâmico proposto será necessário a implantação de um projeto de aquisição de um novo gerador de vapor, com características e

capacidades que atendam a produção de vapor e à demanda requerida pelos parâmetros de cogeração adotados.

Dentre os parâmetros estão a produção de calor para o processo de fabricação correspondente a 42,9 Gcal/h e a produção de 14 MWh de energia elétrica disponíveis nos bornes do gerador.

A alternativa presente também contempla a utilização de todos resíduos gerados no processo de fabricação e a complementação com cavacos de madeira, caracterizando a matriz de combustíveis exclusivamente composta por biomassa.

As características do vapor produzido pelo gerador de vapor proposto são: pressão de 4,0 MPa e temperatura de 673K. O ciclo adotado é um ciclo de condensação com extração na turbina para utilização do vapor no processo, conforme figura 3 .

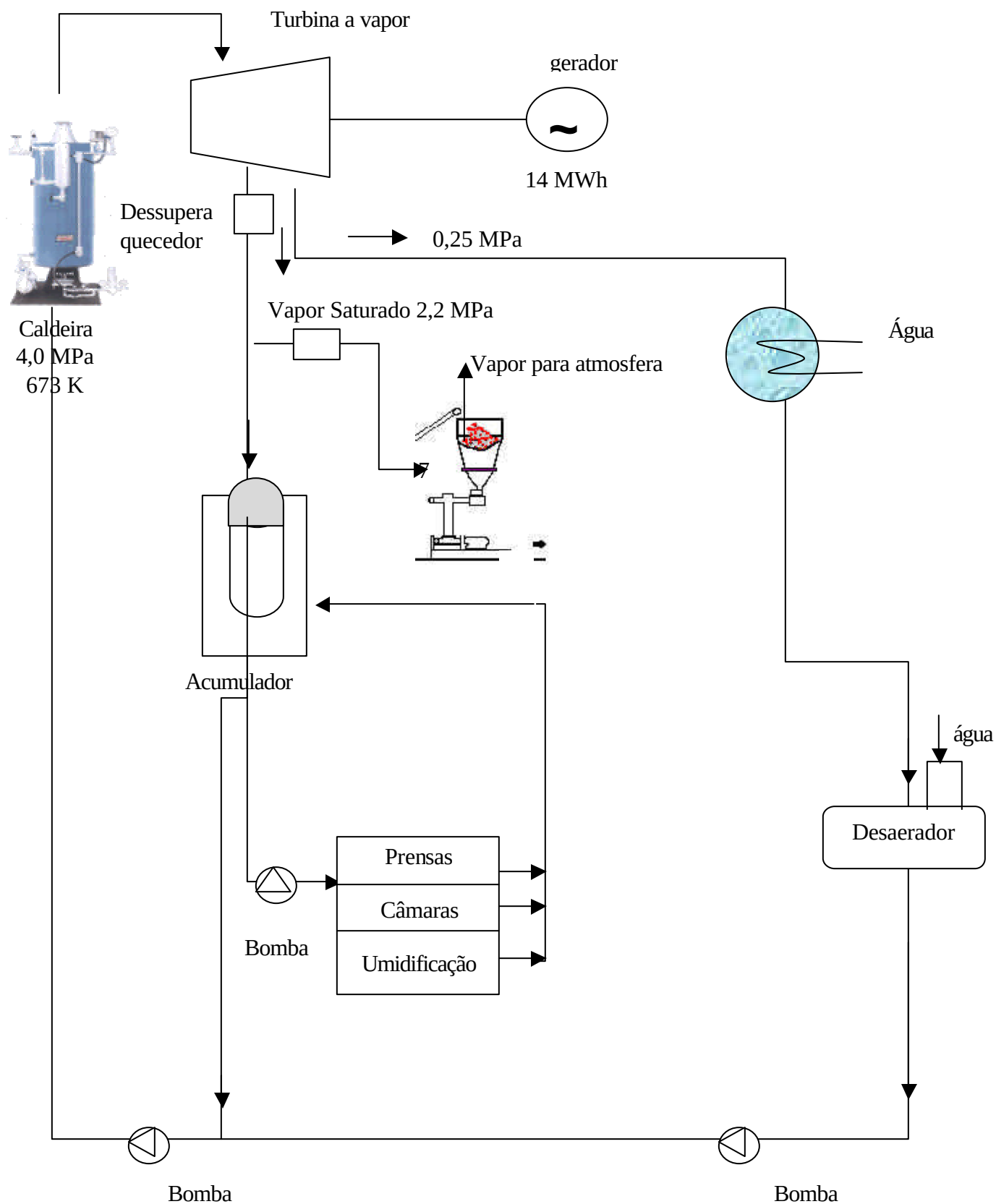


Figura 3. Ciclo Alternativo com Turbina a Vapor

4.1.5.3 *Ciclo termodinâmico proposto utilizando gás natural e resíduos do processo*

O ciclo termodinâmico proposto utilizando gás natural, é composto também de uma caldeira de biomassa para queima dos resíduos, produzindo vapor saturado a 2,2 MPa de pressão (Figura 4). Uma turbina a gás acoplada a um gerador produz 14 MWh de energia elétrica e seus gases de exaustão produzem, através de uma caldeira de recuperação, vapor saturado para o processo nas condições requeridas de 2,2 MPa.

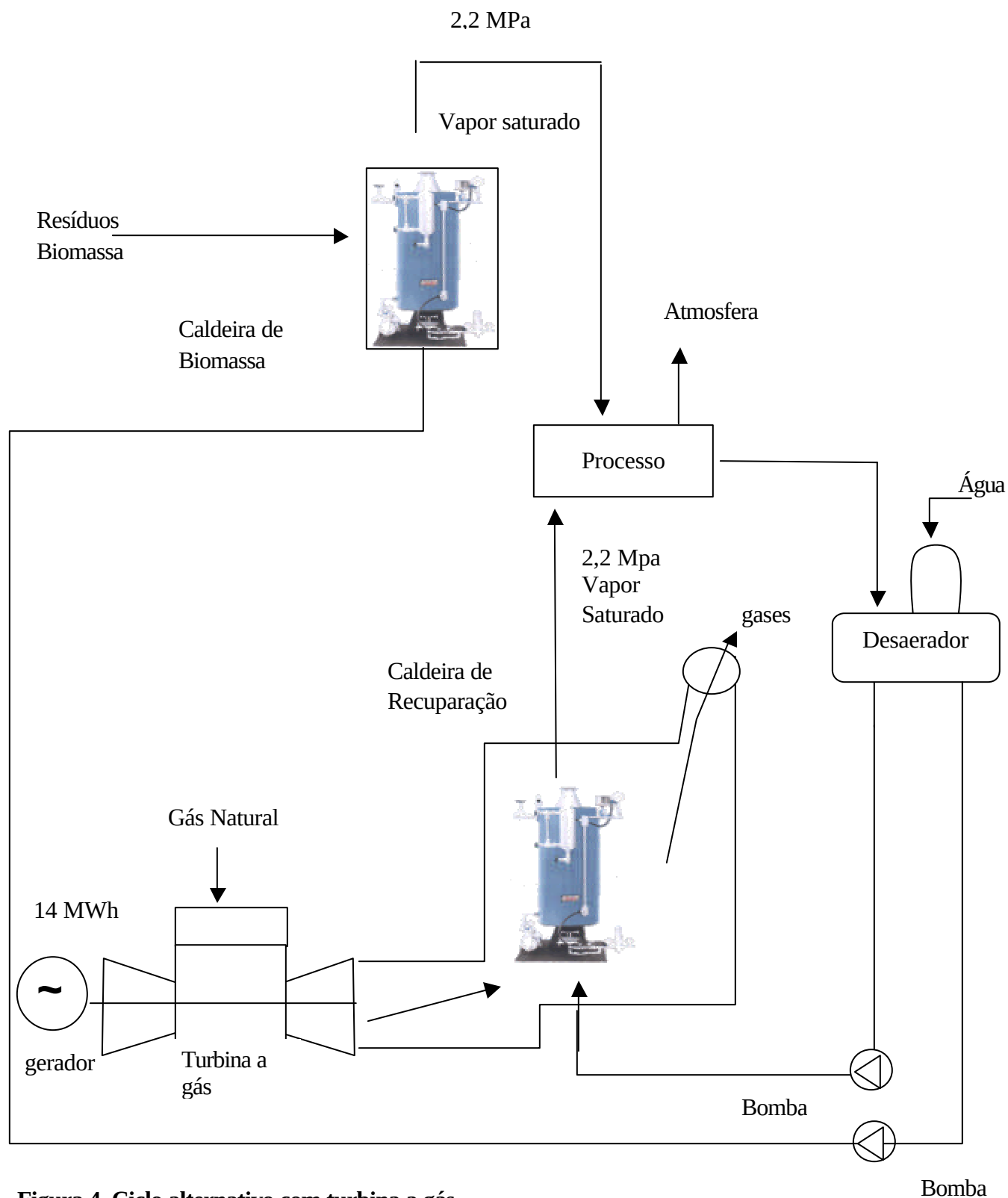


Figura 4. Ciclo alternativo com turbina a gás

Para proceder a avaliação econômico-financeira dos ciclos termodinâmicos propostos, foram utilizadas as variáveis: preço de energia segundo os contratos de fornecimento pela concessionária, através das contas processadas no período de janeiro de 1998 a maio de 2001, preço dos combustíveis e taxa de juros praticados no mercado.

Os custos de investimentos foram estimados a partir de propostas técnicas e comerciais fornecidas pela empresa Koblitz.

4.2 Métodos

O poder calorífico dos resíduos foi determinado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) que analisou amostras dos mesmos utilizando bomba calorimétrica, segundo norma ASTM D 240-92. A umidade dos resíduos foi determinada segundo NBR 8112/86, análise imediata – item 4.2. (DQ-LCL-PE-080) e o teor de enxofre pela ASTM 04239-94. A análise química das amostras foi feita pelo Instituto de Química da Universidade de São Paulo.

Para elaboração e análise das alternativas de ciclos termodinâmicos foram utilizados as 1ª e 2ªs leis da termodinâmica e o gráfico de Mollier, segundo metodologia desenvolvida por Van Wylen et al (1995).

No estudo da análise econômica financeira utilizou-se a taxa interna de retorno (TIR) e a metodologia de análise do valor presente. Estes indicadores e instrumentos de análise de custos ajudaram a orientar as conclusões sobre a viabilidade de implantação dos projetos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do consumo mensal de energia elétrica são apresentados no Quadro 1 do apêndice A. No Quadro 2 do Apêndice A são apresentados os dados de produção de chapas e consumo de vapor. Através da produção mensal e do consumo de vapor é obtida a quantidade de vapor necessária por tonelada de chapa conforme Quadro 2 do Apêndice A; da mesma forma é apresentado o consumo de óleo combustível (Quadro 3 do Apêndice A) e consumo de cavacos de madeira para queima em caldeiras (Quadro 4 do Apêndice A). Os demais resultados são apresentados juntamente com a discussão dos mesmos. A quantidade de resíduos de cascas está nos Quadros 6 e 7 do mesmo Apêndice.

5.1 Fluxograma de produção

O fluxograma apresentado na Figura 5 demonstra em cada ponto do processo produtivo os parâmetros dos produtos obtidos.



Figura 5. Fluxograma do processo de fabricação de painéis de fibra de madeira

5.2 Quantificação dos resíduos gerados no processo de fabricação

5.2.1 *Cascas de eucalipto*

Através do cálculo da média dos valores do Quadro 6 do apêndice A, verifica-se que a geração do resíduo denominado “cascas de eucalipto” é de 41,3 ton/dia.

5.2.2 *Pó de lixamento, corte e refilo de chapas de fibra*

Somadas as quantidades de pó de lixa, pó de serra e refilo das linhas 1, 2 e 3 (figuras 1, 2 e 3 do apêndice B) obtêm-se 2101 kg/h, 1984 kg/h e 1937 kg/h de resíduos, respectivamente, totalizando 6.022 kg/h.

5.2.3 *Chapas refugadas*

As chapas refugadas totalizam respectivamente nas linhas 1, 2 e 3, 1039 kg/h, 834 kg/h e 661 kg/h, conforme figuras 1,2 e 3 do Apêndice B. Então, a quantidade total do resíduo denominada “chapa refugada” é de 2534 kg/h.

Quadro 5. Quantidades de resíduo gerado.

TIPO DE RESÍDUO	QUANTIDADE GERADA
Cascas	41,3 t/dia
Pó de lixa, corte e refilo	6022 kg/h
Chapas refugadas	2534 kg/h

5.3 Qualificação dos resíduos e biomassa gerados

Para efeito de utilização dos resíduos gerados como biomassa para queima em caldeiras, utilizaram-se como variáveis qualitativas para os cálculos térmicos os valores obtidos na determinação do poder calorífico de cada combustível e a sua umidade.

Para determinação do poder calorífico foram desenvolvidos ensaios junto ao IPT e Instituto de Química da USP (Apêndice C). A tabela com os resultados obtidos é demonstrada a seguir.

Quadro 6. Dados de PCS, PCI, umidade (%), % C, % H e % N, segundo análises do IPT

Combustível	Poder calorífico superior (PCS) MJ/kg	Poder calorífico inferior (PCI) MJ/kg	Umidade (%)	% C	% H	% N
Cascas Eucalipto	15,3	14,3	53	47,33	4,75	0,54
Cavacos Eucalipto	18,4	17,3	44	48,36	5,34	0,30
Pó Chapas de Fibra	17,4	16,2	13	48,58	5,69	0,17

5.3.1 *Cálculo do poder calorífico efetivo dos resíduos e dos cavacos de eucalipto (em base seca)*

5.3.1.1 *Cascas de eucalipto*

$$\text{PCI} = 14,3 \text{ MJ/kg}$$

$$U = 53\% \text{ (Umidade)}$$

$$\text{PCI}_{\text{ef}} = Q_2 - Q_1 \text{ (poder calorífico efetivo)}$$

$$Q_2 = \text{energia contida na massa seca}$$

Q_1 = Energia necessária para aquecer a água e o vapor contido na biomassa úmida

Para cada kg de biomassa existem 0,47 kg de massa seca, então:

$$Q_2 = PCI \times 0,47 \text{ kg}$$

$$Q_2 = 14,3 \text{ MJ} \times 0,47 \text{ kg} / 0,004184 \quad (1 \text{ kcal} = 0,004184 \text{ MJ})$$

$$Q_2 = 1606,4 \text{ kcal/kg de massa úmida}$$

Para cálculo de Q_1 utilizou-se a fórmula:

$$Q_1 = (Ma \times c_{p_a} \times \Delta t_a) + (Ma \times (h_2 - h_1)) + (Ma \times (h_3 - h_2))$$

Onde:

$$Ma = \text{massa de água para 1 kg de biomassa} = 0,53 \text{ kg}$$

$$C_{p_a} = \text{calor específico da água} = 1 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_a = (100^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 80^\circ\text{C} \text{ (aquecimento da água na fase}$$

líquida)

$$h_1 = \text{entalpia da água a } 100^\circ\text{C} = 100,0 \text{ kcal/kg}$$

$$h_2 = \text{entalpia do vapor a } 100^\circ\text{C} = 639,0 \text{ kcal/kg}$$

$$h_3 = \text{entalpia do vapor a } 200^\circ\text{C} = 687,2 \text{ kcal/kg (na temperatura}$$

de saída dos gases)

$$Q_1 = 0,53 ((1 \times 80) + (639 - 100) + (687,2 - 639,0))$$

$$Q_1 = 353,6 \text{ kcal/kg}$$

Então:

$$PCI_{ef} = 1606,4 - 353,6$$

$$PCI_{ef} = 1252,8 \text{ kcal/kg} = 5,2 \text{ MJ/kg de massa úmida}$$

5.3.1.2 *Pó de lixamento, serra e chapas refugadas*

De maneira similar ao cálculo feito para as cascas obtém-se:

$$PCI = 16,2 \text{ MJ/kg}$$

$$U = 13\% \text{ (umidade)}$$

Para cada kg de biomassa existe 0,87 kg de massa seca e 0,13 kg de água.

$$Q_2 = PCI \times 0,87$$

$$Q_2 = 3871,9 \times 0,87$$

$$Q_2 = 3368,6 \text{ kcal/kg}$$

$$Q_1 = 0,13 ((1 \times 80) + (639,0 - 100,0) + (687,2 - 639,0))$$

$$Q_1 = 86,7 \text{ kcal/kg}$$

$$PCI_{ef} = 3368,6 - 86,7$$

$$PCI_{ef} = 3281,9 \text{ kcal/kg} = 13,7 \text{ MJ/kg de massa úmida}$$

5.3.1.3 *Cavacos de eucalipto*

De maneira similar ao cálculo feito para as cascas obtém-se:

$$PCI = 17,3 \text{ MJ/kg}$$

$$U = 44\% \text{ (umidade)}$$

Para cada kg de biomassa existe 0,56 kg de massa seca e 0,44 kg de água.

$$Q_2 = PCI \times 0,56$$

$$Q_2 = 4134,8 \times 0,56$$

$$Q_2 = 2315,5 \text{ kcal/kg}$$

$$Q_1 = 0,44 ((1 \times 80) + (639,0 - 100,0) + (687,2 - 639,0))$$

$$Q_1 = 293,6 \text{ kcal/kg}$$

$$PCI_{ef} = 2315,5 - 293,6$$

$$PCI_{ef} = 2021,9 \text{ kcal/kg} = 8,5 \text{ MJ/kg de massa úmida}$$

5.4 Dados e parâmetros do ciclo termodinâmico atual

A entalpia do vapor na saída das caldeiras é de 668 kcal/kg (2,2 MPa, 214°C), sendo que segundo dados coletados de consumo de vapor do Quadro 2 do Apêndice A, são consumidos em média 64,2 tv/hora, o que corresponde a 42,9 Gcal/h. Nenhuma parte deste calor é transformada em trabalho, apenas se utiliza o mesmo com finalidade de cozimento da matéria prima na desfibração, como agente catalisador nas prensas e câmaras de tratamento térmico e como agente nebulizador nas câmaras de umidificação. O quadro 7 demonstra os dados das caldeiras que operam o ciclo atual.

Quadro 7. – Dados das caldeiras que operam atualmente na Duratex - Botucatu

Caldeiras	Combustível	Capacidade produção vapor (tv/h)	Eficiência (%)	Observação
1	Óleo BPF (tipo 2A)	20	80	Caldeira reserva
2	Pó	20	80	Opera com 75% da sua capacidade
3	Cavacos de Madeira	35	80	Opera com 70%da sua capacidade
4	Cavacos de Madeira	35	80	Opera com 70%da sua capacidade

5.5 Ciclo termodinâmico proposto utilizando os resíduos disponíveis e turbina a vapor.

5.5.1 Quantidade de vapor que pode se obter com a queima de resíduos

Nas condições do vapor adotadas como alternativa (4,0 MPa e 673 K), calculou-se a quantidade de vapor obtenível através da seguinte fórmula:

$$V = \frac{M \times \mu \times \text{PCIef}}{\Delta h}$$

Onde:

V = quantidade de vapor (kg/h) obtenível

M = massa de combustível necessária (kg/h)

Δh = diferença das entalpias entre o vapor na saída da caldeira(kcal/kg) e água de alimentação.

PCIef = Poder calorífico efetivo do combustível (kcal/kg)

μ = rendimento da caldeira

Os valores de entalpia foram obtidos através do diagrama de Mollier (Van Wylen, 1995) .

5.5.1.1 Vapor que pode ser obtido com a queima de cascas

$$V = \frac{41300,0 \times 0,80 \times 1252,8}{(768,0 - 105,0)}$$

$$V = 62.292,6 \text{ kgv/dia}$$

5.5.1.2 Vapor que pode ser obtido com a queima de pó de lixamento, serra e chapas refugadas

$$V = \frac{(6022,0 + 2534,0) \times 0,80 \times 3281,9}{(768,0 - 105,0)}$$

$$V = 33.882,9 \text{ kgv/h}$$

Calculando-se a quantidade de vapor obtenível com a queima de todos resíduos, considerando que a geração de chapas refugadas ocorre proporcionalmente ao rendimento horário da linhas de produção, que é de 90%, obtem-se:

$$V = (62.292 \text{ kgv/dia}) + ((33.882,9 \text{ kgv/h}) \times 24 \text{ h/dia} \times 0,9)$$

$$V = 794.162,6 \text{ kgv/dia}$$

A produção de vapor de 794.162,6 kgv/dia, a 4,0 MPa e 673K, totaliza a quantidade obtenível a partir da queima de todos resíduos, nas condições de umidade em que foram obtidos seus respectivos valores de poder calorífico.

5.5.2 Quantidade de cavacos necessários para complementação da matriz de combustíveis.

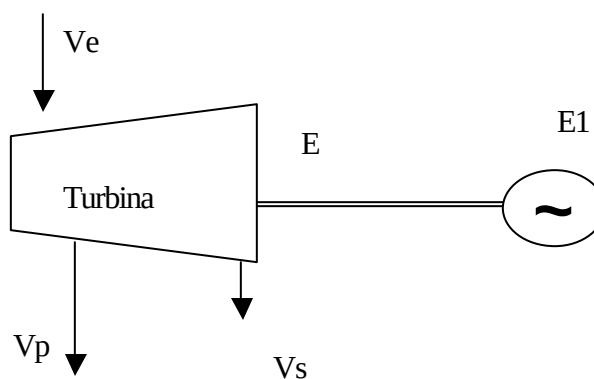


Figura 6. Balanço de massa e energia na turbina

As condições pré-estabelecidas para o sistema proposto são:

- V_e = Vapor de entrada = 4,0 MPa e 673 K
- V_s = Vapor de saída = 0,25 MPa
- V_p = Vapor para o processo = 64,2 t/h, 2,2 MPa saturado
- μ_t = Eficiência da turbina = 75%
- μ_m = Perdas mecânicas na turbina = 0,4%
- μ_r = Perdas no redutor = 2%
- μ_g = Perda no gerador = 4%
- E = Energia transferida para o eixo da turbina
- E_1 = Energia nos bornes do gerador
- M_{ve} = Massa de vapor na entrada da turbina (a determinar)
- M_{vs} = Massa de vapor na saída da turbina (a determinar)
- M_{vp} = Massa de vapor de extração para o processo = 64,2 t/h

5.5.2.1 *Cálculo do consumo de vapor na turbina*

- h_e = Entalpia de entrada = 768 kcal/kg
- h_s = Entalpia teórica de saída = 622 kcal/kg (variação isentrópica)
- h_p = Entalpia do vapor na extração = 658 kcal/kg

Fazendo-se o balanço de energia na turbina temos-se:

- $E = (M_{ve} \times h_e) - (M_{vs} \times h_s) - (M_{vp} \times h_p)$
- $E = (M_{ve} \times h) - (M_{ve} - M_{vp} \times h_s) - (M_{vp} \times h_p)$ “equação (a)”
- $E_1 = 14 \text{ MWh (nos bornes do gerador)}$

$$1\text{kWh/h} = 860 \text{ kcal/h}$$

$$E1 = 12.040.000 \text{ kcal/h } (14 \times 860 \times 1000)$$

Considerando as perdas mecânicas na turbina, o rendimento do redutor, as perdas no gerador e o rendimento da turbina obtem-se:

$$E = \frac{E1}{(1-\mu_m) \times (1-\mu_r) \times (1-\mu_g) \mu_t}$$

$$E = \frac{12.040.000 \text{ Kcal/h}}{0,996 \times 0,98 \times 0,96 \times 0,75}$$

$$E1 = 17.132.020,1 \text{ kcal/h}$$

Substituindo-se em (a) obtem-se:

$$17.132.020,1 = (M_{ve} \times 768) - (M_{ve} - 64,2) \times 622 - (64,2 \times 658)$$

$$M_{ve} = 117.358,4 \text{ kgv/h}$$

Então, a quantidade necessária de vapor para produção de 14 MWh de potência elétrica nos bornes do gerador e produção de 64,2 tv/h a 2,2 MPa, saturado, para o processo é de 117.358,4 kgv/h (a 4,0 MPa e 673 K).

A queima dos resíduos de cascas, pó e chapas permite a produção de 33.090,1 kgv/h (794.162,6 / 24). São necessários então mais 84.268,3 kgv/h que deverão ser produzidos através da queima de cavacos de madeira. A quantidade necessária de cavacos para complementação da matriz é:

$$M_{CAV} = \frac{84.268,3 \times (768-105)}{0,80 \times 2021,9}$$

$$M_{CAV} = 34.540,5 \text{ kg/h}$$

A massa de cavacos para complementar a matriz de combustíveis é de 34.540,5 kg/h, nas condições de umidade ensaiadas em laboratório (44%).

5.5.3 *Análise econômico-financeira*

A implantação da alternativa proposta de utilização dos resíduos e de complementação da matriz com cavacos de madeira para produção de vapor e utilização de calor, com a geração de energia elétrica representa um investimento de US\$ 12.500.000,00.

Quadro 8. - Investimentos necessários para implantação do projeto

Equipamento	Custo (US\$)
Gerador de vapor 120 tv/h, 4,0 MPa, 673 K	6.500.000,00
Turbina a vapor/redutor Admissão: 4 MPa, 673 K, 120 tv/h Extração: 2,2 MPa, 64,2tv/h Escape: 0,25 MPa	2.500.000,00
Gerador síncrono trifásico, 14000 kVA, 13,8 kV, 60 Hz, 04 pólos – painéis elétricos	1.500.000,00
Obra civil e montagem eletromecânica/materiais	2.000.000,00
Total	12.500.000,00

Os custos necessários para sustentação do processo são compostos pela aquisição de cavacos de madeira para queima. A mão-de-obra de operação seria a mesma que opera a planta atual de geração de calor.

Os custos evitados são a energia elétrica adquirida da concessionária e o óleo BPF substituído pelos resíduos aproveitados das sobras do processo.

Na análise econômico-financeira foram consideradas como receitas a quantidade de energia elétrica adquirida e o óleo BPF substituído pelos resíduos e cavacos de madeira. Como despesas considerara-se a depreciação, o custo adicional de combustíveis (cavacos de madeira) para complementação da matriz de combustíveis, juros, peças de reposição e manutenção.

Para a análise econômico-financeira parte dos resíduos gerados (pó de chapas, serra e chapas refugadas) não foram consideradas como receita, pois os mesmos já são processados na queima em caldeiras na situação atual.

Para cálculo das despesas com cavacos de madeira subtraiu-se dos 34.540,5 kg/h, 8540,6 kg/h, referentes à média de consumo de cavacos para energia produzidos atualmente (Quadro 4 do Apêndice A).

Quadro 9.– Demonstrativo de despesas e receitas

Receitas (US\$) Mensais		Despesas (US\$) Mensais	
Gasto evitado com energia elétrica	403.200,00	Cavacos de madeira	233.999,00
		Juros	62.500,00
		Depreciação	34.722,00
Gasto com óleo BPF	43.536,50	Manutenção	15.625,00
		Peças reposição	10.416,00
TOTAL	446.736,50	TOTAL	357.262,00

Observações:	Preço médio do MWh	=	US\$ 40,00
Preço da madeira	=	US\$ 10,00/m ³	
Densidade da madeira	=	800 Kg/m ³	
Preço do óleo BPF	=	US\$ 0,148/l	
PCI do óleo	=	9600 kcal/kg	
Custo de manutenção	=	1,5% ao ano (com relação ao investimento)	
Sobressalentes	=	1,0% ao ano (com relação ao investimento)	
Juros	=	12% ao ano	
Depreciação	=	30 anos	

5.5.3.1 *Análise pelo método do valor presente (em 10 anos)*

Quadro 10. – Fluxo de caixa

Ano	Receita (US\$)	Despesas (US\$)	Fluxo Líquido (US\$)
1	5.360.838,00	16.787.144,00	(- 11.426.306,00)
2	5.360.838,00	4.287.144,00	1.073.694,00
3	5.360.838,00	4.287.144,00	1.073.694,00
4	5.360.838,00	4.287.144,00	1.073.694,00
5	5.360.838,00	4.287.144,00	1.073.694,00
6	5.360.838,00	4.287.144,00	1.073.694,00
7	5.360.838,00	4.287.144,00	1.073.694,00
8	5.360.838,00	4.287.144,00	1.073.694,00
9	5.360.838,00	4.287.144,00	1.073.694,00
10	5.360.838,00	4.287.144,00	1.073.694,00

$$V_p = \sum_{i=0}^n (B_i - C_i) / (1 + j)^i$$

onde $(B_i - C_i)$ = Fluxo líquido

j = taxa de juros (12% a.a.)

(B = receita)

(D = despesa)

(n = tempo)

$$\begin{aligned} V_p = & -11.426.306,00 + \frac{1.073.694,00}{(1,12)^1} + \frac{1.073.694,00}{(1,12)^2} + \frac{1.073.694,00}{(1,12)^3} + \\ & + \frac{1.073.694,00}{(1,12)^4} + \frac{1.073.694,00}{(1,12)^5} + \frac{1.073.694,00}{(1,12)^6} + \\ & + \frac{1.073.694,00}{(1,12)^7} + \frac{1.073.694,00}{(1,12)^8} + \frac{1.073.694,00}{(1,12)^9} = \end{aligned}$$

$$V_p = \text{US\$} - 5.705.396,17$$

5.5.3.2 Cálculo da T.I.R. (taxa interna de retorno)

$$V_p = -11.426.306,00 + \frac{1.073.694,00}{(1 + r)^1} + \dots + \frac{1.073.694,00}{(1 + r)^9}$$

Fazendo-se o valor presente (V_p) igual a “zero”, obtem-se:

$$\text{T.I.R. (r)} = -0,0323 \quad (-3,23 \%)$$

Tanto o valor presente (que é negativo), quanto a taxa interna de retorno (que também é negativa), demonstram que os investimentos para implementação da alternativa de cogeração utilizando turbina a vapor, não são atraentes nas condições e parâmetros utilizados.

5.6 Ciclo termodinâmico proposto utilizando gás natural e resíduos do processo

5.6.1 Vapor que pode ser obtido através da queima dos resíduos

As condições de vapor para o processo são: pressão do vapor de 2,2 MPa, saturado.

A utilização dos resíduos do processo será feita numa caldeira de biomassa cuja quantidade de vapor obténível com a queima das cascas, pó e chapas refugadas é de:

$$V = \frac{M \times \mu \times PCIe}{\Delta h}$$

Onde:

V = quantidade vapor (Kg/h)

M = massa combustível

μ = rendimento da caldeira

PCIe = poder calorífico efetivo

Δh = diferença das entalpias entre o vapor de saída e água de entrada.

No caso das cascas:

$$V = \frac{41300 \times 0,8 \times 1252,8}{(658 - 105)}$$

$$V = 74.850,8 \text{ kg/dia}$$

$$V = 3.118,8 \text{ kg/h}$$

Com relação à queima de pó + chapas refugadas:

$$V = \frac{(6022,0 + 2534,0) \times 0,8 \times 3281,9}{(658-105)}$$

$$V = 40.622,0 \text{ kg/h}$$

Então, o total de vapor que pode ser obtido com a queima de resíduos é de 43.740,8 kgv/h, a 2,2 MPa, saturado.

5.6.2 Vapor que pode ser obtido através do aproveitamento dos gases de saída da turbina

O poder calorífico do gás natural é de 9400 kcal/m³, a uma temperatura de 243,15 K e pressão de 101.325 Pa (segundo a Comgás).

Utilizando uma turbina a gás, cujo rendimento global é de 37% (Koblitz), para produção de 14 MWh nos bornes de um gerador, necessita-se de 12.040.000,00 kcal/h. Assim sendo, a quantidade de gás a ser introduzida na turbina é de:

$$\text{Quantidade de gás} = \frac{12.040.000 \text{ kcal/h}}{0,37 \times 9400 \text{ kcal/m}^3} = 3.461,8 \text{ m}^3/\text{h}$$

Utilizando-se uma caldeira de recuperação com 70% de rendimento, obtem-se a seguinte quantidade de vapor saturado a 2,2 MPa, aproveitando-se os gases de combustão da turbina a gás:

$$\text{Vapor obtenível} = \frac{V_g \times (1 - \mu) \times \mu_c \times \text{PCIg}}{\Delta h} \quad (\text{kg/h})$$

onde:

V_g = quantidade de gás (m^3/h)

μ = rendimento da turbina a gás

μ_c = rendimento da caldeira de recuperação

$\text{PCIg} = 9400 \text{ kcal/m}^3$

Δh = diferença das entalpias entre o vapor produzido e a água de entrada.

$$\text{Vapor obtenível} = \frac{3.461,8 \times (1 - 0,37) \times 0,7 \times 9400}{(658 - 105)}$$

vapor obtenível = 25.950,4 kg/h

Sendo assim, é possível com a queima dos resíduos do processo e a utilização de 3.461,8 m^3/h de gás natural com queima em turbina obter 69,7 tv/h, saturado a 2,2 MPa e energia elétrica (14MWh nos bornes do gerador).

5.6.3 *Análise Econômico Financeira*

A implantação da alternativa proposta de utilização dos resíduos em uma caldeira de biomassa e a queima de gás natural em turbina, cujos gases de exaustão produzirão vapor através de uma caldeira de recuperação, representa um investimento de US\$ 11.500.000,00.

Quadro 11. – Investimentos necessários para implantação do projeto

Equipamento	Custo US\$
01 gerador de vapor de 50 tv/h, 2,2 MPa, saturado para queima de biomassa	1.500.000,00
02 turbo geradores 7.000 kWh cada (nos bornes do gerador) com 2 caldeiras de recuperação acopladas de 14 tv/h, saturado a 2,2 MPa.	8.000.000,00
Obra civil, montagem eletromecânica, materiais e painéis elétricos.	2.000.000,00
TOTAL	11.500.000,00

Os custos evitados são a energia elétrica adquirida da concessionária e o óleo BPF substituído pelos resíduos aproveitados das sobras do processo (apenas as cascas de eucalipto). O gasto evitado com uso de cavacos de madeira também constitui parte da receita.

As despesas incluem o consumo de gás natural, juros, depreciação, manutenção e peças de reposição.

Quadro 12. – Demonstrativo de receitas e despesas

Receitas Mensais (US\$)		Despesas Mensais (US\$)	
Custo evitado com energia elétrica	403.200,00	Gás natural	274.174,60
Custo evitado com cavacos	76.865,40	Juros	57.500,00
Custo evitado com óleo BPF	43.536,50	Depreciação	63.888,90
		Manutenção	14.375,00
		Reposição	9.583,00
TOTAL	523.601,90	TOTAL	419.521,50

Preço do gás natural: US\$ 0,11/m³

Preço do MWh: US\$ 40,00

Preço da madeira: US\$ 10,00/m³

Densidade da madeira: 800 kg/m³

PCI do óleo: 9600 kcal/kg

PCI do gás natural: 9400 kcal/m³

Custo de manutenção: 1,5% ao ano (com relação ao investimento)

Preço do óleo BPF: US\$ 0,148/l

Sobressalentes: 1.0% ao ano (com relação ao investimento)

Juros: 12% ao ano

Depreciação: 15 anos

5.6.3.1 *Análise pelo método do valor presente (em 10 anos)*

Quadro 13. – Fluxo de caixa

Ano	Receitas (US\$)	Despesas (US\$)	Fluxo líquido (US\$)
1	6.283.222,80	16.534.258,00	(-10.251.035,20)
2	6.283.222,80	5.034.258,00	1.248.964,00
3	6.283.222,80	5.034.258,00	1.248.964,00
4	6.283.222,80	5.034.258,00	1.248.964,00
5	6.283.222,80	5.034.258,00	1.248.964,00
6	6.283.222,80	5.034.258,00	1.248.964,00
7	6.283.222,80	5.034.258,00	1.248.964,00
8	6.283.222,80	5.034.258,00	1.248.964,00
9	6.283.222,80	5.034.258,00	1.248.964,00
10	6.283.222,80	5.034.258,00	1.248.964,00

$$\begin{aligned}
 V_p &= -10.251.035,20 + \frac{1.248.964,00}{(1,12)^1} + \frac{1.248.964,00}{(1,12)^2} + \frac{1.248.964,00}{(1,12)^3} \\
 &+ \frac{1.248.964,00}{(1,12)^4} + \frac{1.248.964,00}{(1,12)^5} + \frac{1.248.964,00}{(1,12)^6} + \\
 &+ \frac{1.248.964,00}{(1,12)^7} + \frac{1.248.964,00}{(1,12)^8} + \frac{1.248.964,00}{(1,12)^9} = \\
 V_p &= \text{US\$} - 3.596.239,00
 \end{aligned}$$

5.6.3.2 Cálculo da T.I.R. (taxa interna de retorno)

$$V_p = -10.251.035,20 + \frac{1.248.964,00}{(1+r)^1} + \dots + \frac{1.248.964,00}{(1+r)^9}$$

Fazendo-se o valor presente (Vp) igual a “zero” obtém-se:

$$\text{T.I.R. (r)} = 0,0188 \text{ (1,88 \%)}$$

Os resultados obtidos de valor presente (negativo) e taxa interna de retorno (muito abaixo das taxas praticadas em aplicações financeiras) indicam que os investimentos para implementação da alternativa de cogeração utilizando gás natural, nas condições analisadas, não são recomendáveis.

6 CONCLUSÕES

- O montante de energia disponível em forma de resíduos para queima em caldeiras é de 126,1 GJ/h, muito pouco expressivo perto da quantidade de combustíveis requerida para geração auto-suficiente de energia elétrica e térmica, sendo necessário, no caso do uso exclusivo de biomassa , a complementação correspondente a 31.086 m³ de madeira por mês.
- Esta complementação significa ter que disponibilizar 1243 ha de florestas (cerca de 2.000.000 de árvores) anualmente; o que representa cerca de 16,5 árvores processadas para produzir 1 MWh. Esta madeira significa matéria-prima suficiente para produzir 149.200 toneladas do produto durante o mesmo período de 1 ano. Sob o aspecto estratégico do negócio esta não se configura como uma alternativa atraente.
- Sob o aspecto econômico, segundo a Análise do Valor Presente (em 10 anos) e da verificação da Taxa Interna de Retorno (T.I.R.), os investimentos para cogeração de energia utilizando os resíduos industriais, complementados com cavacos de madeira para

queima, não são vantajosos. O preço da energia elétrica praticado no mercado, verificado nos pagamentos feitos pela empresa à concessionária (US\$ 40,00/MWh) é o principal fator que inviabiliza tais investimentos. Neste caso, só se começa a parecer vantajosa a cogeração com os parâmetros utilizados, com custos de energia elétrica acima dos US\$ 47,76/MWh (19,4 % de aumento), ponto em que a Taxa Interna de Retorno se iguala a taxa de juros utilizada e o Valor Presente é “zero”. Trata-se de um investimento de risco, pois em 10 anos, outros custos podem ser afetados, tais como o custo da madeira, as taxas de juros e principalmente o mercado de chapas de fibra.

- A cogeração com utilização de gás natural aliada à queima de resíduos é estrategicamente uma melhor alternativa pois substitui os combustíveis utilizados atualmente trazendo conseqüências benéficas. São eles: o óleo BPF e os cavacos de madeira picados para queima em caldeiras. Quanto ao óleo BPF, a eliminação de seu uso significa menores emissões de poluentes. No caso da madeira picada para energia, sua substituição por gás natural implica em maior disponibilidade de florestas para obtenção de matéria-prima para fabricação de chapas.

- Sob os aspectos econômicos, embora a utilização de gás natural seja mais viável que a utilização de biomassa (madeira), a análise de Valor Presente e a Taxa Interna de Retorno, não indicam que sua utilização seja aplicada no momento. O Valor Presente igual a zero e a Taxa Interna de Retorno igual a taxa de juros praticada, acontece quando o valor da energia elétrica é maior que US\$ 44,70/MWh (aumento de 11,75%).

- Conclui-se então que os custos de energia elétrica praticados atualmente são baratos e não permitem a viabilização de investimentos e de retorno dos mesmos com as alternativas ou sistemas de cogeração simulados para a fábrica em questão. Estes investimentos só

serão vantajosos em condições de aumentos consideráveis dos custos de energia elétrica ou em situações em que sua falta passa a ser uma realidade irreversível, impedindo assim a continuidade do processo de produção fabril.

- A umidade dos resíduos e da biomassa é fator fundamental quando da análise de seu aproveitamento pois, utiliza-se grande parte do poder calorífico do combustível para evaporar a parcela de água presente no mesmo. No caso das cascas (umidade 53%) o poder calorífico efetivo é de apenas 5,2 MJ/kg ou seja: 36,4% do poder calorífico inferior. As chapas de refugo e pó de lixa possuem umidade menor (13%), sendo que seu poder calorífico efetivo é de 13,7 MJ/kg, 84,6% do poder calorífico inferior. Esta variável é de extrema importância quando da análise e simulação de um sistema de cogeração utilizando biomassa como combustível.

7. SUMMARY

This work was conducted in order to evaluate the waste generation potentials on an eucalyptus hardboard mill, and to use it to produce thermal and electrical energy simulated as a cogeneration system, to improve the competitiveness of its products, through the cost reduction and, at the same time, to contribute for the expansion of the electric power generation.

Production data (from jan 1998 to may 2001) and energy consumption at the same period were collected at Duratex Plant, located in Botucatu, São Paulo State.

Solid waste generation data was collected and its heat generation power was also obtained. With these values, it was possible to calculate the quantity of steam produced after to burn this biomass on boilers.

With the steam consumption data (from January 1998 to may 2001) collected at Duratex plant, it was possible to know the amount of thermal energy used to produce hardboard.

After the thermal and electrical needs estimation, it became possible to simulate a cogeneration system using natural gas or biomass, both them with solid waste used like fuel.

The Present Value and the Internal Returning Rate methods were used to evaluate the investments for each alternative.

The cogeneration using natural gas and solid waste from the process (saw dust, sanding dust, rejected boards and barks used to produce saturated steam) showed to be the most indicated of both alternatives.

The complementation of the necessary amount of biomass with eucalyptus chips from renewed forests, instead to use oil or gas is not a strategic option, because it is necessary to use a big quantity of forest, so it means to burn the same raw material used for boards production.

It was possible to conclude that the electrical energy price in the market is very cheap to justify the investments in both cogeneration technologies.

The investments should start to be attractive only if the electrical energy prices could be bigger than US\$ 44,70/ MWh and US\$ 47,46/ MWh respectively for natural gas and biomass alternatives; or if a energy crisis becomes to occur.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARRUDA, G.; Eucalipto tem múltiplas utilidades, Jornal Madeira & Cia, Curitiba, 1996. Alternativa Editora Ltda; Curitiba, 1996 (3/25):5
- BAJAY, S.V.; Planejamento energético: Necessidade, objetivo e metodologia. Revista Brasileira de Energia, Campinas, 1989, SBPE, Campinas, 1989 1 (1): 45-53.
- BARREDA, E., LLAGOSTERA, J.; “Comparação Econômica de cogeração em usina de cana de açúcar”, Anais do Congresso Iberoamericano de Energia Mecânica, La Habana, Cuba, 1996.
- BRAUN, G.; “Bionergia para el desarrollo” , Proceedings of the International Seminar “Comercial Energy Generation in the Cone Agro Industry”, Ciudad de Guatemala, Guatemala 1994. pp. 39 - 50.
- BRIDGWATER, A.V.; “The Thechnical and Economic Feasibility of Biomass Gaseification for Power Cogeneration”. Fuel, vol. 74, number 5, 1995. pp. 631 – 635.
- BRITO, J. O.; Madeira para a floresta: a verdadeira realidade do uso de recursos florestais. Silvicultura 11 (41): 1986. pp. 188-193.
- BRITO, J.O.; Expansão da Produção florestal em unidades energéticas, In: Congresso Florestal Brasileiro, 7º , Anais, Curitiba, 1993. SBS, Curitiba, 1993.

- CAMPELLO, S.B.; Ciclos térmicos–Cogeração de energia, Recife: Comunicarte, 1990.107 p.
- CRAIG, K., MANN, M.; Cost and Performance Analysis of Biomass Based Integrated Gasification Combined Cycle (BIGCC) Power Systems. NREL Report, Golden, CO, USA, October, 1996.
- EPRI – Electric Power Research Institute, 1993. Technical Assessment Guide – Electric Supply, vol. 1, revision 7.
- FAO, 1990 “Energy Conservation in The mechanical Forest Industries”, Forestry paper 93, Roma.
- HALL, D. O., HOUSE, J.O.I., SCRASE, I.; Overview of Biomes Energy, In: Industrial uses of biomass Energy; the example of Brazil, Ed Frank Rossillo-Calle; Sérgio V. Bajay e Harry Rothman. London and New York, Taylor & Francis, 2000, pp. 1-26.
- HAKKILA, P.; Forest chips as fuel for heating plants in Finland. Folia Forestalia nº 586, 1984. pp. 1 - 62.
- HERRERA, M.C.; Diretoria do Programa de Diversificação do GEPLACEA (Grupo de países Latino Americanos do Caribe Exportadores de Açúcar) 1999. Comunicação Interna.
- HOWARD, J.O.; Wood for energy in the pacific northwest: an overview. US forest service, general technical report 50-24, 1979. 59 p.
- IPESI, Eletrônica & Informática; Maio 2001; pp. 20-24.
- KARCHESI, J. & KOCH, P.; Energy production from hardwoods growing in southern pine sites. U.S. Forest Service, General Technical Report SO - 24, 1979. 59 p.
- LIMA, C.R. , BAJAY, S.V.; A reposição florestal obrigatória e o planejamento energético regional. Revista baiana de Tecnologia – Tecbahia, Editel, Camaçari, 2000. 1(15): pp.140 - 144.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; setor energético: destaques 1999 e oportunidades de negócio, 2000. 16p.

- McMINN, J.W., NUTTER, W.L.; Energy wood harvesting a study of promises and pitfalls. Georgia Forest Research, Paper 17, 1981. 7 p.
- OVEREND, R., KINOSHITA, C.M., ANTRAL KR., M.J.; “Bionergy in Transition”, Jornal of Energy Engineering, vol. 122, number 3, 1996.
- PHILLIPS, D.R.; forest residue: a significant source of energy. Southern Lamberman, Dec.15, 1979. pp. 101-103.
- SOLANTAUSTA, Y., BRIDGWATER, A.T., DECKMAN, D.; “Feasibility of Power Production with Pyrolysis and Gasification Systems”. Biomass and Bioenergy, vol. 9, numbers 1-5, 1995. pp. 257-269.
- THOMASELLI, I., SILVA, L.B.X., REICHMANN NETO, F.; Energy potential of 23 species from fast growing plantations. Madison, IUFRO Division. V conference on Energy from biomass, 1983. 12p.
- VAN DEN BROEK, R., FAALJ, A., VAN VUK, A.; “Biomass Combustion for Power Generation”. Biomass and Energy, numbers 1-5, Vol 11, number 4, 1996. pp 271-281.
- VAN WYLEN, G., SONNTAG, R, BORGNAKKE, C.; Fundamentos da Termodinâmica Clássica. 4.ed São Paulo: Edgar Blücher, 1995. 591p.
- WALTER, A.C.S.; “Avaliação e Localização do potencial Brasileiro de produção e eletricidade a partir de sub produtos da cana de açúcar”, Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia, 1996. pp. 571 – 582.
- WALTER, A.C.S., LLAGOSTERA, J., GALLO, W.L.R.; “Análise de Parâmetros de Alocação de Custos em Sistemas de cogeração de equipamentos em turbinas de contra-pressão”, Proceedings do VI ENCIT/ VII LATCYM, 1996. pp. 195 – 200
- WEHR,W., CAMARGO, J. V. J. de, CHMELIAUSKAS, W., FANINI, R.; Cogeração de energia com turbinas a vapor Siemens/ Dedini, 1992. pp. 2-11.

WILLIAMS, R.H., LARSON, E.D.; "Biomass Gasifier Gas Turbine Power Generation Technology". Biomass and Bioenergy, vol. 10, numbers 2-3, 1996. pp.149 – 166.

APÊNDICE A

Quadro 1. Consumo de Energia Elétrica

CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA kwh / mês

1998

CONSUMO	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
	4946212	8508779	8278921	8150534	8103125	7667028
	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
	8393125	7416337	8087216	7924710	8295546	6890518

1999

CONSUMO	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
	6964999	8102414	8219867	8667149	8374611	8934772
	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
	9035669	9021150	8838441	9223814	9115416	9059222

2000

CONSUMO	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
	6745516	7998437	8470183	8716333	9165877	8942207
	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
	9483802	9366836	9120116	9370823	9037195	8462558

2001

CONSUMO	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
	8999282	8416422	9242637	8300146	8811820	
	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez

Quadro 2. Consumo de Vapor e Produção de Chapas

ÍNDICE DE VAPOR UNIDADE BOTUCATU

DATA	PROD. TON BRUTA/mês	TON BRUTA DIA	PROD. TON. LIQ./mês	TON VAPOR/mês	DIAS PROD VAPOR	TON VAPOR DIA	ÍNDICE TON VAPOR/TON BRUTA	ÍNDICE TON VAPOR /TON LIQ.
31/01/1997	17.640,90	630,03	17.172,00	30.350,60	28,00	1.083,95	1,72	1,77
28/02/1997	18.791,60	671,13	18.172,00	35.700,50	28,00	1.275,02	1,90	1,96
31/03/1997	19.880,60	641,31	19.263,00	43.310,10	31,00	1.397,10	2,18	2,25
30/04/1997	15.835,50	527,85	15.374,00	37.418,50	30,00	1.247,28	2,36	2,43
31/05/1997	19.692,70	635,25	19.252,00	48.146,30	31,00	1.553,11	2,44	2,50
30/06/1997	18.985,00	632,83	18.472,00	47.921,40	30,00	1.597,38	2,52	2,59
31/07/1997	20.541,00	662,61	19.926,00	53.699,90	31,00	1.732,25	2,61	2,69
31/08/1997	20.105,40	648,56	19.614,00	51.518,00	31,00	1.661,87	2,56	2,63
30/09/1997	19.981,20	666,04	19.352,00	48.907,50	30,00	1.630,25	2,45	2,53
31/10/1997	19.967,90	644,13	19.434,00	49.968,80	31,00	1.611,90	2,50	2,57
30/11/1997	18.557,10	618,57	18.137,00	46.008,50	30,00	1.533,62	2,48	2,54
31/12/1997	8.272,00	590,86	8.052,00	20.966,30	14,00	1.497,59	2,53	2,60
TOTAL ANO	218.250,90	632,61	212.220,00	513.916,40	345,00	1.489,61	2,35	2,42
31/01/1998	10.082,40	630,15	9.808,40	24.925,90	16,00	1.557,87	2,47	2,54
28/02/1998	17.663,70	630,85	17.124,70	41.629,50	28,00	1.486,77	2,36	2,43
31/03/1998	20.719,42	668,37	20.175,42	48.713,30	31,00	1.571,40	2,35	2,41
30/04/1998	18.078,82	602,63	17.597,82	43.714,20	30,00	1.457,14	2,42	2,48
31/05/1998	19.852,27	640,40	19.255,27	50.033,50	31,00	1.613,98	2,52	2,60
30/06/1998	17.830,39	594,35	17.332,39	40.306,90	30,00	1.343,56	2,26	2,33
31/07/1998	17.878,22	576,72	17.329,22	41.008,20	31,00	1.322,85	2,29	2,37
31/08/1998	16.049,08	517,71	15.531,08	38.170,80	31,00	1.231,32	2,38	2,46
30/09/1998	17.359,88	578,66	16.896,88	39.302,60	30,00	1.310,09	2,26	2,33
31/10/1998	17.165,12	553,71	16.737,12	44.718,20	31,00	1.442,52	2,61	2,67
30/11/1998	17.817,60	614,40	17.323,60	45.001,80	29,00	1.551,79	2,53	2,60
31/12/1998	14.755,71	491,86	14.337,71	37.295,80	30,00	1.243,19	2,53	2,60
TOTAL ANO	205.252,61	589,81	199.449,61	494.820,70	348,00	1.421,90	2,41	2,48

ÍNDICE DE VAPOR UNIDADE BOTUCATU

DATA	PROD. TON BRUTA/mês	TON BRUTA/ DIA	PROD. TON. LIQ./mês	TON VAPOR/mês	DIAS PROD VAPOR	TON VAPOR DIA	INDICE TON VAPOR/TON BRUTA	INDICE TON VAPOR /TON LIQ.
31/01/1999	15.688,15	560,29	15.287,15	39.257,30	28,00	1.402,05	2,50	2,57
28/02/1999	16.485,10	588,75	15.994,10	42.692,80	28,00	1.524,74	2,59	2,67
31/03/1999	19.012,70	613,31	18.764,70	47.668,30	31,00	1.537,69	2,51	2,54
30/04/1999	17.876,17	616,42	17.309,17	42.526,45	29,00	1.466,43	2,38	2,46
31/05/1999	18.517,87	617,26	18.094,87	48.057,10	30,00	1.601,90	2,60	2,66
30/06/1999	18.909,55	630,32	18.473,55	51.028,60	30,00	1.700,95	2,70	2,76
31/07/1999	18.485,11	596,29	18.154,11	47.549,00	31,00	1.533,84	2,57	2,62
31/08/1999	19.014,28	613,36	18.687,28	52.661,80	31,00	1.698,77	2,77	2,82
30/09/1999	18.356,83	611,89	17.937,83	50.642,60	30,00	1.688,09	2,76	2,82
31/10/1999	18.547,11	598,29	18.134,11	48.967,90	31,00	1.579,61	2,64	2,70
30/11/1999	17.826,25	594,21	17.174,89	48.355,10	30,00	1.611,84	2,71	2,82
31/12/1999	17.318,00	597,17	16.598,24	46.034,20	29,00	1.587,39	2,66	2,77
TOTAL ANO	216.037,12	603,46	210.610,00	565.441,15	358,00	1.579,44	2,62	2,68
31/01/2000	12.420,37	460,01	11.780,24	38.680,80	27,00	1.432,62	3,11	3,28
29/02/2000	16.166,60	557,47	15.405,54	40.592,50	29,00	1.399,74	2,51	2,63
31/03/2000	17.211,00	555,19	16.332,99	46.658,00	31,00	1.505,10	2,71	2,86
30/04/2000	18.154,48	626,02	17.317,68	45.907,50	29,00	1.583,02	2,53	2,65
31/05/2000	18.461,07	615,37	17.567,42	49.212,40	30,00	1.640,41	2,67	2,80
30/06/2000	18.382,20	612,74	17.660,92	50.247,00	30,00	1.674,90	2,73	2,85
31/07/2000	19.101,56	616,18	18.183,39	53.078,50	31,00	1.712,21	2,78	2,92
31/08/2000	18.778,35	605,75	18.184,05	52.535,70	31,00	1.694,70	2,80	2,89
30/09/2000	18.248,69	608,29	17.523,90	50.868,10	30,00	1.695,60	2,79	2,90
31/10/2000	18.575,65	599,21	17.811,77	50.748,00	31,00	1.637,03	2,73	2,85
30/11/2000	18.398,64	613,29	17.675,83	50.553,00	30,00	1.685,10	2,75	2,86
31/12/2000	16.766,15	578,14	16.089,81	47.716,40	29,00	1.645,39	2,85	2,97
TOTAL ANO	210.664,76	588,45	201.533,54	576.797,90	358,00	1.611,17	2,74	2,86
31/01/2001	18.213,27	607,11	17.450,94	49.398,30	30,00	1.646,61	2,71	2,83
28/02/2001	16.597,90	592,78	15.780,95	46.603,60	28,00	1.664,41	2,81	2,95
31/03/2001	18.249,53	588,69	17.487,52	51.080,10	31,00	1.647,75	2,80	2,92
30/04/2001	16.543,61	590,84	15.895,78	47.050,50	28,00	1.680,38	2,84	2,96
31/05/2001	18.127,86	604,26	17.451,57	51.585,80	30,00	1.719,53	2,85	2,96
TOTAL ANO	87.732,17	596,82	84.066,76	245.718,30	147,00	1.671,55	2,80	2,92
TOTAL GERAL	937.937,56	602,79	907.879,91	2.396.694,45	1.556,00	1.540,29	2,56	2,64

Quadro 3. Consumo em litros de Óleo Combustível

CONSUMO OLEO BPF (litros/mês)

1998

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
CONSUMO	174254,1	141565,7	118923,1	576129,8	670118,4	150354,8
	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
	75406,76	77642,24	73300,36	131709,7	266930,7	375279,3

1999

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
CONSUMO	538132,4	724804,6	528656	468740	118835	157755
	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
	166390	173390	179643	464280	429780	370630

2000

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
CONSUMO	153870	168540	107570	68100	414340	690790
	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
	880990	382040	236130	52423	228335	273842

2001

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
CONSUMO	184465	323545	214907	135508	199530	

Quadro 4. Consumo de Madeira para Queima (em m³ sólido/mês)

ÍNDICE MADEIRA ENERGIA (m³ sólido por tonelada líquida de chapa produzida) - CONSUMO MADEIRA ENERGIA (m³ sólido/mês)

1998

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
INDICE	0,4567	0,3842	0,445	0,3831	0,2753	0,4808	0,4012	0,4568	0,522	0,5513	0,4758	0,2818
CONSUMO	4479,61	6579,73	8977,72	6741,58	5300,56	8333,92	6952,84	7095,3	8820,56	9227,97	8242,57	4040,36

1999

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
INDICE	0,3723	0,4771	0,3073	0,3907	0,5591	0,5403	0,5461	0,5631	0,5239	0,4669	0,419	0,3562
CONSUMO	5691,42	7630,79	5766,39	6762,17	10117,39	9981,11	9913,07	10522,31	9397,86	8466,75	7196,71	5913,02

2000

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
INDICE	0,4778	0,4089	0,4298	0,4973	0,423	0,3544	0,3408	0,4587	0,4919	0,512	0,5488	0,4931
CONSUMO	5628,71	6299	7020,47	8611,76	7431,72	6258,16	6196,7	8341,06	8619,42	9119,19	9699,84	7933,9

2001

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
INDICE	0,4960	0,5164	0,5523	0,5159	0,5147							
CONSUMO	8654,96	8149,58	9658,29	8200,59	8982,69							

Quadro 5. Consumo de Madeira, em m³ sólido, para o Processo

ÍNDICE MADEIRA PARA O PROCESSO (m³ sólido por tonelada líquida de chapa produzida) –
CONSUMO MADEIRA PROCESSO (m³ sólido/mês)

1998

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
indice	2,3982	2,6086	2,6005	2,5576	2,5964	2,559	2,5925	2,5905	2,6666	2,65	2,5371	2,5644
consumo	23522,24	44671,5	52465,66	45008,98	49994,05	44353,1	44926,18	40233,44	45057,57	44352,95	43951,71	36767,6

1999

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
indice	2,568	2,6503	2,6611	2,6312	2,5172	2,7396	2,6208	2,4797	2,5813	2,4661	2,5919	2,5027
consumo	39257,53	42389,16	49934,74	45543,77	45549,14	50610,45	47579,12	46339,4	46302,06	44721,14	44515,99	41540,45

2000

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
indice	2,7850	2,6557	2,5078	2,5986	2,5003	2,3220	2,5007	2,4189	2,6048	2,6192	2,7440	2,6689
consumo	32807,77	40912	40959,14	45002,11	43923,29	41008,28	45470,35	43984,93	45647,12	46652,09	48502,72	42942

2001

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
indice	2,6842	2,7137	2,6234	2,5578	2,5628							
consumo	46842,15	42824,95	45875,9	40658,87	44724,77							

Quadro 6. Geração de Resíduos de Cascas**GERAÇÃO DE RESÍDUOS (CASCAS DE EUCALIPTO)**

Período:.....setembro/2000 a maio/2001

Dias de produção no período:.....238 dias

Quantidade em toneladas, gerada no período:..... 9.827,08

Media diária:.....41,3 t/dia

Quadro 7. Cascas Geradas Durante o Período de setembro/2000 a maio/2001

Mês	Total Cascas (kg)
Setembro/2000	420.050
Outubro/2000	1.059.860
Novembro/2000	1.268.310
Dezembro/2000	1.012.320
Janeiro/2001	1.185.730
Fevereiro/2001	1.277.480
Março/2001	1.365.200
Abril/2001	1.284.870
Mai/2001	973.260
TOTAL	9.847.080

APÊNDICE B

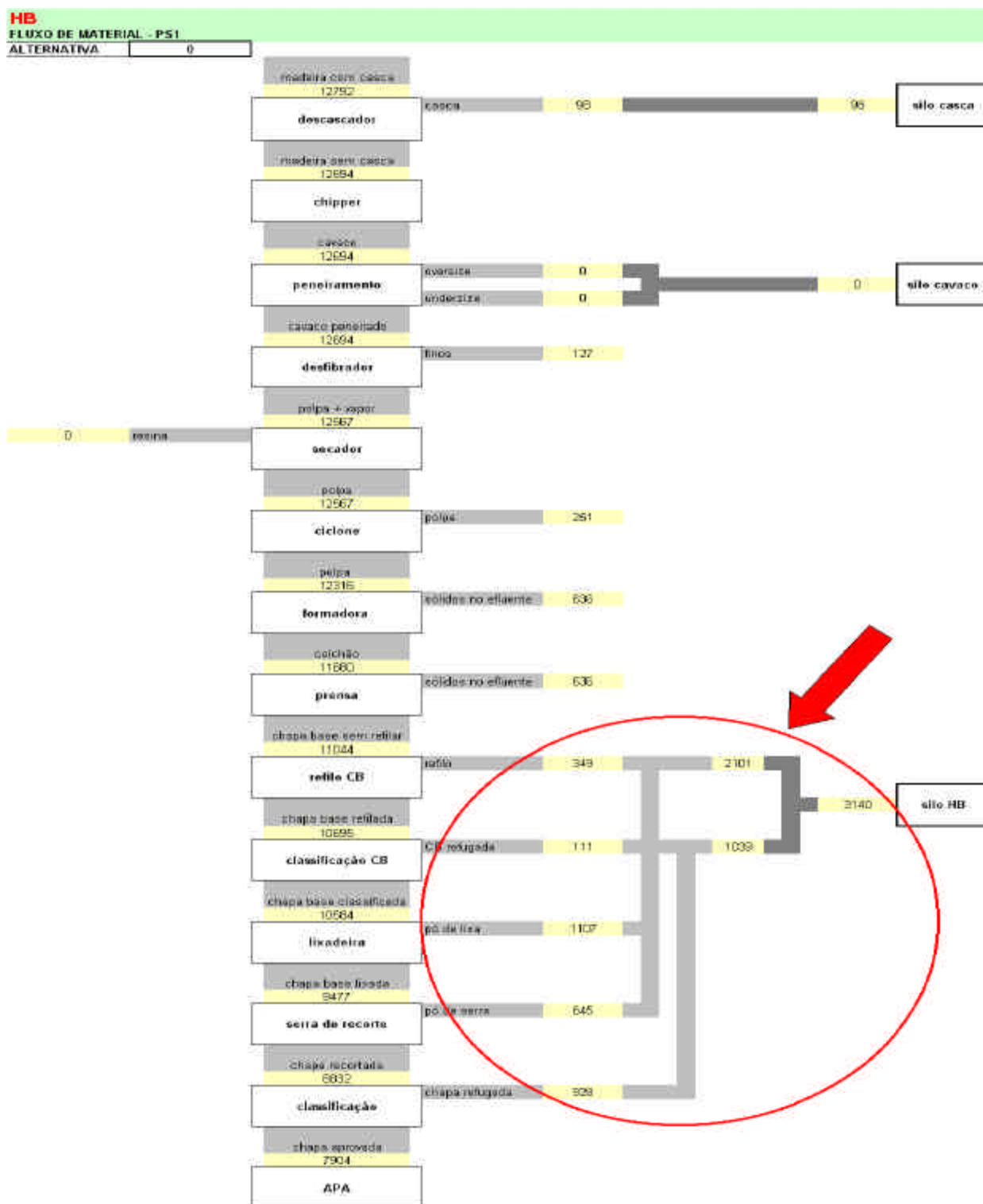


Figura 1. Fluxograma de massa em kg/h da Linha de Produção 1

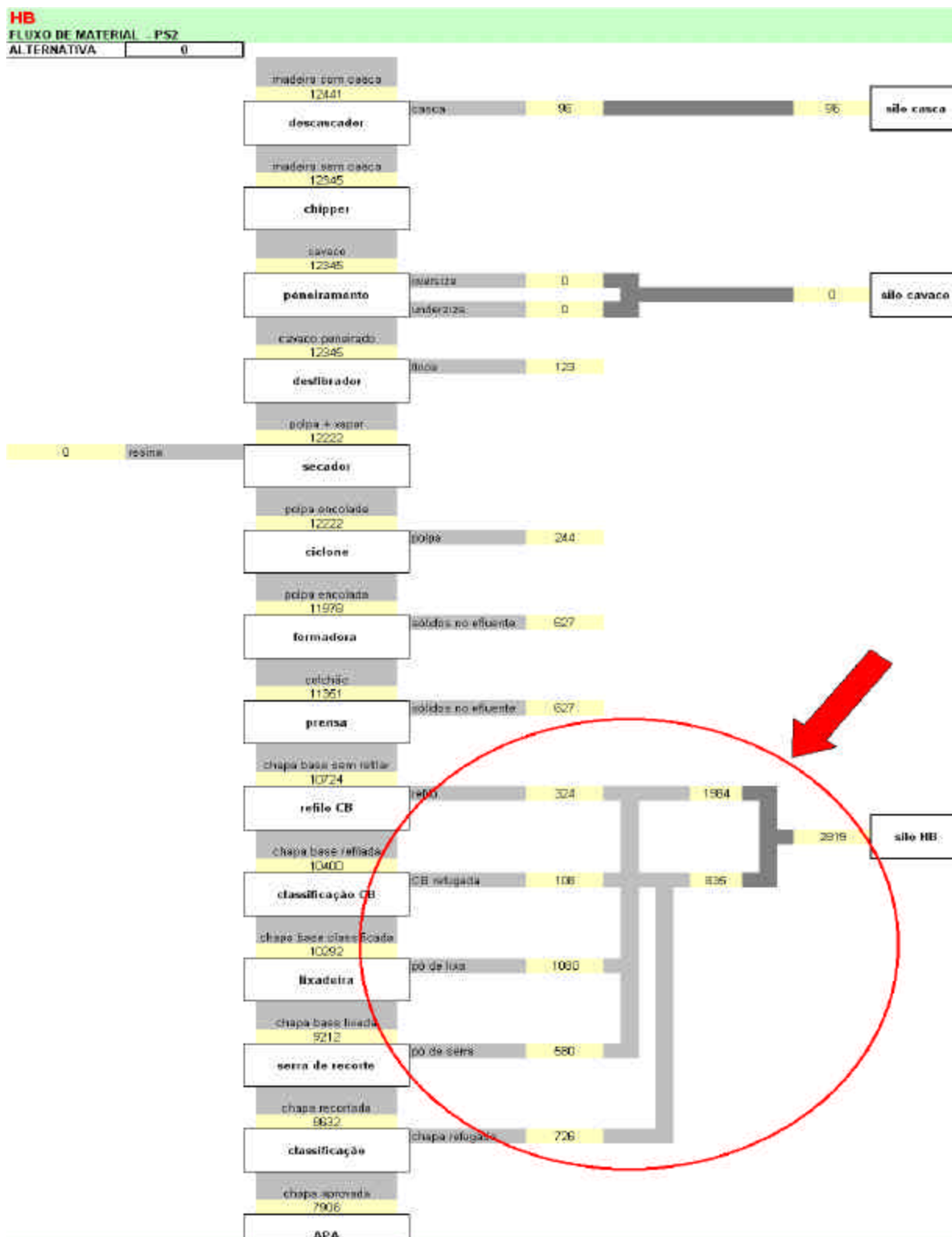


Figura 2. Fluxograma de massa em kg/h da Linha de Produção 2

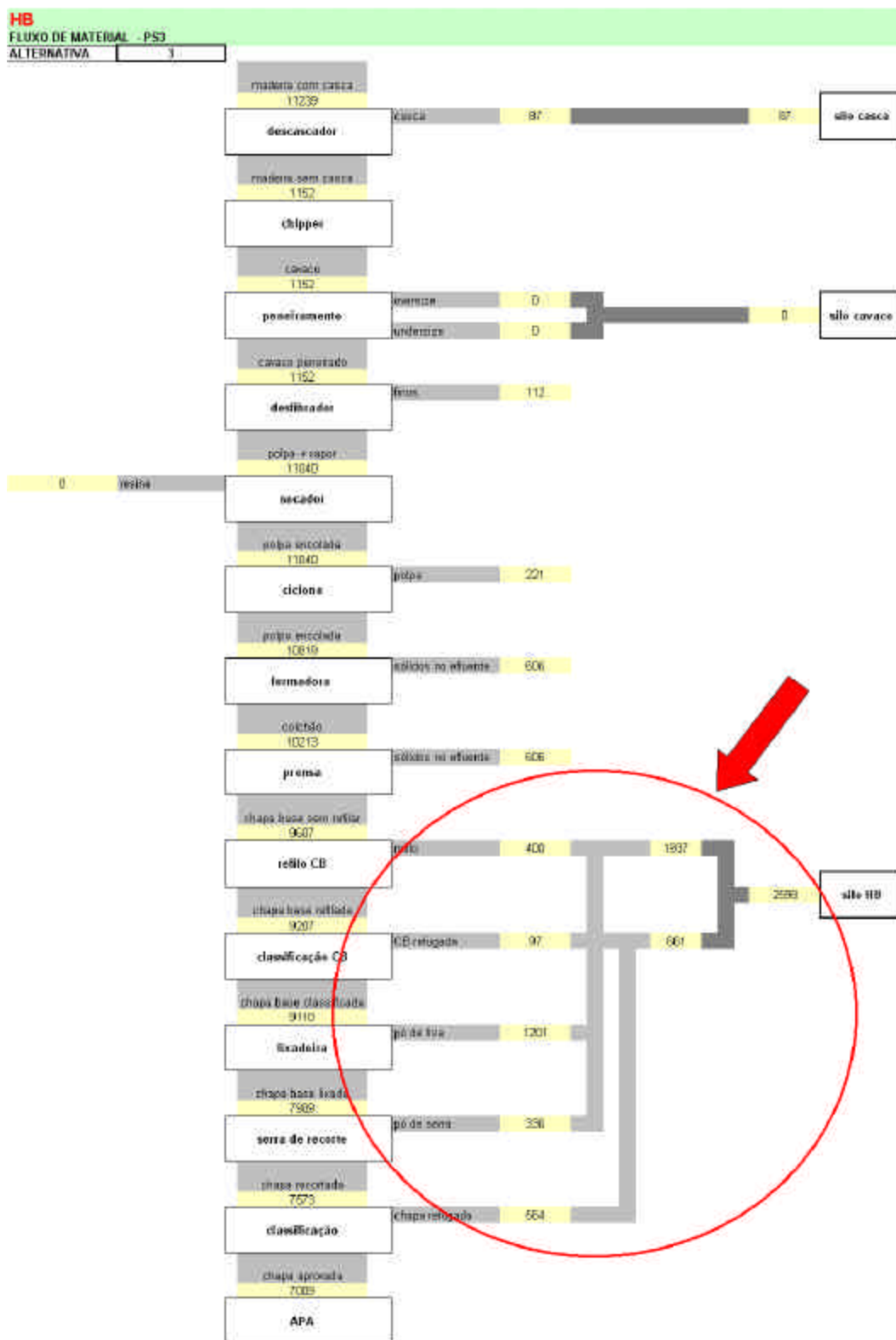


Figura 3. Fluxograma de massa em kg/h da Linha de Produção 3

APÊNDICE C

RESULTADOS DAS ANÁLISES DE PODER CALORÍFICO

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT)

Quadro 8. Dados de PCS, PCI, umidade (%), % C, % H e % N, segundo análises do IPT

Combustível	Poder calorífico superior (PCS) MJ/kg	Poder calorífico inferior (PCI) MJ/kg	Umidade (%)	% C	% H	% N
Cascas Eucalipto	15,3	14,3	53	47,33	4,75	0,54
Cavacos Eucalipto	18,4	17,3	44	48,36	5,34	0,30
Pó Chapas de Fibra	17,4	16,2	13	48,58	5,69	0,17