



UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS (UFGD)
FACULDADE DE ENGENHARIA (FAEN)
ENGENHARIA DE ENERGIA

Anderson Reinaldo Candido
Eduardo Felipe Romão
Gabriel Locatelli do Nascimento

Viabilidade de diferentes tecnologias em sistemas de cogeração aplicados as indústrias de papel e celulose.

Dourados-MS

2014

Anderson Reinaldo Candido
Eduardo Felipe Romão
Gabriel Locatelli do Nascimento

Viabilidade de diferentes tecnologias em sistemas de cogeração aplicados as indústrias de papel e celulose.

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Faculdade de Engenharia

Universidade Federal da Grande Dourados

Orientador: Prof. Me. Ramon Eduardo Pereira Silva

Dourados-MS

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

C217v	<p>Candido, Anderson Reinaldo.</p> <p>Viabilidade de diferentes tecnologias em sistemas de cogeração aplicados as indústrias de papel e celulose. / Anderson Reinaldo Candido, Eduardo Felipe Romão, Gabriel Locatelli do Nascimento – Dourados, MS : UFGD, 2014.</p> <p>61f.</p> <p>Orientador: Prof. Me. Ramon Eduardo Pereira Silva.</p> <p>Monografia (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade Federal da Grande Dourados.</p> <p>1. Cogeração. 2. Indústria de papel e celulose. 3. Análise energética. 4. Análise econômica. I. Romão, Eduardo Felipe. II. Nascimento, Gabriel Locatelli do. III. Título.</p> <p>CDD – 621.374</p>
-------	---

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central – UFGD.

©Todos os direitos reservados. Permitido a publicação parcial desde que citada a fonte.

Anderson Reinaldo Candido
Eduardo Felipe Romão
Gabriel Locatelli do Nascimento

Viabilidade de diferentes tecnologias em sistemas de cogeração aplicados as indústrias de papel e celulose.

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia na Universidade Federal da Grande Dourados, pela comissão formada por:

Orientador: Prof. Me. Ramon Eduardo Pereira Silva
FAEN- UFGD

Prof. Me. Antonio Carlos Caetano de Souza
FAEN- UFGD

Prof. Dr. Eduardo Manfredini Ferreira
FAEN- UFGD

Dourados, 22 de Março de 2014

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por nos ter permitido alcançar este momento tão importante, estando sempre por perto nos momentos difíceis, nos dando saúde e forças para superar todos os obstáculos.

Aos nossos pais que sempre nos apoiaram, deram todo o alicerce possível para podermos concluir mais esta etapa em nossas vidas.

Aos nossos irmãos, que assim como nossos pais sempre estiveram dispostos a ajudar no que fosse necessário.

Ao professor Me. Ramon Eduardo Pereira Silva pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão deste trabalho.

A esta Universidade, seu corpo docente, direção e administração que foram tão importantes em nossas vidas acadêmicas e no desenvolvimento deste trabalho.

Aos nossos amigos de classe, que em todos estes anos estiveram presentes em nossas vidas, nos momentos de alegria e nas dificuldades.

RESUMO

No presente trabalho foram realizadas análises energéticas e econômicas de três diferentes configurações referentes a uma central termoelétrica de cogeração em uma indústria de papel e celulose, a fim de analisar a viabilidade de implantação de diferentes tecnologias. As configurações estudadas operam de formas distintas, porém com o mesmo consumo de energia e resíduos gerados, assim foi realizado uma comparação entre a compra de combustível auxiliar para atender a demanda de energia térmica e elétrica, e a compra de energia elétrica em déficit pelas concessionárias de energia. Para a determinação do ciclo mais adequado para o sistema, utilizou-se de conceitos termodinâmicos e econômicos.

Palavras-chave: Cogeração, indústria de papel e celulose, análise energética, análise econômica.

ABSTRACT

This study aims to perform an energetic and economic analysis of three different configurations proposed for cogeneration in a pulp and paper plant. The feasibility of the implementation of three proposed configurations was assessed. All the three configurations have the same process energy consumption and the same production of waste. The assessment have done by comparing the buying of auxiliary fuel required to meet the demand of thermal and electric power. In addition an essay of purchasing power of the grid was done. The analyses were performed in both thermodynamic and economic terms.

Keywords: Cogeneration, pulp and paper, industry, energy analysis, economic analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática de um digestor	16
Figura 2: Visão geral do processo Kraft de produção de celulose.....	17
Figura 3: Desenho esquemático da máquina de papel.	18
Figura 4: Evolução do consumo energético do setor de papel e celulose	19
Figura 5: Matriz energética no setor de papel e celulose.	20
Figura 6: Consumo total de energia no setor.	21
Figura 7: Ciclo topping	24
Figura 8: Ciclo bottoming	24
Figura 9: Ciclo Rankine de potência a vapor.....	25
Figura 10: Sistema térmico a vapor com diferentes tipos de turbinas.	26
Figura 11: Fluxograma simplificado do sistema de alimentação de biomassa da caldeira ...	28
Figura 12: Representação esquemática do ciclo de recuperação do licor negro.....	30
Figura 13: Pontos de operação das configurações analisadas.	38
Figura 14: Configuração 1	39
Figura 15: Fluxo de caixa da configuração 2.....	43
Figura 16: Configuração 2	44
Figura 17: Fluxo de caixa da configuração 2.....	47
Figura 18: Configuração 3	48
Figura 19: Fluxo de caixa da configuração 3.....	51
Figura 20: Parâmetros de desempenho dos sistemas.	51
Figura 21: Consumo específico de combustíveis auxiliares	52
Figura 22: Custo de instalação	53
Figura 23: Custo com compra de combustível auxiliar.....	54
Figura 24: Valor presente líquido das configurações 2 e 3.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Produção mundial de celulose no ano de 2012.....	13
Tabela 2. Produção mundial de papel no ano de 2012.	13
Tabela 3. Evolução da produção brasileira de celulose e papel em toneladas anuais.	14
Tabela 4. Capacidade instalada em cogeração na Europa em 2000.	22
Tabela 5. Tabela com valores do crescimento da produtividade média de madeira.....	31
Tabela 6. Consumo de energia da companhia Suzano.....	32
Tabela 7. Vazão de resíduos da companhia Suzano.....	33
Tabela 8. Propriedades termodinâmicas da configuração 1.....	40
Tabela 9: Variáveis de operação da configuração 1	41
Tabela 10: Consumo de combustível nas caldeiras da configuração 1.....	41
Tabela 11: Consumo específico de combustível para a configuração 1.....	42
Tabela 12: Parâmetros de desempenho da configuração 1	42
Tabela 13: Composição de despesas do investimento	42
Tabela 14: Propriedades termodinâmicas da configuração.....	45
Tabela 15: Variáveis de operação da configuração 2.....	45
Tabela 16: Consumo de combustível nas caldeiras da configuração 2.....	46
Tabela 17: Consumo específico de combustível nas caldeiras da configuração 2.	46
Tabela 18: Composição de despesas do investimento.	46
Tabela 19: Propriedades termodinâmicas da configuração 3.....	48
Tabela 20: Variáveis de operação da configuração 3.....	49
Tabela 21: Consumo específico de combustível nas caldeiras da configuração 3.	49
Tabela 22: Consumo específico de combustível nas caldeiras da configuração.....	50
Tabela 23: Composição de despesas do investimento	50
Tabela 24: Composição de rendimentos do investimento	50

LISTA DE SÍMBOLOS

Qu^* = Demanda de calor

w^* = Demanda de energia elétrica

wt = Trabalho turbina

wb = Trabalho da bomba

Q_{bio} = Potência da caldeira de biomassa

Q_{rec} = Potência da caldeira de recuperação

$Q_{aux 1}$ = Potência da caldeira auxiliar 1

$Q_{aux 2}$ = Potência da caldeira auxiliar 2

Qu = Calor útil

PCI = Poder calorífico inferior

FUE = Fator de utilização de energia

IGP = Índice de geração de potência

RPC = Relação potência e calor

VPL = Valor presente líquido

tep = Tonelada equivalente de petróleo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 Histórico do setor de papel e celulose	12
2.2 Processos de produção do papel e celulose	14
2.2.1 Processo de preparo da madeira	14
2.2.2 Processos para a preparação da celulose.....	14
2.2.3 Processos para a fabricação do papel.	17
2.3 Matriz energética no setor de papel e celulose.....	19
2.4 Sistemas de cogeração	21
2.4.1 Definição e histórico da cogeração no Brasil e no mundo.	21
2.4.2 Aspectos tecnológicos	23
2.4.3 Cogeração com turbina a vapor	25
2.5 Geração e distribuição do vapor	27
2.5.1 Caldeira de biomassa	27
2.5.2 Caldeira de recuperação.....	28
2.6 Combustíveis	28
2.6.1 Licor negro.....	29
2.6.2 Casca	30
2.6.3 Gás natural	31
2.6.4 Carvão vegetal.....	32
3 ORIGEM DOS DADOS.....	32
4 MODELAGEM TEÓRICA.....	34
5 CONFIGURAÇÕES PROPOSTAS	37
5.1 Primeira configuração.....	39
5.1.1 Análise energética da primeira configuração.....	39
5.1.2 Análise econômica da primeira configuração	42
5.2 Segunda Configuração.....	43
5.2.1 Análise energética da segunda configuração.....	43
5.2.2 Análise financeira da segunda configuração	46
5.3 Terceira configuração.....	47
5.3.1 Análise energética da terceira configuração.....	47
5.3.2 Análise econômica da terceira configuração.	50
6 RESULTADOS	51
7 CONCLUSÃO	55
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho visa a comparação entre a compra de energia elétrica das concessionárias ou a instalação de um sistema auxiliar de geração de vapor, tanto para atender a demanda de vapor como para a geração de excedentes de energia. Além do licor negro e das cascas, dois combustíveis auxiliares distintos serão empregados, sendo eles o gás natural e o carvão vegetal.

O segmento de papel e celulose está entre os setores que mais crescem no Brasil e no mundo. Os maiores produtores deste setor são os EUA e a China, sendo responsáveis por quase metade de toda a produção. O Brasil está em crescimento contínuo no setor, com taxa média de 3,3 % ao ano, segundo dados da Associação Brasileira de Celulose e Papel. (BRACELPA, 2014)

O processo da produção de papel e celulose se dá três etapas: a preparação dos cavacos, fabricação da celulose e a fabricação de papel. Na produção de cavacos, a madeira que chega na indústria passa pelo descascador, onde é separada das cascas. A madeira então vai para o picador onde seu tamanho é reduzido para facilitar o processo do cozimento. No processo da produção da celulose, a madeira passa pelo cozimento onde as fibras devem se separar dos demais componentes da madeira, nesta etapa o licor negro é extraído e enviado para as caldeiras de recuperação. Após a celulose estar pronta, esta segue para a fábrica de produção de papel onde passa pela caixa de entrada, prensas, secadores, calandra e enroladeiras, estando assim o papel pronto para o uso. As indústrias podem ser interligadas, com produção de celulose e papel e as que produzem apenas celulose.

As indústrias de papel e celulose consomem grandes quantidades de energia térmica e elétrica no seu processo. Uma parte desta energia é produzida pela própria indústria com resíduos gerados pelo próprio processo como o licor negro e as cascas. O restante da energia necessária para o processo é gerada através da instalação de sistemas auxiliares, que utilizam outros combustíveis para queima na caldeira.

Nestas indústrias são empregados os sistemas de cogeração, que geram duas formas distintas de energia simultaneamente. Este sistema visa uma melhor eficiência

em sistemas de geração de vapor, onde o mesmo vapor utilizado para a geração de energia elétrica é também utilizado no processo, aumentando a eficiência do sistema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico do setor de papel e celulose

Conforme Osorio (2007), o descobrimento do papel aconteceu no início do século II na China por T'Sai Lum, que fabricou o papel a partir de córtex de plantas e tecidos velhos, porém a primeira fábrica de papel do ocidente foi instalada na Espanha em 1150. No ano de 1838 na Alemanha, foi fabricado pela primeira vez a pasta branqueada e dois anos depois criou-se o processo para a trituração da madeira. As primeiras espécies de árvores usadas na produção da celulose foram o pinheiro e o abeto. O eucalipto veio a se tornar amplamente utilizado a partir de 1960, fazendo com que o papel se tornasse um produto produzido em grande escala, com preços acessíveis e com boa qualidade. No Brasil a primeira indústria de papel e celulose pelo processo Kraft foi criada na década de 1950 em Monte Alegre no estado do Paraná.

Nas últimas duas décadas houve um crescimento com taxa anual de 3,1 % na produção de papel e celulose no mundo, sendo a América latina e a Ásia os responsáveis por este aumento na produção. A partir da década de 1990 países que lideravam o ranking do setor como o Japão, Canadá e os EUA ficaram estagnados, ocorrendo o crescimento no setor para alguns países como o Brasil, Indonésia, China e Finlândia. (OSORIO, 2007)

Em 2012, com dados retirados da BRACELPA (2014), os líderes do setor de papel e celulose no cenário mundial são os EUA e a China. Os EUA são os maiores produtores de celulose, alcançando uma produção de aproximadamente 50 mil toneladas. Já a China é a maior produtora de papel com uma produção anual de 102 mil toneladas no mesmo ano. As tabelas 1 e 2 apresentam a produção mundial de papel e celulose no ano de 2012.

Tabela 1. Produção mundial de celulose no ano de 2012

Ranking	País	Mil toneladas
1	EUA	50.351
2	China	18.198
3	Canadá	17.073
4	Brasil	13.977
5	Suécia	11.672
6	Finlândia	10.237
7	Japão	8.642
8	Rússia	7.519
9	Indonésia	6.710
10	Chile	5.155
11	Índia	4.095
12	Alemanha	2.636
	Demais	10.376
	Total	166.641

Fonte: BRACELPA.

Tabela 2. Produção mundial de papel no ano de 2012.

Ranking	País	Mil toneladas
1	China	102.500
2	EUA	74.375
3	Japão	26.083
4	Alemanha	22.630
5	Suécia	11.417
6	Coréia do Sul	11.333
7	Canadá	10.751
8	Finlândia	10.694
9	Brasil	10.260
10	Indonésia	10.247
11	Índia	10.242
12	Itália	8.664
	Demais	90.789
	Total	399.985

Fonte: BRACELPA.

No Brasil o setor de papel e celulose é um dos segmentos industriais mais competitivos do país, sendo um dos maiores do mundo. Este setor no Brasil utiliza madeira plantada (eucalipto e pinus), oriundas de reflorestamento. Nos últimos 15 anos o crescimento do setor foi em média de 3,3 % ao ano, saindo de 29 milhões de toneladas em 1990 para 47 milhões em 2005. A tabela 3 apresenta a evolução brasileira no setor. (BRACELPA, 2014)

Tabela 3. Evolução da produção brasileira de celulose e papel em toneladas anuais.

Ano	Celulose (Fibra curta)	% Crescimento	Papel	% Crescimento
2001	7.401.202	-0,69	7.434.767	3,3
2002	8.021.095	8,22	7.773.913	4,52
2003	9.069.247	13,07	7.915.504	1,82
2004	9.620.143	6,07	8.452.411	6,78
2005	10.352.113	7,61	8.597.307	1,71
2006	11.139.449	7,2	8.744.427	1,8

Fonte: BRACELPA.

2.2 Processos de produção do papel e celulose

2.2.1 Processo de preparo da madeira

Para a fabricação da celulose, utiliza-se como matéria prima a madeira. A madeira é colhida das florestas particulares após atingir um diâmetro apropriado para o corte, então é transportada por caminhões até a indústria, onde são descarregadas por guindastes ou tratores. As toras retiradas dos caminhões são colocadas em esteiras e transportados até os tambores descascadores onde a casca é retirada.

As toras descascadas são transportadas para os picadores onde a madeira tem seu tamanho reduzido em pequenos fragmentos chamados de cavacos. Após ser picada os cavacos são transportados para as peneiras vibratórias, que separam as lascas e os pequenos pedaços, alimentando o digestor com os cavacos de tamanho apropriado para os processos.

2.2.2 Processos para a preparação da celulose

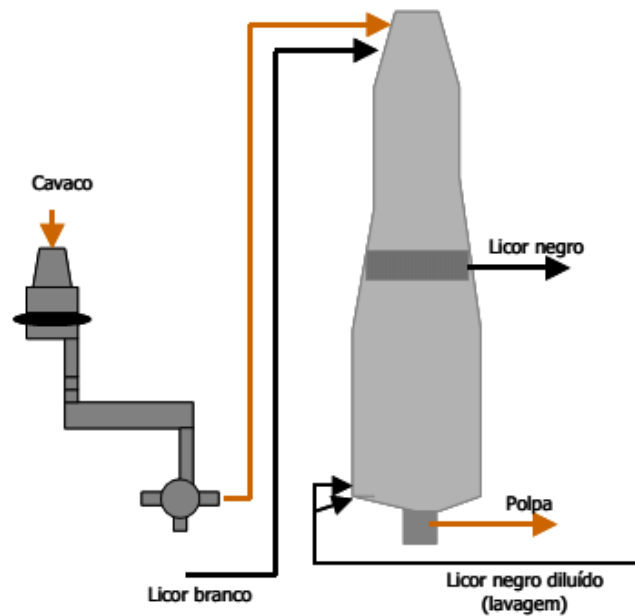
A preparação da celulose consiste em separar as fibras dos demais componentes da madeira, o principal desses componentes é a lignina que é responsável em ligar as células e dar rigidez a madeira.

A celulose pode ser produzida por alguns distintos métodos de preparação. Pode ser produzida por processos mecânicos, onde toras de madeiras são prensadas contra um rolo giratório de material abrasivo, separando parcialmente a fibra obtendo uma pasta de celulose mais escura com aplicações limitadas. Por processos

termomecânicos, onde é realizado através do aquecimento da madeira na forma de cavacos a temperatura em torno de 140°C, nessa temperatura a madeira fica ligeiramente mole e segue para o processo de desfibramento, em refinador a disco. Ou pode também ser produzida pelo processo químico também conhecido como processo Kraft onde a madeira é tratada em digestores, com soda cáustica e sulfeto de sódio com o intuito de dissolver a lignina, preservando as fibras e obtendo uma pasta de celulose mais forte, aumentando a resistência dos papéis fabricados.(PIOTTO, 2003)

Entre todos os processos utilizados para a preparação da celulose o processo químico – Kraft é o mais utilizado pelas indústrias de papel e celulose. Antes de entrar no digestor os cavacos são pré-aquecidos para facilitar a impregnação com o licor de cozimento. No cozimento das cavacos é gerado o licor branco, uma mistura de componentes químicos composto por sulfeto de sódio(Na_2S), hidróxido de sódio ($NaOH$) e água. As fibras de celulose são separadas da lignina e das resinas, resultando em celulose não branqueada, que é então encaminhada para a lavagem. O processo de cozimento está exemplificado na figura 1. O licor que antes do cozimento era branco, após o cozimento passa a ser preto, e então é enviado para a unidade de evaporação onde posteriormente será usado em caldeiras de recuperação, e passa a ser chamado licor negro.

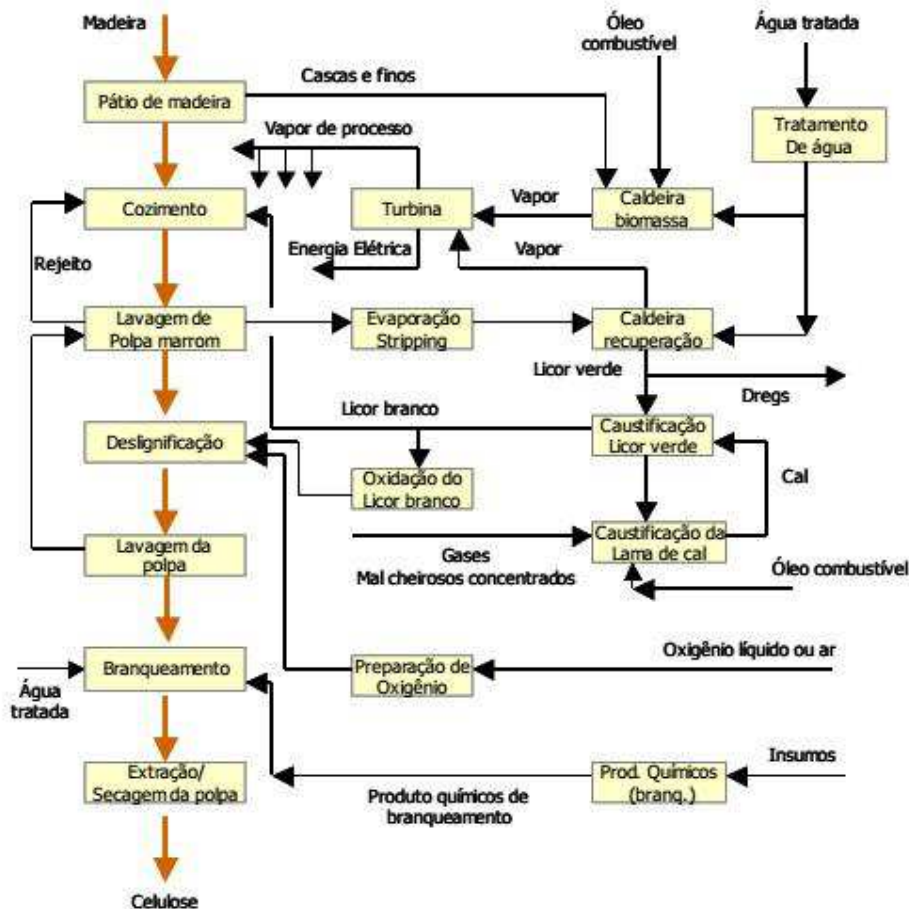
Figura 1: Representação esquemática de um digestor



Fonte: PIOTTO (2003).

Após ser cozida a pasta de celulose contém fibras e licor negro impregnado com lignina, hemiceluloses e outros componentes do cozimento. Ela então é lavada com água quente no próprio digestor ou em lavadores do tipo prensa, com o objetivo de separar o resto de licor das fibras. Por fim a última etapa no processo de fabricação de celulose é o branqueamento químico, onde através de um tratamento químico utilizando hipoclorito de sódio, dióxido de cloro e soda cáustica, para remover toda a lignina remanescente e deixar a polpa limpa e despigmentada. Todo o processo de produção da celulose está esquematizada na figura 2. Após esta etapa a celulose está pronta para entrar na máquina de papel. (PIOTTO, 2003)

Figura 2: Visão geral do processo Kraft de produção de celulose.



Fonte: PIOTTO (2003).

2.2.3 Processos para a fabricação do papel.

As máquinas responsáveis pela transformação da celulose em papel são máquinas contínuas, de largura determinada e comprimento infinito, constituída de várias seções com diferentes funções.

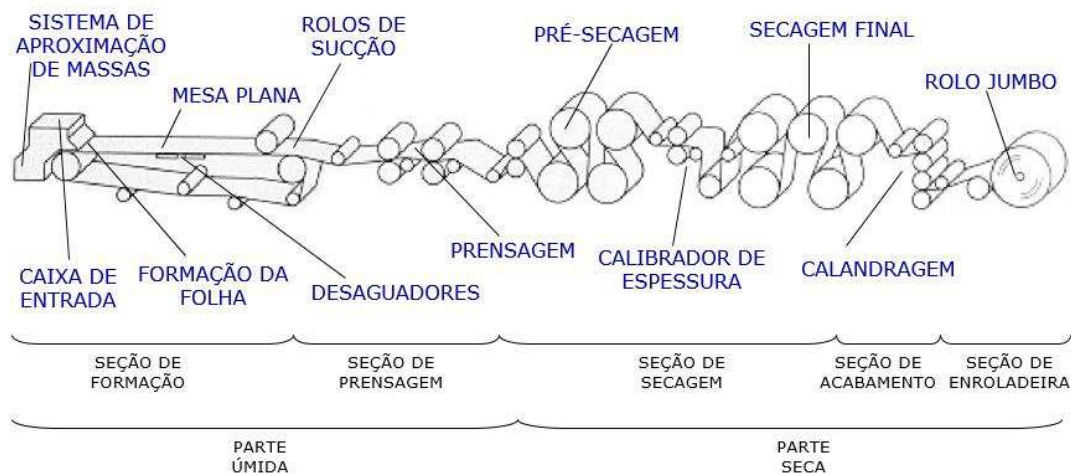
A máquina de papel pode ser dividida em cinco partes: caixa de entrada, mesa plana, prensas, secagem, calandra e enroladeira, Conforme a figura 3. (PIOTTO, 2003)

A primeira seção da máquina de papel é responsável pela formação da folha, composta pela caixa de entrada, responsável por distribuir as fibras de celulose de forma uniforme e pela mesa plana responsável em dar a largura apropriada para a folha.

A próxima seção responsável pela formação do papel são as prensas. Nessa etapa a folha de papel já está formada, porém 80 a 85% da sua constituição é água. O principal objetivo das prensas é retirar parte dessa água. Cada máquina de papel tem de duas a três prensas. A folha de papel é forçada a passar por dois rolos cilíndricos onde parte dessa água é retirada. Ao sair desta etapa a folha sai com uma umidade de 50 a 65% de água. Após passar pelas prensas a folha de papel é encaminhada para a secagem. É a secagem que é responsável pela qualidade final do produto, já que cada tipo de papel apresenta um grau de umidade diferente. O papel é conduzido por cilindros secadores que trabalham com pressão de vapor. A umidade ao final desse processo é de cerca de 3 a 8%. (PIOTTO, 2003)

Por fim a parte final, a calandra que é utilizado para ajustar a espessura da folha e a enroladeira, que enrola o papel em um diâmetro definido com o objetivo de facilitar o transporte.

Figura 3: Desenho esquemático da máquina de papel.

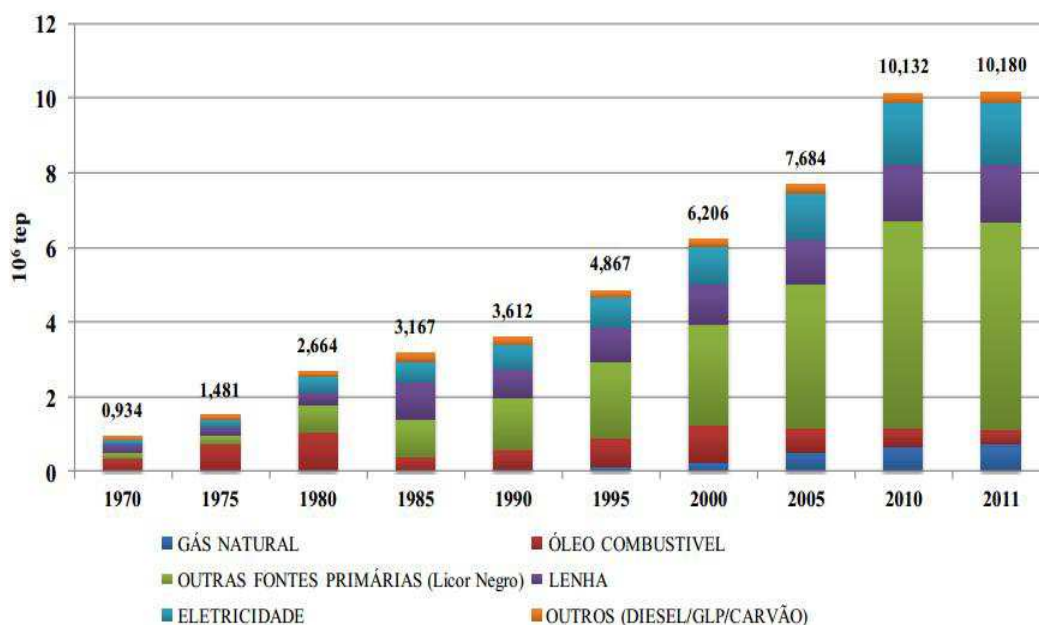


Fonte: KLOCK (2010).

2.3 Matriz energética no setor de papel e celulose

O consumo de energia tem crescido em média 6% ao ano desde o ano de 1970, como podemos ver na figura 4, passando de $934 \times 10^3 \text{ tep}^1$ (tonelada equivalente de petróleo) em 1970 para $10.180 \times 10^3 \text{ tep}$ em 2011.

Figura 4: Evolução do consumo energético do setor de papel e celulose



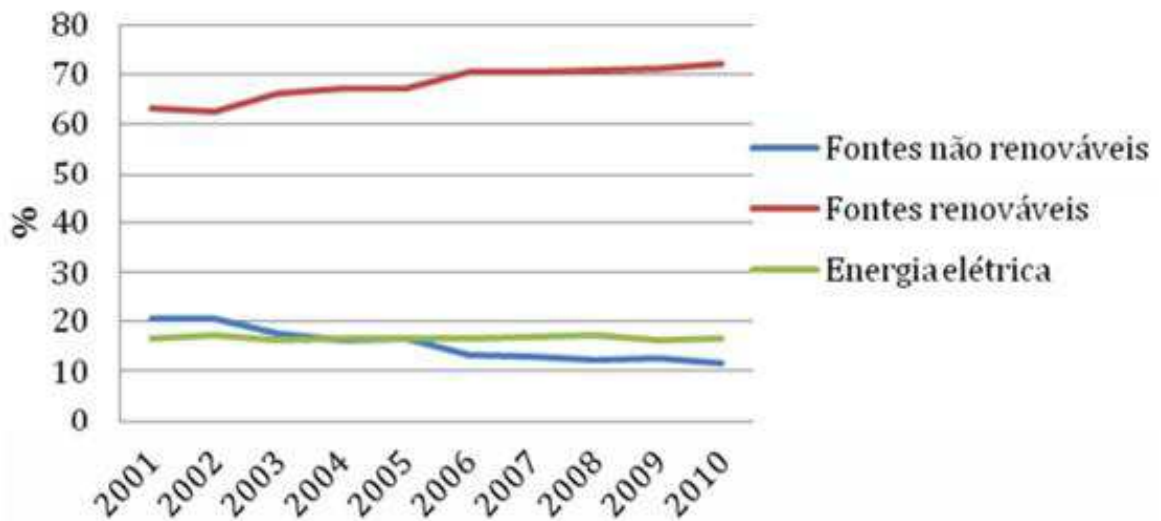
Fonte: EPE (2012).

O combustível mais consumido era o óleo devido aos baixos preços, sendo responsável por 38 % da matriz energética, seguido da lenha. Durante a crise energética nos anos setenta o preço do barril subiu consideravelmente, induzindo a exploração do potencial energético do licor negro através de caldeiras de recuperação química. Em 2011, como visto na figura 4, o licor negro corresponde a mais de 70 % da matriz energética do setor, mostrando ser viável o seu uso.

¹ 1Tep equivale a 41,86 GJ

As fontes renováveis de energia geram quase toda a energia consumida nas indústrias de papel e celulose, de 2001 até 2011 houve uma redução no consumo de combustíveis não renováveis de 43,4% que variaram de 20,5 para 11,6 %, já o consumo de fontes renováveis subiu de 63 para 71,9 %, como mostra a figura 5. (Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, 2011)

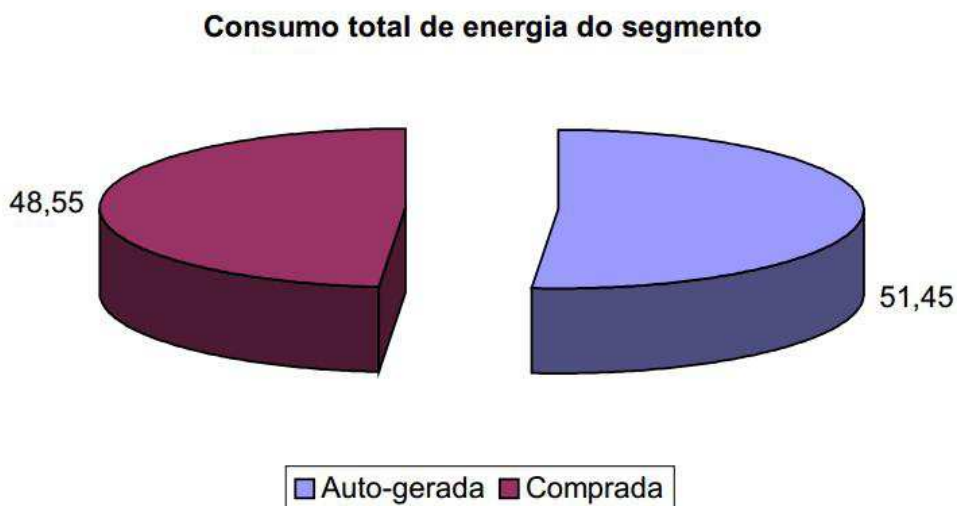
Figura 5: Matriz energética no setor de papel e celulose.



Fonte: Ministério do desenvolvimento, indústria e comércio exterior (2011).

Para o fornecimento da demanda de energia deste setor utiliza-se sistemas de cogeração que produzem simultaneamente energia térmica (vapor) e energia elétrica. A queima dos resíduos nas caldeiras geram vapor para atender a demanda do processo, em algumas indústrias são gerados excedentes de vapor que são voltados para a produção de energia elétrica, podendo gerar até excedentes de energia elétrica para venda, dependendo da produção. A figura 6 apresenta em porcentagem a geração de energia gerada pelo segmento e a energia comprada.

Figura 6: Consumo total de energia no setor.



Fonte: Josias da Silva (2002).

2.4 Sistemas de cogeração

2.4.1 Definição e histórico da cogeração no Brasil e no mundo.

Cogeração é uma forma simultânea de geração de duas formas de energias distintas como calor e eletricidade através de uma fonte única de combustível, tal como os derivados de petróleo, gás natural e a biomassa, dentre outros não citados. No sistema de cogeração busca-se maximizar os rendimentos da produção de energia, sendo uma alternativa para sistemas interligados. (SANTOS; NOVO, 2008)

Centrais termoelétricas, mesmo adotando equipamentos eficientes não conseguem transformar nem metade da energia térmica disponível (vapor) em energia elétrica. A cogeração busca com isso empregar este fluxo de calor em algum processo em níveis de temperatura e pressão não muito elevados. A cogeração, ao produzir trabalho e calor úteis, reduz as perdas de energia e permite abastecer ambas as demandas com quase o mesmo consumo de combustível. (LORA; NASCIMENTO, 2004)

As primeiras centrais termoelétricas conhecidas foram em meados de 1870, onde geradores elétricos eram acoplados a máquinas a vapor com eixo alternativo, o objetivo deste sistema era a geração de calor para aquecimento de residências. Até a década de 1940 a cogeração era um dos mais importantes sistemas de geração de energia elétrica, de acordo com Santos e Novo (2008) nesta década a cogeração era responsável por 50 % na energia elétrica produzida nos Estados Unidos. A partir da década de 1950 com o surgimento de novas tecnologias, novos meios de geração e interligação de sistemas elétricos foram criados, fazendo com que os sistemas de cogeração fossem perdendo a importância.

Nos anos 80 com os altos preços do petróleo e a preocupação com a escassez de combustíveis fósseis, fizeram com que os sistemas de cogeração recebessem novo incentivo.

Segundo Velázquez (2000), na Dinamarca todos os projetos de implantação de usinas geradoras devem ser de sistemas de cogeração ou sistemas com fontes de energias renováveis. Alguns países europeus como a própria Dinamarca, a Finlândia, e a Holanda tem na sua matriz energética valores próximos a 50 % da energia gerada por cogeração. A capacidade instalada de energia por meio de cogeração na Europa é estimado em 97 GW. A tabela 4 apresenta a capacidade instalada de alguns dos países europeus. (LORA; NASCIMENTO, 2004)

Tabela 4. Capacidade instalada em cogeração na Europa em 2000.

País	Capacidade (GW)	Geração (GWh/ano)
Alemanha	18,75	58,31
Áustria	3,69	15,41
Bélgica	1,34	6,33
Dinamarca	7,98	23,84
Espanha	4,54	24,55
Finlândia	4,04	19,75
França	5,55	21,06
Itália	10,66	42,04
Holanda	7,87	39,78
Reino Unido	4,63	20,69

Fonte: LORA; NASCIMENTO (2004).

No Brasil, a situação é um pouco diferente, de acordo com Velázquez (2000) a cogeração ainda não progrediu significativamente no país, estando limitado apenas a

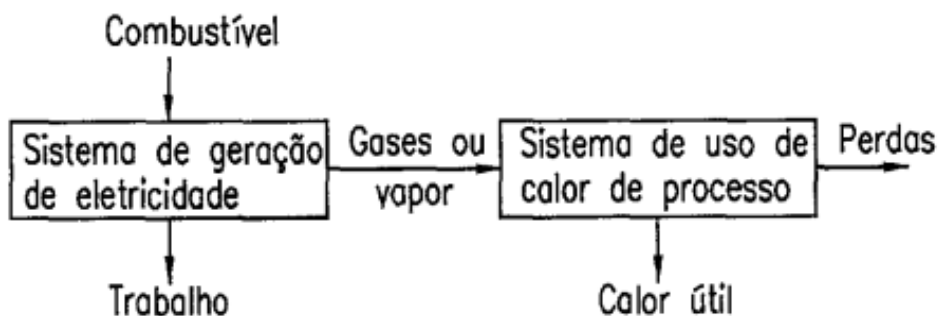
auto produção de energia elétrica e geração de vapor para consumo em algumas indústrias nas áreas de petróleo, siderúrgicas, papel e celulose, produção de açúcar e álcool, sendo a venda de excedentes de energia elétrica para as concessionárias relativamente baixas comparado com a matriz energética brasileira. Porém, com a redução da oferta de energia hidrelétrica, a evolução institucional no setor energético brasileiro e a crescente importância da conservação de energia tem criado novas possibilidades para os sistemas de geração combinada de calor e potência no cenário brasileiro.

A capacidade instalada em energia proveniente no Brasil gira em torno de 1,8 GW, a maior parte desta energia é oriunda de indústria de produção de cana de açúcar, representando quase 60 % do total, as indústrias de papel e celulose representa 16,5 % e petroquímicas 14,5%. (LORA; NASCIMENTO, 2004)

2.4.2 Aspectos tecnológicos

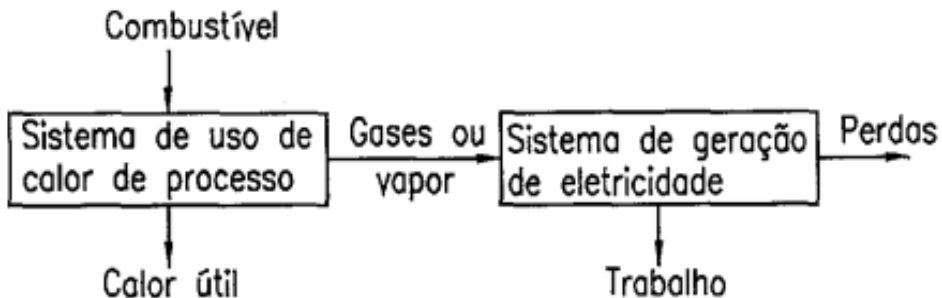
Em sistemas de cogeração os principais ciclos utilizados são os que empregam turbinas a vapor, turbinas a gás e motores alternativos, e em todos estes ciclos existe o reaproveitamento do calor que não foi transformado em energia elétrica pela turbina e são voltados para o processo, ou para alguma outra necessidade de vapor ou água quente. Podemos definir os sistemas de cogeração em duas formas distintas: (LORA; NASCIMENTO, 2004)

Topping: acontece quando a geração de eletricidade vem antes da geração do calor útil. A figura 7 ilustra este tipo de sistema *topping*.

Figura 7: Ciclo *topping*.

Fonte :LORA; NASCIMENTO (2004).

Bottoming: a geração de calor útil acontece antes da geração de energia elétrica. A figura 8 apresenta o sistema *bottoming*.

Figura 8: Ciclo *bottoming*

Fonte :LORA; NASCIMENTO (2004).

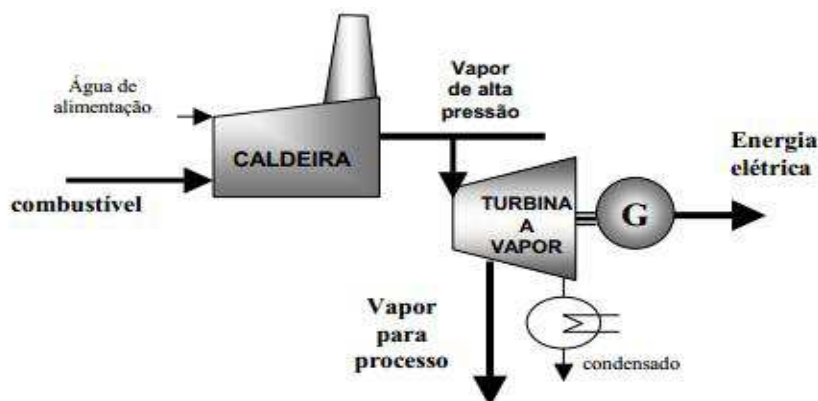
Entre os dois ciclos o *bottoming* é o menos empregado pois o calor após ser usado no processo está em temperatura e pressão relativamente baixos, são aplicados em indústrias onde se dispõe de altas temperaturas como em indústrias de cerâmica e cimenteiras. (LORA; NASCIMENTO, 2004)

2.4.3 Cogeração com turbina a vapor

As plantas de cogeração a vapor mais comuns utilizam o ciclo termodinâmico Rankine. Em um ciclo Rankine ideal não existem irreversibilidades, e temos dentro deste ciclo os processos de compressão isentrópica na bomba, adição de calor a pressão constante na caldeira, expansão isentrópica na turbina e rejeição de calor a pressão constante no condensador. (MORAN et al. 2013)

Para fins de melhoria de desempenho dos ciclos de potência, algumas modificações no ciclo Rankine ideal devem ser realizadas. Uma dessas modificações seriam o reaquecimento do vapor de saída da turbina. De acordo com MORAN et al. (2013): “Com o reaquecimento, uma planta de potência pode tirar proveito do aumento de eficiência resultante de pressões maiores na caldeira e ainda evitar um título baixo para o vapor na saída da turbina”. Outro método para aumentar a eficiência do ciclo de potência é o aquecimento regenerativo da água de alimentação, ou regeneração. Neste ciclo é extraído da turbina uma parte do vapor superaquecido para o aquecimento da água de alimentação da caldeira, aumentando com isso a temperatura da água na entrada da caldeira, melhorando sua eficiência e reduzindo o consumo de combustível da mesma. (MORAN et al., 2013)

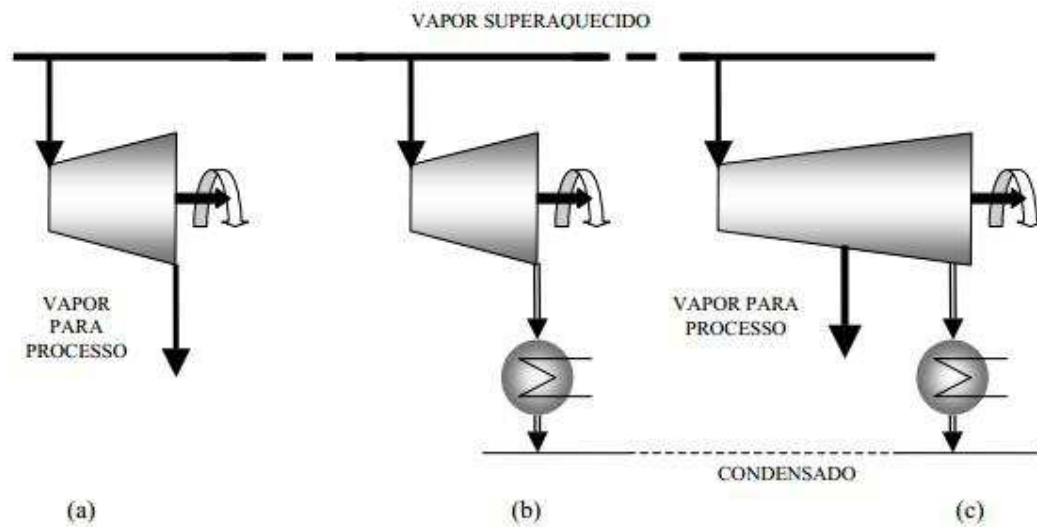
A figura 9 apresenta um ciclo Rankine com geração de vapor a alta pressão, passando por uma turbina a vapor, podendo ser de contrapressão ou de condensação com extração.



Fonte: BRASIL (2005).

A figura 10 apresenta sistemas térmicos a vapor trabalhando em três ciclos distintos. No item (a) temos vapor superaquecido passando por uma turbina de contrapressão gerando trabalho e vapor saindo para o processo, em (b) temos uma turbina de condensação onde trabalho é gerado e o vapor que sai da turbina passa por um condensador e retorna para a caldeira, em (c) uma turbina de condensação com extração é mostrada onde uma parte do vapor é extraída para o processo e a outra passa pelo condensador e retorna para a caldeira.

Figura 10: Sistema térmico a vapor com diferentes tipos de turbinas.



Fonte: BRASIL (2005).

Uma característica importante destas plantas é poder consumir tipos diferentes de combustíveis, inclusive resíduos gerados nas próprias indústrias como o bagaço de cana em usinas sucroalcoleiras e o licor negro em indústrias de papel e celulose.

Os sistemas de cogeração podem trabalhar tanto em paridade térmica, ou seja toda a demanda de vapor do processo sendo atendida, ou em paridade elétrica quando a demanda de energia elétrica é atendida. Geralmente as indústrias trabalham em paridade térmica devido a necessidade de vapor para seus processos.

2.5 Geração e distribuição do vapor

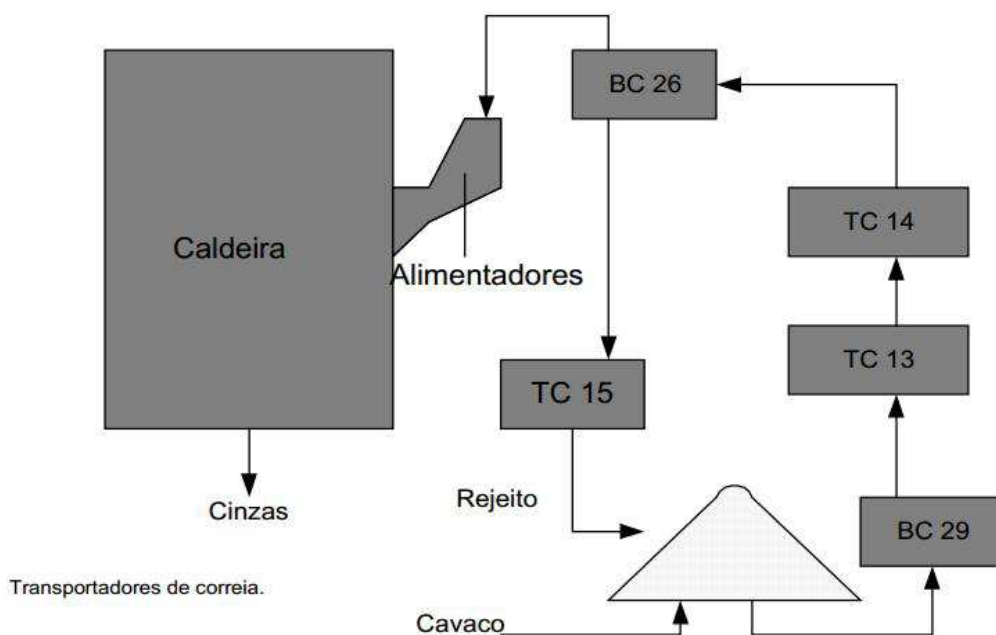
No segmento de indústrias de papel e celulose, são necessárias caldeiras para queima de biomassa, que são chamadas de caldeiras de potência, e também as caldeiras de recuperação para a geração de vapor através da queima do licor negro. Ambos os combustíveis são resíduos gerados pela indústria, estes resíduos se tornam rentáveis, tanto do ponto de vista econômico quanto do ponto de vista ambiental, pois além de gerarem a energia térmica requerida para o processo, ainda geram energia elétrica, dando um fim para estes resíduos que poderiam ser um problema para as usinas devido as grandes quantidades geradas.

2.5.1 Caldeira de biomassa

A caldeira de biomassa tem a função de gerar vapor com a queima das cascas e dos cavacos que são gerados no descascamento da madeira nas indústrias de papel e celulose. Essa caldeira, juntamente com a de recuperação, tem um papel importante para a indústria de celulose na questão econômica e ambiental, devido a utilização das cascas e cavacos, resíduos industriais que sobram do processo.

A alimentação das caldeiras com os cavacos e/ou cascas acontecem como mostra a figura 11 a seguir. O transporte da biomassa é realizado por uma rosca extratora de biomassa BC29, esta abastece o transportador TC13 e este na sequência alimenta o transportador TC14. Do TC14 a biomassa vai para o transportador BC26, onde a biomassa é distribuída em cinco alimentadores, que direciona a biomassa para a fornalha. (SILVA, 2002)

Figura 11: Fluxograma simplificado do sistema de alimentação de biomassa da caldeira



Fonte: SILVA (2002).

2.5.2 Caldeira de recuperação

A caldeira de recuperação possui este nome pois ao mesmo tempo que tem o papel de gerar vapor também funciona como um reator químico. Segundo Silva (2002) a recuperação química tem por finalidade recuperar os reagentes usados no cozimento da madeira e na produção de celulose, e a recuperação dos valores energéticos do licor em forma de vapor.

2.6 Combustíveis

Resíduos industriais podem ser aproveitados como combustível para caldeiras geradoras de vapor em algumas indústrias. Empresas do segmento como as sucroalcoleiras e as de papel e celulose aproveitam seus resíduos, sendo eles o bagaço de cana para as sucroalcoleiras e o licor negro e cascas para as de papel e celulose.

2.6.1 Licor negro

O licor negro é um combustível obtido através do processo de fabricação de celulose, utilizado pelas indústrias de papel e celulose, sendo responsável por gerar grande parte de vapor demandado pela indústria. De acordo Silveira (2007) seu PCI é de 14000 kJ/kg.

O licor negro, é um subproduto obtido através do processo de tratamento químico da indústria de papel e celulose. Ele é obtido durante o cozimento no processo Kraft, processo esse que utilizam o hidróxido de sódio (NaOH) e o sulfeto de sódio (Na_2S), também chamados de licor branco, para a desfibração da madeira. (MELO et al., 2014)

Após o cozimento no digestor esse licor branco reage com a matéria orgânica presente na madeira formando o licor negro. A composição do licor negro depende da espécie de madeira que está sendo utilizado no processo e também das condições de cozimento da polpa, em geral sua composição consiste na mistura de compostos químicos inorgânicos de digestão, resíduos de madeira dissolvida (lignina) e outro tipo de matéria orgânica separada da madeira durante o cozimento. (MELO et al., 2014) e (BARROS, 2010).

Após o cozimento o licor negro passa por um processo de recuperação química. As principais unidades que compõe a recuperação química são: evaporação do licor negro, incineração do licor na caldeira de recuperação, caustificação e recuperação do licor verde. (PIOTTO, 2003)

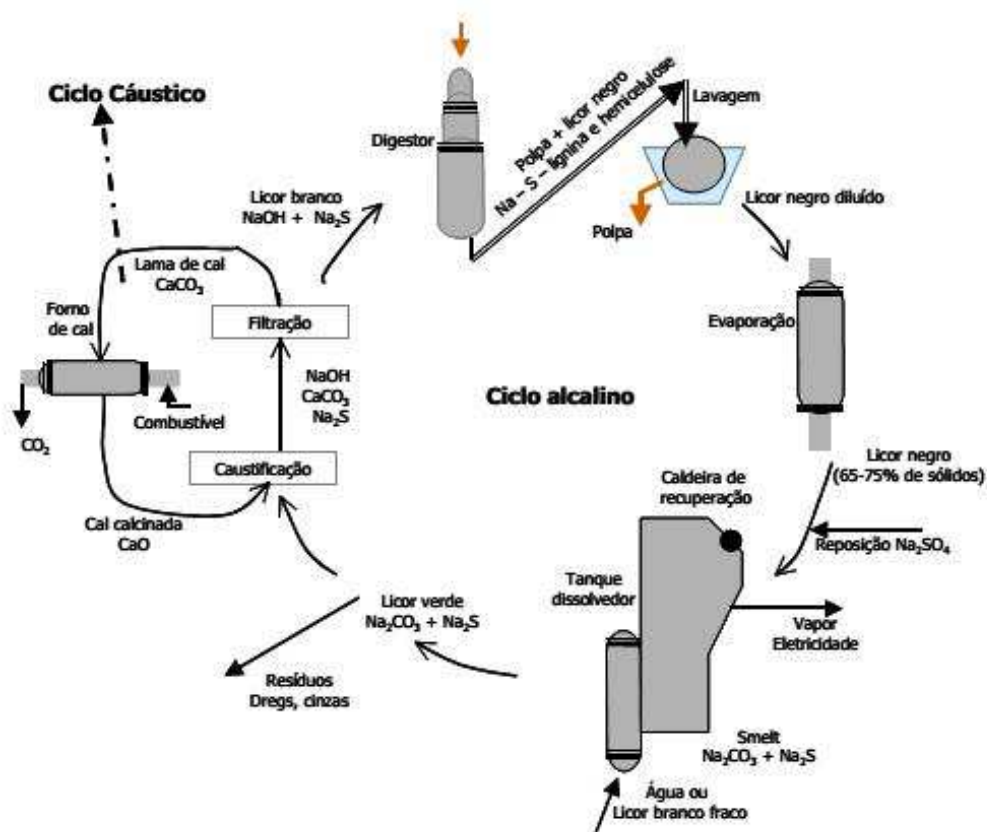
Após sair do digestor o licor negro está com um teor de componentes sólidos entre 14 e 18%, segundo Piotto (2003) para uma queima eficiente na caldeira essa porcentagem deve ser maior. Através da evaporação esse teor é elevado para cerca de 65 a 75% segundo Piotto (2003) permitindo uma queima eficiente na caldeira de recuperação. O condensado evaporado do licor negro é aproveitado, após ser purificados é utilizado para a lavagem da polpa e na unidade de caustificação, que é onde se recupera um dos principais componentes do licor branco, o hidróxido de sódio.

Ao incinerar o licor negro, forma-se uma pasta inorgânica de carbonato de sódio e sulfeto de sódio, conhecida pelo termo “*Smelt*”, ao ser dissolvido em água passa a

ser chamado de licor verde. Ao ser misturado com cal, o licor verde é filtrado e passa a formar o licor branco, o mesmo utilizado no digestor. Todo esse processo descrito acima está sendo representado pela figura 12. (PIOTTO, 2003)

Figura 12: Representação esquemática do ciclo de recuperação do licor negro

1 / 1



Fonte: PIOTTO (2003).

2.6.2 Casca

Conforme a BRACELPA (2014), no Brasil 100% do papel e da celulose produzida são de florestas plantadas de eucalipto e pinus. As florestas são manejadas de maneira sustentável e com o passar dos anos através do desenvolvimento tecnológico, genético e de mão de obra especializada, houve um grande avanço produtividade média como mostra a tabela 5.

Tabela 5. Tabela com valores do crescimento da produtividade média de madeira

Madeira para celulose			
Produtividade média ($m^3/ha/ano$)			
Espécie	1980	2011	Crescimento
Eucalipto	24	44	83%
Pinus	19	38	100%

Fonte: Bracelpa (2014).

Quando a madeira chega na indústria em toras ela é descascada e picada, segundo Velásquez (2000), cerca de 13% da massa total da tora é de cascas. Essas cascas e outros resíduos de madeira que não são aproveitadas no processo de produção de papel e celulose são utilizadas como combustível em caldeiras geradoras de vapor. De acordo com Silveira (2007), o PCI das cascas de demais resíduos de madeiras é de 5,72 MJ/kg.

2.6.3 Gás natural

O gás natural é um hidrocarboneto resultante de composição de matéria orgânica. Ele é composto principalmente de metano, mas várias outras substâncias são encontradas como etano, butano, gás carbônico, água, além de outros.

No Brasil um dos empecilhos para o uso deste combustível é o seu transporte. O gás natural é extraído do petróleo nas plataformas, onde o transporte por gasodutos se torna um empecilho. No caso de não haver a possibilidade da construção de um gasoduto este passa por um processo de liquefação, no qual atinge -160°C , reduzindo assim seu volume em 600 vezes, tornando-se viável o transporte por navios. (ANEEL, 2008)

Do ponto de vista ambiental, o gás natural apresenta vantagens sobre outros combustíveis, em função da menor emissão de poluentes. Em comparação com o óleo combustível, sua emissão é de 20 a 23% inferior que o óleo combustível. (ANEEL, 2008). Segundo a Zetec (2013), o PCI do gás natural é de 8650 kcal/ m^3 (36, 21 MJ/kg).

De acordo com o IBT (2014) (Instituto Brasileiro de Petróleo Gás e Biocombustíveis), a tarifa de venda do gás natural para indústrias é de 10,55 US\$/MMBTU, ou 80,09 R\$/MWh.

2.6.4 Carvão vegetal

O carvão vegetal é obtido através da carbonização da madeira. A ação do calor sobre a madeira implica na sua degradação, sendo assim chamado de pirólise. Segundo Brito (1990). “ A pirólise da madeira ou de outra biomassa vegetal, em atmosfera controlada e à temperatura conveniente, produz carvão vegetal e matéria volátil parcialmente condensável.”

O PCI do carvão vegetal, de acordo Souza (2011), é de 6.727 kcal/kg (26,79 MJ/kg), e seu preço de venda para as indústrias é de 0,36 R\$/kg, segundo dados do Sindicarv (sindicato das indústrias e dos produtos de carvão vegetal de Mato Grosso do Sul).

3 ORIGEM DOS DADOS

O presente trabalho estuda a viabilidade da implantação de novas tecnologias em sistemas de cogeração em indústrias de papel e celulose. Consumo de vapor, energia elétrica, juntamente com os resíduos usados nas caldeiras, licor negro e casca, foram retirados de Silva (2002), que realizou uma pesquisa no grupo Suzano papel e celulose. A tabela 6 apresenta o consumo de vapor e energia elétrica dos processos da indústria em estudo

Tabela 6. Consumo de energia da companhia Suzano.

Fonte: Josias da Silva (2002).

Etapas do Processo	Consumo de vapor (kg/s)		Consumo de eletricidade (MW)
	0,6 MPa	1,2MPa	
Cozimento	2,78	16,67	18
Evaporação/caustificação e caldeira de recuperação	20,83	8,33	10,5
Branqueamento	4,17	0,00	4,5
Secagem	28,89	7,50	27
Total	56,67	32,50	60

A vazão de resíduos, licor negro e cascas também foram retirados da empresa Suzano, conforme apresentado na tabela 7 abaixo.

Tabela 7. Vazão de resíduos da companhia Suzano.

Vazão mássica de combustíveis (kg/s)	
Licor negro	9,305
Cascas	5,66

Fonte: Josias da Silva, (2002).

As caldeiras analisadas por Silva (2002) apresentavam pressão de operação de 0,5 MPa. Grande parte das caldeiras presentes em fabricas de papel e celulose na Europa operam com valores por volta de 0,5 a 0,6 MPa de pressão, porem em alguns países como Suécia e Finlândia devido a elevados preços de eletricidade os projetos empregam caldeiras operando de 0,8 a 0,9 MPa afim de maximizar a produção de energia, de acordo com Af-engineering (2014).

Portanto como o objetivo deste trabalho é analisar tecnologias para cogeração com um melhor custo-benefício, trabalhou-se com 0,8 Mpa de pressão e 490°C de temperatura para saída das caldeiras.

Para os cálculos termodinâmicos, foi definido para as caldeiras uma eficiência de 100 %, pois o valor da eficiência da caldeira não representa influência significativa nas variáveis analisadas neste trabalho.

As eficiências isentrópicas de turbinas a vapor geralmente se encontram na faixa de 70% a 90%, sendo estipulado um valor médio de 80%. Para a bomba a eficiência isentrópicas estão entre 75% a 85%, definindo um valor de 80%. (MORAN, et al. 2013)

Visando uma melhoria no desempenho do ciclo 1, foi instalado no ciclo 2 um aquecedor de água aberto, que é um trocador de calor de contato direto. Para este aquecedor, foi definido uma pressão de 0,3 MPa, que é um valor muito utilizado por Moran, et al. (2013). Segundo Silva (2002) a temperatura da água líquida que retorna dos processos é de 130°C.

Para a compra de energia elétrica, foi utilizada a tarifa da empresa Enersul para grupo A de consumidores de alta tensão, com a tarifa convencional de 171,44 R\$/MWh de consumo e 31,92 R\$/kW de demanda.

Para a venda o preço de energia elétrica de geração distribuída no estado de mato grosso do sul, segundo o leilão de 2013, 141 R\$/MWh.

Para o custo de instalação do conjunto de cogeração foi considerado o preço de 1500 US\$/kW. A taxa de atratividade utilizada foi de 12% ao ano, com uma vida útil dos equipamentos de aproximadamente 20 anos. Segundo Suzano (2014), a fábrica opera 24 horas por dia, todos os dias do ano totalizando 8640 horas de funcionamento anual da indústria. Os custos de operação e manutenção foram estabelecidos como 4% do investimento inicial para geração. A cotação do dólar segundo o banco central é de R\$ 2,22.

4 MODELAGEM TEÓRICA

Segundo MORAN, et al. (2013), a massa em um interior de um volume de controle não se altera, operando em regime permanente. Assim a conservação da massa pode ser descrita a partir da equação 1.

$$\sum m_e = \sum m_s \quad (\text{Eq.1})$$

Onde:

m_e : Vazão mássica que entra no volume de controle (kg/s);

m_s : Vazão mássica que sai no volume de controle (kg/s).

A taxa total pela qual a massa entra no volume de controle é igual a taxa total da massa que sai, de forma semelhante a taxa total de energia que é transferida para o volume de controle é igual à que é transferida para fora, como mostra a equação 2.

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum m_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gze \right) - \sum m_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gzs \right) = 0 \quad (\text{Eq.2})$$

Sendo:

g : Aceleração gravitacional (m/s²);

h_e : Entalpia específica na entrada do volume de controle (kJ/kg);

h_s : Entalpia específica na saída do volume de controle (kJ/kg);

\dot{Q} : Potência térmica (kW);

V_e : Velocidade da vazão mássica na entrada (m/s);

V_s : Velocidade da vazão mássica na saída (m/s);

\dot{W} : Taxa de transferência de trabalho no volume de controle (kW);

ze : Cota da vazão mássica na entrada do volume de controle em relação a uma linha de referência (m);

zs : Cota da vazão mássica na saída do volume de controle em relação a uma linha de referência (m).

A equação 3 apresenta a quantidade de calor transferida na combustão do combustível.

$$Q = PCI * \dot{m} \quad (\text{Eq.3})$$

Sendo:

PCI =Poder calorífero inferior (kJ/kg);

As eficiências isentrópicas para turbinas e bombas são dadas a partir das equações 4 e 5 respectivamente.

$$\eta = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (\text{Eq.4})$$

$$\eta = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (\text{Eq.5})$$

Em geral a fórmula utilizada para o cálculo do VPL é dada pela equação 6:

$$VPL = -A + \{(-B + C) * \left[\frac{(1+i)^n - 1}{(1+i)^n * i} \right]\} \quad (\text{Eq.6})$$

Sendo:

VPL: Valor presente líquido (R\$);

A: Investimento inicial do projeto (R\$);

B: Custos de manutenção e operação do projeto (R\$);

C: Renda bruta com a venda de energia elétrica (R\$);

i: Taxa de atratividade (%);

n: Vida útil dos equipamentos (anos);

O FUE representa a relação entre a energia térmica do ciclo com a energia do combustível consumido para gerar vapor, podendo ser apresentado conforme a equação 7.

$$FUE = \frac{W_{total} + Q_{util}}{m \times PCI} \quad (\text{Eq.7})$$

O RPC Representa a relação entre a potência total produzida pela energia térmica, como apresenta a equação 8.

$$RPC = \frac{W_{total}}{Q_{util}} \quad (\text{Eq.8})$$

O IGP é o parâmetro utilizado para calcular separadamente a eficiência da geração de potência elétrica, deduzindo a energia utilizada para fins de aquecimento, como apresentado na equação 9.

$$IGP = \frac{W_{total}}{\dot{m} \times PCI - Q_{util}/\eta_{cald}} \quad (\text{Eq.9})$$

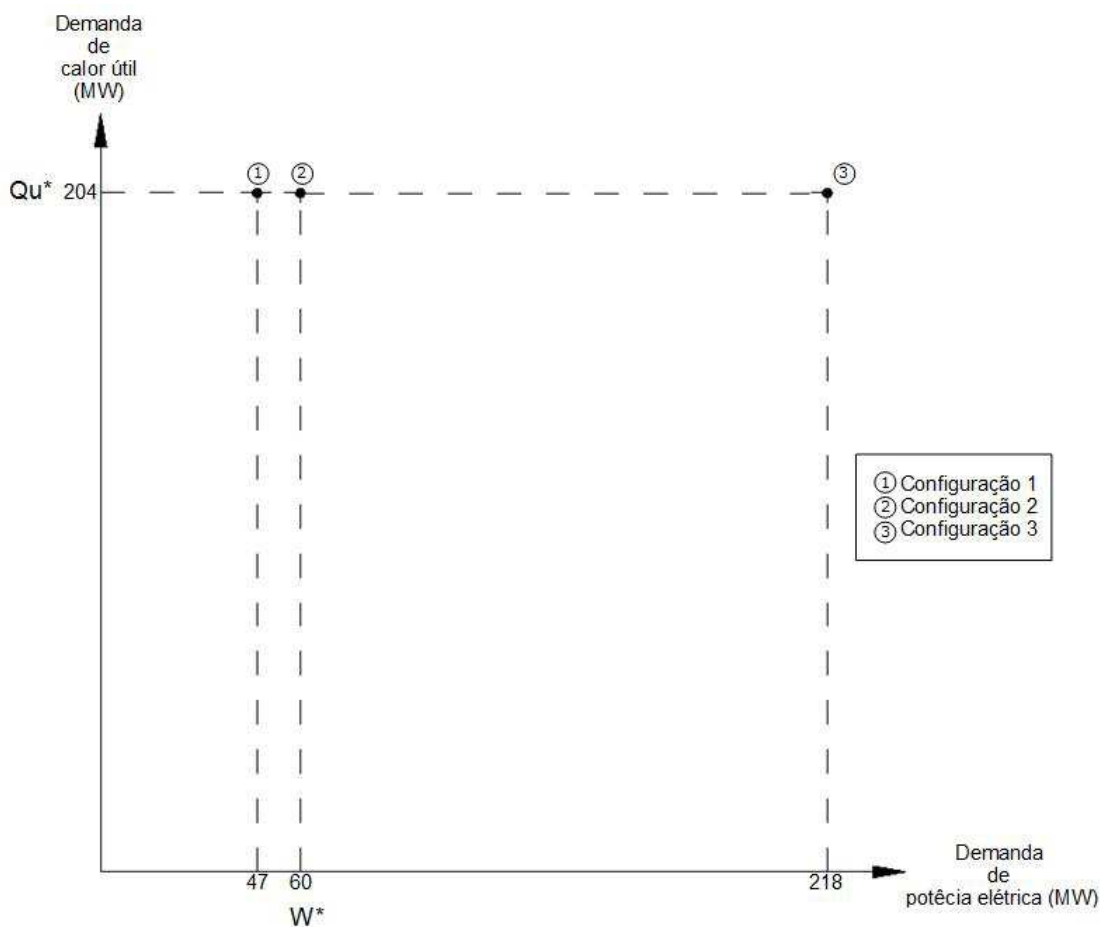
Onde:

W_{total} = Trabalho total do ciclo (kW);

5 CONFIGURAÇÕES PROPOSTAS

Os 3 sistemas analisados foram dimensionados para diferentes pontos de operação de acordo com a demanda de energia térmica e elétrica da indústria, conforme está apresentado na figura 13.

Figura 13: Pontos de operação das configurações analisadas.



Fonte: Elaborada pelos autores.

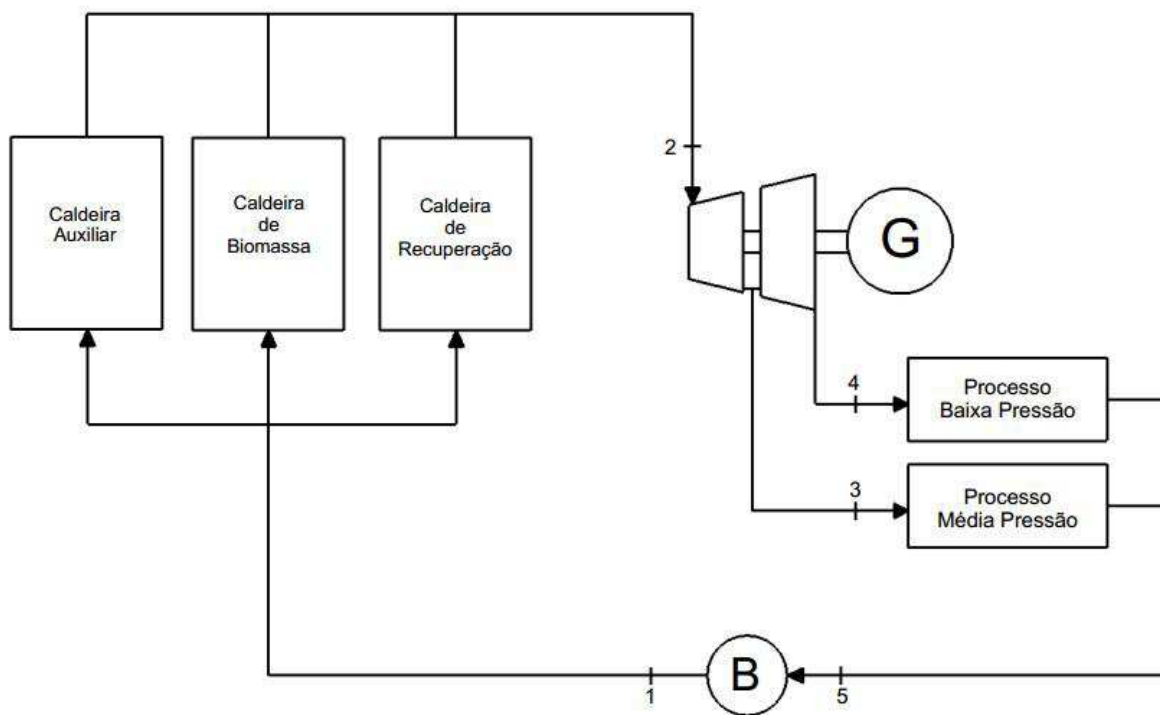
Na figura 13, os valores de Qu^* e W^* representam respectivamente a demanda de calor e energia elétrica da indústria, e os pontos 1, 2 e 3 são os pontos de operação das 3 configurações, onde pode ser visto que a configuração 2 irá suprir a demanda elétrica e térmica da fábrica, a configuração 1 produzirá apenas uma parcela da eletricidade demandada e a configuração 3 irá produzir um excesso de eletricidade.

5.1 Primeira configuração

5.1.1 Análise energética da primeira configuração

O ciclo de cada configuração foi dividido em pontos para que fosse possível avaliar as propriedades termodinâmicas presentes. A figura 14 apresenta o ciclo do sistema 1.

Figura 14: Configuração 1



Fonte: Elaborada pelos autores.

As propriedades termodinâmicas de cada ponto do sistema estão listadas na tabela 8. Os pontos 1s, 3s e 4s representam as propriedades de operação isentrópica da turbina e da bomba.

Tabela 8. Propriedades termodinâmicas da configuração 1

Ponto	Vazão (kg/s)	Pressão (MPa)	Temperatura (°C)	Entalpia (kJ/kg)	Entropia (kJ/kg.K)
1	89,17	8	131,1	556,4	1,639
1s	89,17	8	130,7	554,4	1,634
2	89,17	8	490	3373	6,692
3	32,50	1,2	264	2966,6	6,889
3s	32,50	1,2	220	2865	6,692
4	56,67	0,6	166,6	2774,9	6,802
4s	56,67	0,6	158,9	2727	6,692
5	89,17	0,27	130	546,3	1,634

Fonte: Elaborada pelos autores.

Através dos valores da tabela 8 foi possível encontrar as demais variáveis do sistema, que seguem apresentados na tabela 9. As potências da bomba (W_b) e da turbina (W_t) foram calculadas pela variação das entalpias de entrada e saída relacionadas com a vazão de fluido de trabalho. As potências das caldeiras de biomassa (Q_{bio}) e de recuperação (Q_{rec}) foram determinadas a partir da energia que é liberada da queima de cascas na caldeira de biomassa e de licor negro na caldeira de recuperação. A potência (Q_{aux}) foi determinada afim de suprir a demanda de vapor dos processos da fábrica. O calor útil (Q_u) se refere a potência térmica demanda pelos processos de produção de papel e celulose.

Tabela 9: Variáveis de operação da configuração 1

Variável	Valor (MW)
Wb	1,13
Qbio	32,38
Qrec	130,27
Qaux	88,51
Wt	47,10
Qu	204,96

Fonte: Elaborada pelos autores.

A tabela 10 refere-se ao PCI e o consumo dos combustíveis nas caldeiras, onde os consumos de casca e licor negro se referem a quantidade de resíduos gerados pela fábrica. O consumo de combustível auxiliar, no caso o gás natural, foi calculado em função da potência determinada para a caldeira auxiliar.

Tabela 10: consumo de combustível nas caldeiras da configuração 1.

Combustível	PCI (MJ/kg)	Consumo (kg/s)
Cascas	5,72	5,66
Licor negro	14,00	9,31
Gás natural	36,21	2,44

Fonte: Elaborada pelos autores.

A partir do consumo de combustível e da potência elétrica produzida no ciclo, foi calculado o consumo específico de cada combustível. A tabela 11 apresenta este consumo em quilograma de combustível por unidade de potência elétrica produzida.

Tabela 11: Consumo específico de combustível para a configuração 1.

Combustíveis	Consumo específico (kg/MW)
Cascas	0,120
Licor negro	0,198
Gás natural	0,052

Fonte: Elaborada pelos autores.

Para a avaliação do sistema, alguns parâmetros de desempenho foram considerados: fator de utilização da energia, índice de geração de potência e a relação potência e calor, que estão apresentados na tabela 12.

Tabela 12: Parâmetros de desempenho da configuração 1

Parâmetro	
FUE	1,0036
IGP	1,0195
RPC	0,2298

Fonte: Elaborada pelos autores.

5.1.2 Análise econômica da primeira configuração

A análise econômica foi determinada pelo valor presente líquido. O valor de investimento inicial para essa configuração foi de R\$ 156.846.974,69. Os demais valores de despesas que compõem o VPL estão apresentados na tabela 13.

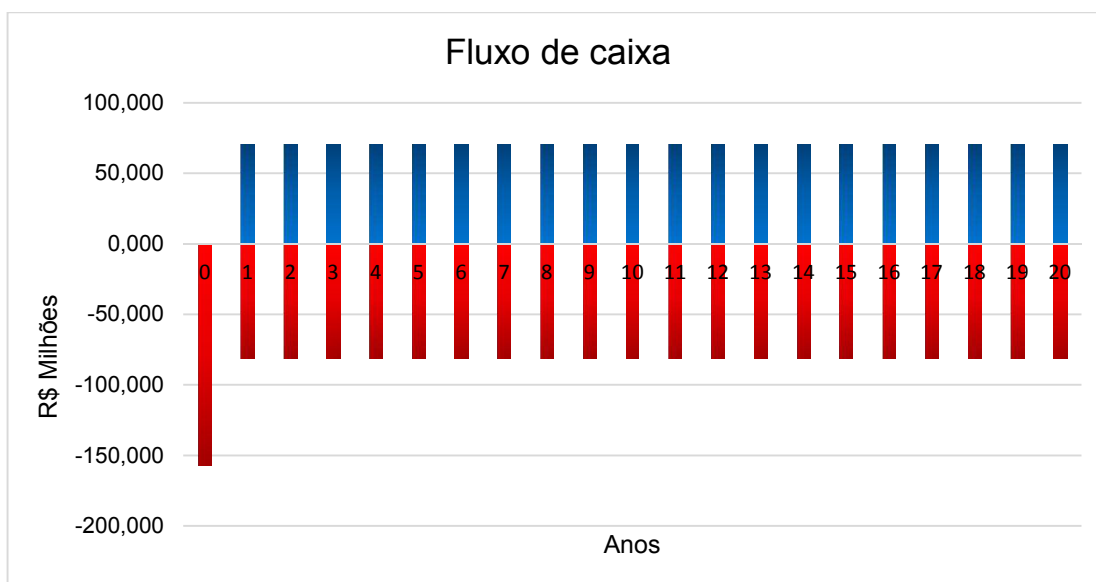
Tabela 13: Composição de despesas do investimento

Despesa	Custo (R\$/ano)
Operação	313.693,95
Combustível auxiliar	62.104.495,66
Compra de energia elétrica	19.371.613,19

Fonte: Elaborada pelos autores.

A economia obtida neste ciclo foi de R\$ 70.737.250,81 por ano, referente a energia elétrica não comprada da concessionária, visto o sistema produz parte da energia elétrica demandada pela indústria, como mostrado na tabela 9. Assim um fluxo de caixa com os respectivos rendimentos e gastos para uma vida útil de 20 anos foi esquematizado na figura 15.

Figura 15: Fluxo de caixa da configuração 2.



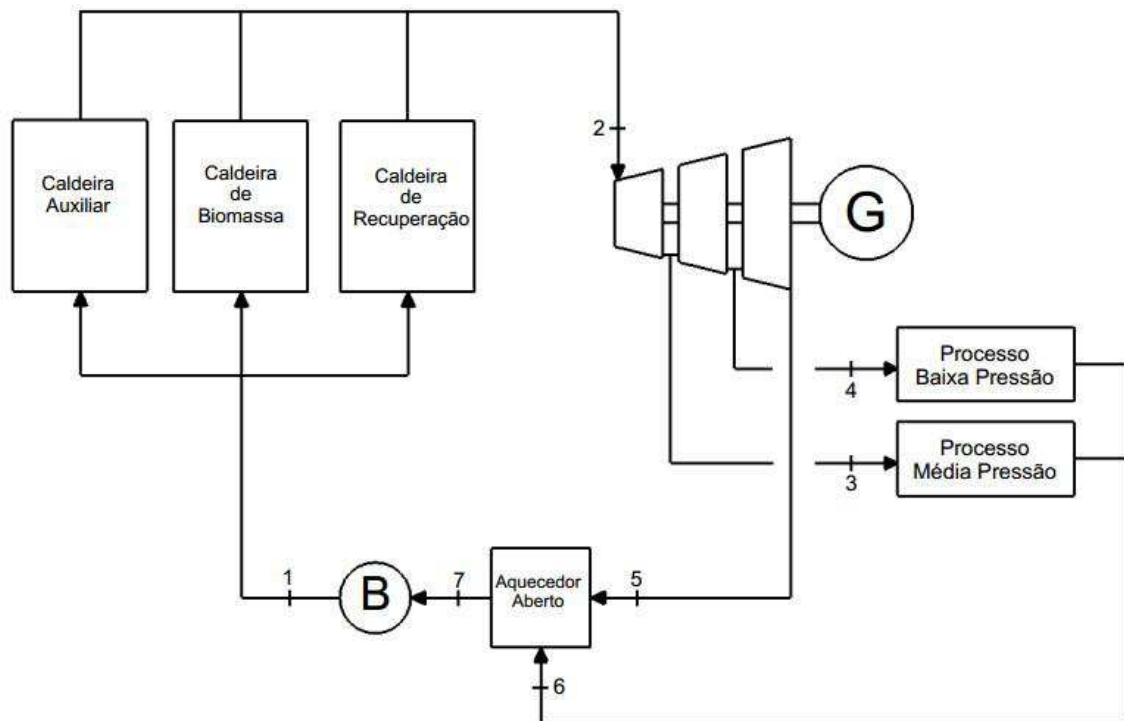
Fonte: Elaborada pelos autores.

5.2 Segunda Configuração

5.2.1 Análise energética da segunda configuração

A figura 16 apresenta o ciclo do sistema 2 com seus respectivos pontos.

Figura 16: Configuração 2



Fonte: Elaborada pelos autores.

As propriedades termodinâmicas da configuração estão apresentados na tabela 14.

Tabela 14: Propriedades termodinâmicas da configuração

Ponto	Vazão (kg/s)	Pressão (MPa)	Temperatura (°C)	Entalpia (kJ/kg)	Entropia (kJ/kg.K)
1	182,95	8	134,8	571,7	1,677
1s	182,95	8	134,3	569,7	1,672
2	182,95	8	490	3373	6,692
3s	32,50	1,2	220	2865	6,692
3	32,50	1,2	264	2966,6	6,889
4s	56,67	0,6	158,9	2727	6,692
4	56,67	0,6	166,6	2774,9	6,802
5s	93,78	0,3	133,5	2603	6,692
5	93,78	0,3	133,5	2637,3	6,776
6	89,17	0,3	130	546,3	1,634
7	182,95	0,3	133,6	561,4	1,672

Fonte: Elaborada pelos autores.

As variáveis de operação da configuração podem ser vistas na tabela 15. Para esta configuração a potência da turbina foi fixada de acordo com a demanda do processo, e a potência da caldeira auxiliar foi encontrada a partir dessa consideração.

Tabela 15: Variáveis de operação da configuração 2.

Variável	Valor (MW)
Wb	1,90
Qbio	32,38
Qrec	130,27
Qaux	349,85
Wt	60,00
Qu	204,96

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os consumos dos combustíveis para a configuração estão presentes na tabela 16, e os consumos específicos de combustível estão apresentados na tabela 17.

Tabela 16: Consumo de combustível nas caldeiras da configuração 2.

Combustível	PCI (MJ/kg)	Consumo(kg/s)
Cascas	5,72	5,66
Licor Negro	14,00	9,31
Gás natural	36,21	9,66

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 17: Consumo específico de combustível nas caldeiras da configuração 2.

Combustível	Consumo específico (kg/MW)
Cascas	0,094
Licor negro	0,155
Gás natural	0,161

Fonte: Elaborada pelos autores.

5.2.2 Análise econômica da segunda configuração.

Na análise econômica da configuração, os valores obtidos são os seguintes: custo do investimento inicial igual a R\$ 199.800.000,00, e a economia com a energia não comprada que representa R\$ 90.108.864,00 por ano, a tabela 18 mostra a composição das despesas.

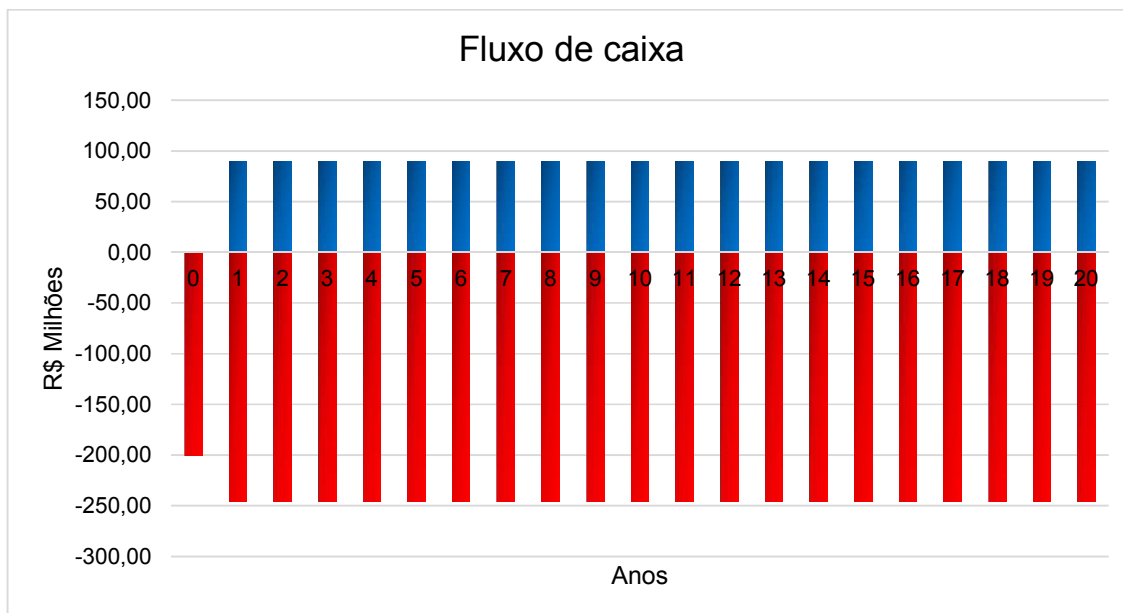
Tabela 18: Composição de despesas do investimento.

Despesa	Custo (R\$/ano)
Operação	399.600,00
Combustível auxiliar	245.483.292,22

Fonte: Elaborada pelos autores.

O fluxo de caixa dado para esse investimento é exposto na figura 17.

Figura 17: Fluxo de caixa da configuração 2.



Fonte: Elaborada pelos autores.

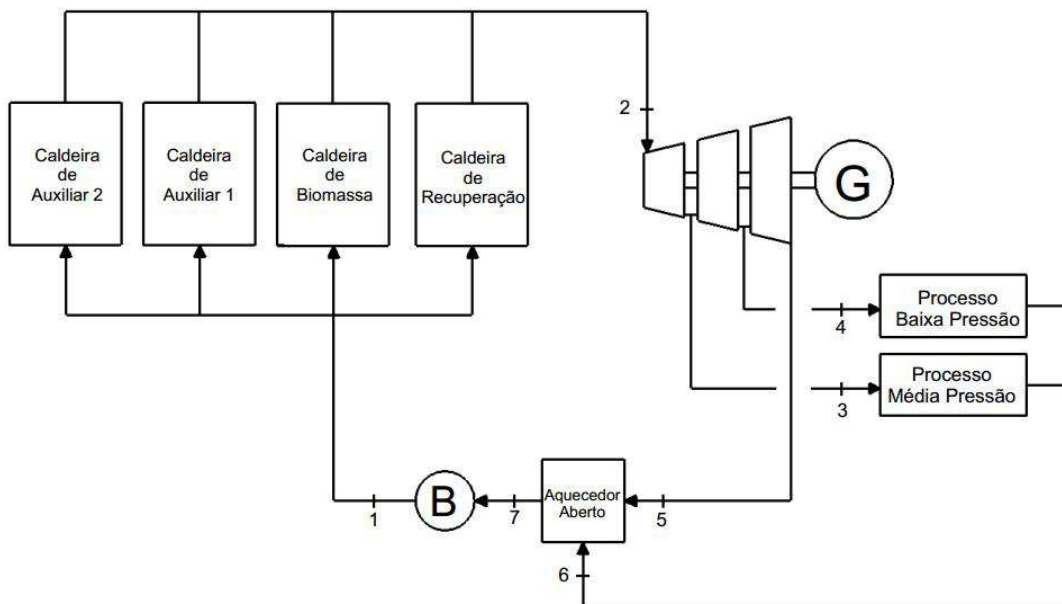
5.3 Terceira configuração

5.3.1 Análise energética da terceira configuração.

A configuração 3, figura 18, possui duas caldeiras auxiliares, sendo que a segunda deverá operar na sua capacidade máxima de produção de vapor.

O combustível da caldeira auxiliar 2 será o carvão vegetal, e todo o vapor produzido por essa caldeira será destinado para a produção de energia elétrica.

Figura 18: Configuração 3



Fonte: Elaborada pelos autores.

A análise e as propriedades termodinâmicas estão mostradas na tabela 19.

Tabela 19: Propriedades termodinâmicas da configuração 3.

Ponto	Vazão (kg/s)	Pressão (MPa)	Temperatura (°C)	Entalpia (kJ/kg)	Entropia (kJ/kg.K)
1	321,75	8	134,8	571,7	1,677
1s	321,75	8	134,3	569,7	1,672
2	321,75	8	490	3373	6,692
3s	32,50	1,2	220	2865	6,692
3	32,50	1,2	264	2966,6	6,889
4s	56,67	0,6	158,9	2727	6,692
4	56,67	0,6	166,6	2774,9	6,802
5s	232,58	0,3	133,5	2603	6,692
5	232,58	0,3	133,5	2637,3	6,776
6	89,17	0,3	130	546,3	1,634
7	321,75	0,3	133,6	561,4	1,672

Fonte: Elaborada pelos autores.

Dentre as variáveis de operação da configuração 3, como mostra a tabela 20, está presente a potência da caldeira auxiliar 2 (Qaux 2), que representa a potência produzida por esta caldeira queimando carvão vegetal, afim de aumentar a produção de potência elétrica.

Tabela 20: Variáveis de operação da configuração 3

Variável	Valor (MW)
Wb	3,34
Qbio	32,38
Qrec	130,27
Qaux 1	349,85
Qaux 2	388,81
Wt	218,19
Qu	204,96

Fonte: Elaborada pelos autores.

As tabelas 21 e 22 apresentam o consumo de combustível bem como seu consumo específico.

Tabela 21: Consumo específico de combustível nas caldeiras da configuração 3.

Combustível	PCI MJ/kg	Consumo(kg/s)
Cascas	5,72	5,66
Licor Negro	14	9,30
Gás natural	36,21	9,66
Carvão vegetal	26,79	14,51

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 22: Consumo específico de combustível nas caldeiras da configuração.

Combustível	Consumo específico (kg/MW)
Cascas	0,026
Licor Negro	0,043
Gás natural	0,044
Carvão vegetal	0,067

Fonte: Elaborada pelos autores.

5.3.2 Análise econômica da terceira configuração.

A composição dos valores para a análise econômica de despesas e rendimentos podem ser vistas nas Tab. 23 e 24. O custo de investimento inicial é de R\$ 726.587.357,31.

Tabela 23: Composição de despesas do investimento

Despesa	Custo (R\$/ano)
Operação	1.453.174,71
Combustível auxiliar	410.251.665,43

Fonte: Elaborada pelos autores.

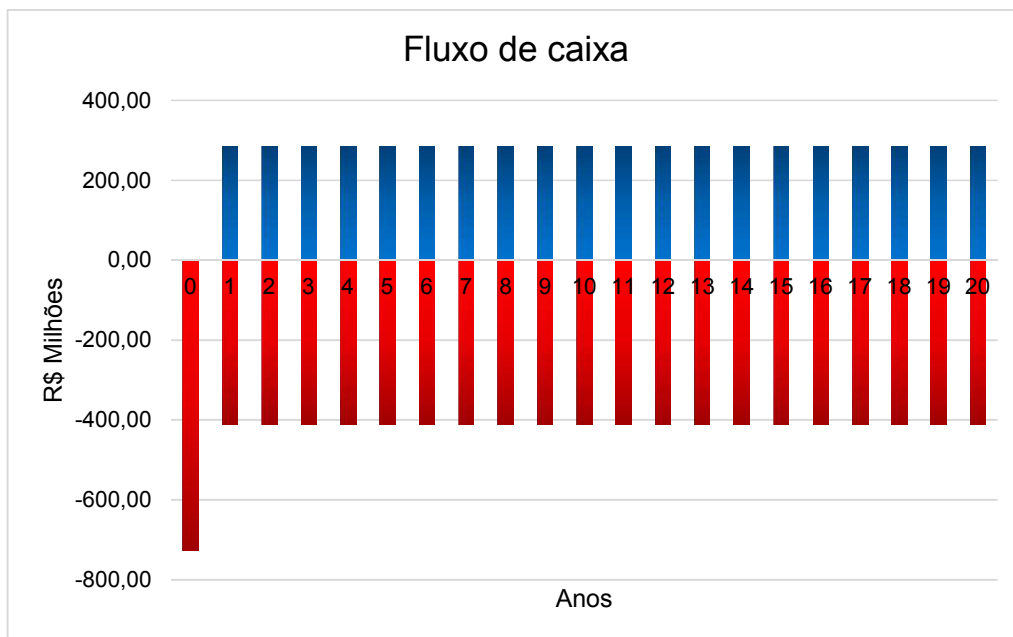
Tabela 24: Composição de rendimentos do investimento

Rendimento	Valor (R\$/ano)
Energia elétrica não comprada	90.108.864,00
Energia elétrica vendida	195.395.397,07

Fonte: Elaborada pelos autores.

A figura 19 apresenta o fluxo de caixa deste sistema.

Figura 19: Fluxo de caixa da configuração 3.

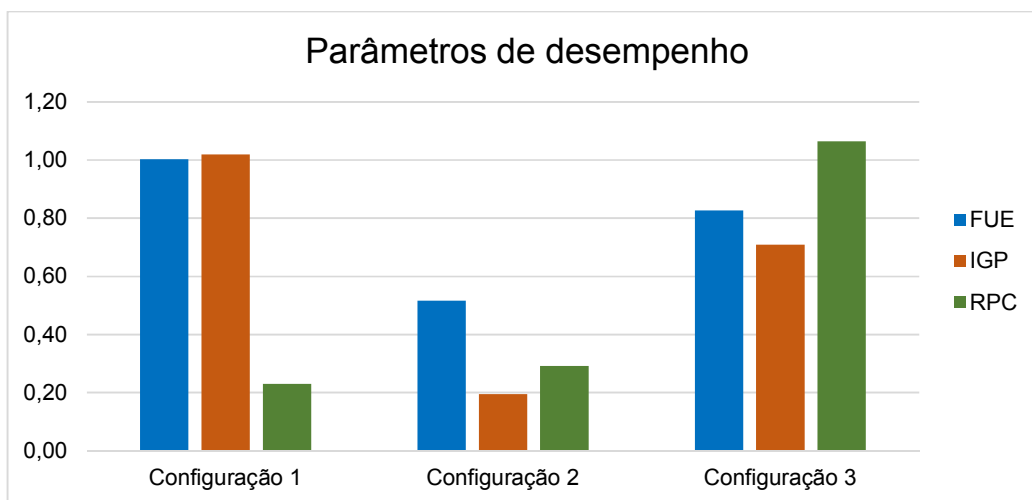


Fonte: Elaborada pelos autores.

6 RESULTADOS

Foram comparados os parâmetros de desempenho entre as 3 configurações, como mostra a figura 20.

Figura 20: Parâmetros de desempenho dos sistemas.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Os valores de FUE e IGP apresentaram resultados próximos a 1, o que indica que este sistema está utilizando toda energia do combustível na produção de potência elétrica e calor útil, isso considerando a eficiência da caldeira como sendo 100%.

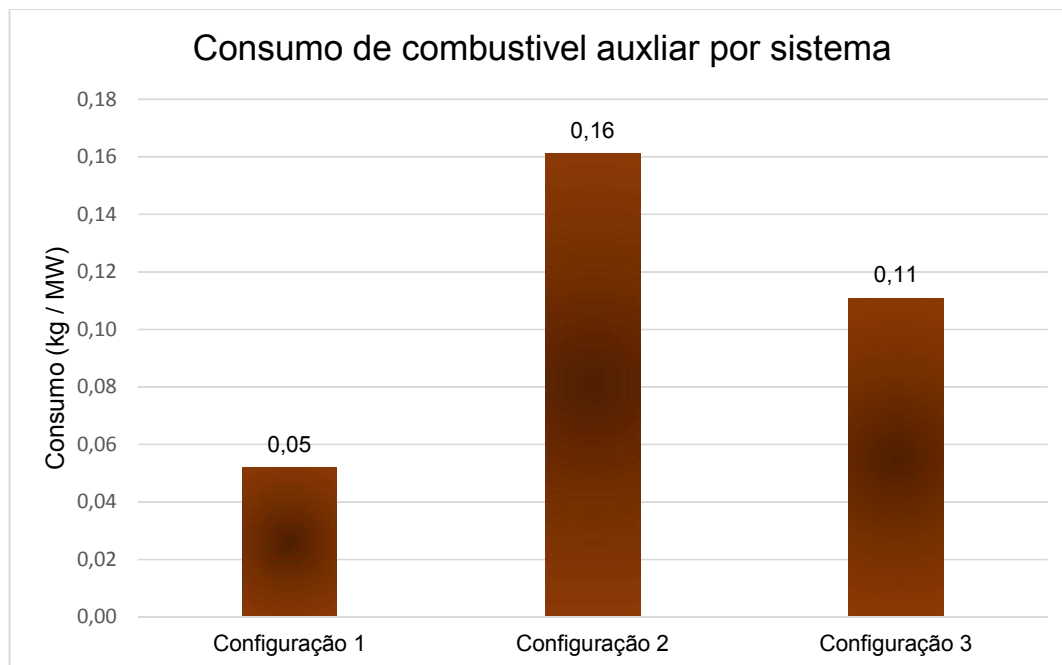
O RPC teve seu maior valor para a configuração 3 e o menor para configuração 1, visto que a primeira priorizou uma produção maior de eletricidade.

A configuração 2 foi a opção mais ineficiente dentre as 3, pois nota-se através do seu índice de FUE, que grande parte da potência térmica gerada não era utilizada.

Dentre as configurações analisadas através dos parâmetros de desempenho, a configuração 1 se mostrou a mais eficiente.

Os consumos de combustíveis auxiliares pela potência elétrica produzida estão apresentados na Figura 21.

Figura 21: consumo específico de combustíveis auxiliares

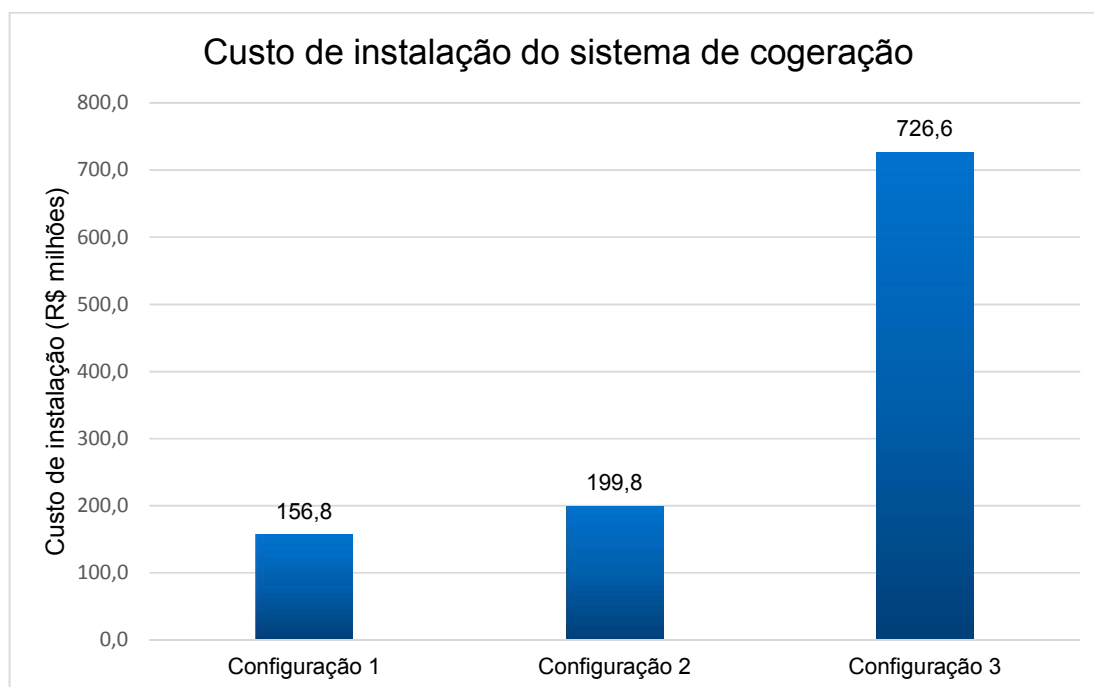


Fonte: Elaborada pelos autores.

Em relação ao consumo específico de combustível a configuração 2 se mostrou mais ineficiente em relação aos outros sistemas em questão.

Os valores referentes ao custo de instalação de cada sistema podem ser vistos na figura 22.

Figura 22: Custo de instalação

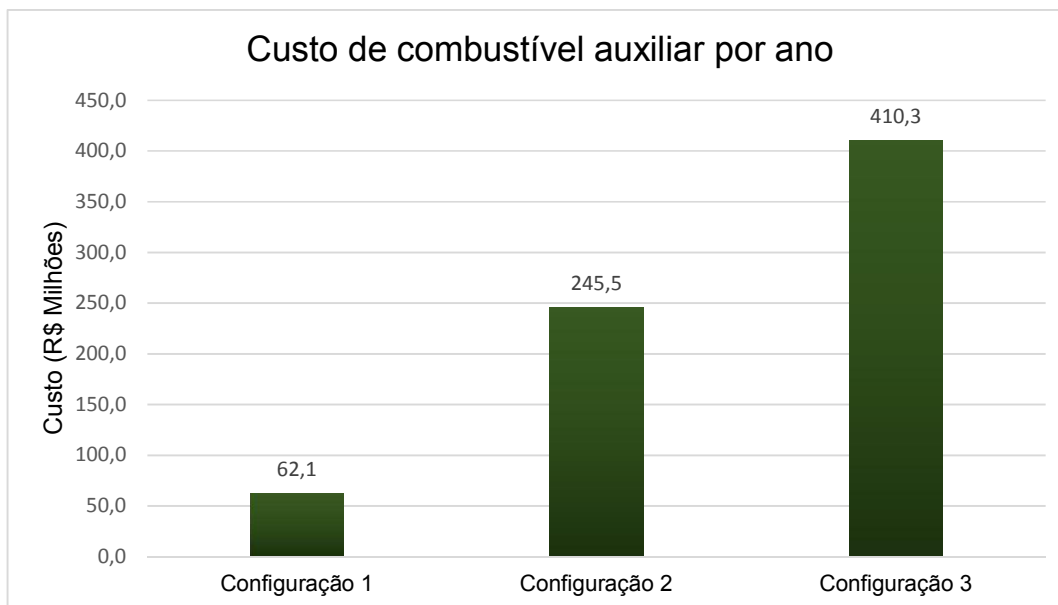


Fonte: Elaborada pelos autores.

A configuração 3 terá um custo de instalação muito maior que as demais configurações, visto que esse custo está associado a energia elétrica que será produzida, e a terceira configuração tem a maior geração de eletricidade dentre as 3.

Os gastos com a compra de combustível auxiliar das 3 configurações são mostrados na figura 23.

Figura 23: Custo com compra de combustível auxiliar.



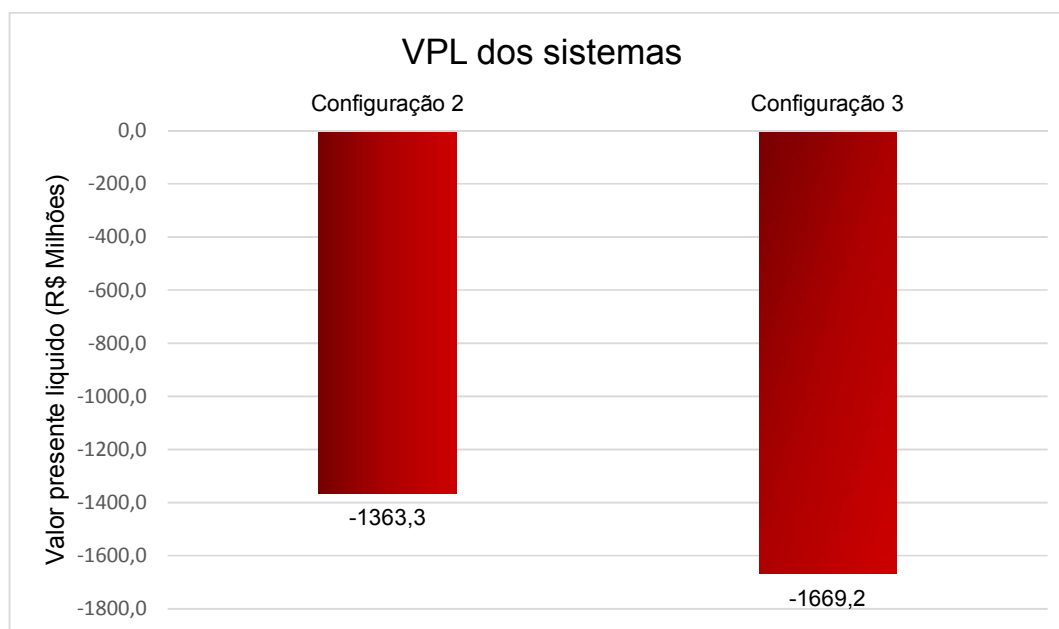
Fonte: Elaborada pelos autores.

A compra de combustível auxiliar tem um aumento proporcional para as 3 configurações, o que era o esperado pela diferença na produção das 3.

Para se verificar a viabilidade do investimento feito nos sistemas 2 e 3 durante sua vida útil foi realizado o cálculo do valor presente líquido, onde não foi incluído a configuração 1 pois essa não se trata de uma melhoria e sim do sistema já empregado. O objetivo da análise é atestar se há ou não a viabilidade na melhoria do sistema convencional de cogeração.

A figura 24 mostra o vpl calculado para as configurações 2 e 3.

Figura 24: Valor presente líquido das configurações 2 e 3.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Os dois VPL apresentaram valores negativos o que significa que os dois investimentos não serão economicamente viáveis.

Os valores negativos de vpl são influenciados pelo alto preço dos combustíveis auxiliares comprados que excedem os ganhos com a venda de energia elétrica, sendo mais viável a compra de energia elétrica da concessionária.

7 CONCLUSÃO

A indústria de papel e celulose possui condições favoráveis à cogeração de energia, pois além da necessidade de vapor esse setor industrial dispõe de resíduos gerados nos processos, que podem ser aproveitados para a produção de energia.

Porém para a indústria estudada neste trabalho, a energia cogorada a partir dos resíduos não atendia a demanda da fábrica, sendo assim fontes alternativas de combustíveis deveriam ser adicionadas ao sistema de cogeração.

Com o sistema operando conforme a configuração 1 a indústria produzia o que precisava de vapor e ainda gerava um excedente de energia elétrica que supria parte de sua demanda. Deste modo se mostrou interessante um aprimoramento desse sistema afim de gerar a energia elétrica demandada e até gerar um excedente para ser vendido, portanto a análise foi feita para verificar a viabilidade dessas melhorias.

De acordo com a análise de desempenho das 3 configurações, claramente se percebe que a configuração 1 apresenta uma eficiência superior em relação as outras, porém esta apresenta a desvantagem de não poder aumentar sua produção de vapor, sem que isso repercuta nos processos.

Na análise econômica, os sistemas se tornaram inviáveis, visto que os gastos com combustível estavam excedendo os ganhos com a energia elétrica, e os custos de instalação se tornavam excessivos, acarretando durante sua vida útil um prejuízo para o investidor.

Logo as análises econômicas mostraram que era inviável aumentar a produção de vapor para produzir mais energia elétrica, o que leva a configuração 1 ser a mais viável para a indústria, pois possui o melhor desempenho termodinâmico dentre as 3 analisadas.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AF-ENGINEERING. **Energy consumption in the pulp and paper industry - Model mills 2010**. Disponível em: <<http://www.aforsk.se/images/pdf/09-163fine-paper-final-jan-2011.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2014.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Gás natural**. 2008. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 15 jul. 2014

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução homologatória Nº 1.505.** Disponível em: <http://www.enersul.com.br/files/2012/06/20130408_ENERSUL_3CRTP_Homologa_Tarifas_reh20131505.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2014.

BARROS, Talita Delgrossi. **Licor negro.** Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fb123vn002wx5eo0sawqe35bc5orw.html>>. Acesso em: 06 jul. 2014

BRACELPA – Associação Brasileira de celulose e papel, **Dados do setor.** 2014. <<http://bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/booklet.pdf>>. Acesso em: 06 jul. 2014

BRACELPA – Associação Brasileira de celulose e papel, **Dados estatísticos.** 2012. <<http://bracelpa.org.br/bra2/?q=node/34>>. Acesso em: 06 jul. 2014

BRASIL, Newton Paterman. **Apostila de co-geração.** Disponível em: <http://www.professores.uff.br/dulcemar/Doc_PDF/Apostila_Cogeracao_Otima.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2014

BRITO, J. O. **Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira.** Documentos florestais, v. 9. p. 1-19, mai. 1990.

ENERSUL. **Resultado da chamada pública para compra de energia elétrica.** Disponível em: <http://www.cogen.com.br/informativo/2013/Documentos/Resultado_enersul.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2014

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA MME). **Balço Energético Nacional 2012**: Ano base 2011. Rio de Janeiro, 2012.

IBT-INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Preço do Gás Natural**. Disponível em: <<http://200.189.102.61/SIEE/dashboard/PrecoDoGasNatural>>. Acesso em: 16 jul. 2014.

KLOCK, Umberto. **Fabricação do papel**. Curitiba, 2010. Color. Disponível em: <www.madeira.ufpr.br/disciplinasklock/polpaepapel/fabricaodepapel.ppt>

LORA, Electo Eduardo Silva; NASCIMENTO, Marco Antônio Rosa do. **Geração termelétrica**: planejamento, projeto e operação. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência Ltda, 2004. 1296 p.

MELO, Joelma Ribeiro de et al. **Estudo das características do licor negro**. Disponível em: <http://www.5eetcg.uepg.br/Anais/artigospdf/50051_vf1.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2014.

MORAN, Michael J. et al. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 7. ed. Rio de Janeiro: Grupo Editora Nacional, 2013. 819 p.

OSORIO, Estela Gonçalves. **Indústria de papel e celulose: estudo de caso da implantação da Vcp florestal no extremo sul do Rio Grande do Sul**. 2007. 58 f. monografia (Graduação) - Curso de Cnm, Departamento de Ciências Econômicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

PIOTTO, Zeila Chittolina. **Eco-eficiência na Indústria de Celulose e Papel - Estudo de Caso**. 2003. 357 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Disponível em: <http://www.teclim.ufba.br/site/material_online/teses/tese_zeila_c_piotto.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2014.

SANTOS, Fernando Butierres dos; NOVO, Luciana Morgani Alves. **Fundamentos teóricos relacionados a cogeração e o exemplo da central de cogeração Infoglobo**. 2008. 189 f. monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SILVA, Josias da. **Análise Termoeconômica do Processo de Geração de Vapor e Potência do Segmento de Celulose e Papel**. 2002. 222 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2002.

SILVEIRA, José Luz; CORONADO. C. R; Tuna. C. E, OKAWA. R. M; **Análise técnica-econômica de um sistema de cogeração aplicado a indústria de papel e celulose**. 2007. Disponível em: <<http://congresso.pucp.edu.pe/cibim8/pdf/29/29-07.pdf>>. Acesso em: 06 jul. 2014.

SINDCARV. **Legislação**. Disponível em: <<http://www.sindicarv.com.br/>>. Acesso em: 15 jul. 2014.

SOUZA, Bruno Damacena de. **Estudo do uso de carvão vegetal de resíduos de biomassa no sistema de aquecimento dos fornos de produção do clínquer de cimento portland**. 2011. Disponível em: <http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio_resumo2011>. Acesso em: 15 jul. 2014.

SUZANO. **Papel e celulose.** Disponível em:
<<http://www.suzano.com.br/portal/suzano-papel-e-celulose.htm>>. Acesso em: 16 jul.
2014.

VELÁZQUEZ, Silvia Maria Stortini González. **A cogeração no segmento de papel e celulose: contribuição à matriz energética do Brasil.** 2000. 191 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. Disponível em:
<http://www.iee.usp.br/biblioteca/producao/2001/Teses/Silvia%20M_S_G_Vel%E1zquez.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2014.

ZETEC. **Eficiência em processos de combustão à gás.** 2013 Disponível em:
<<http://www.gasescombustiveis.com.br/>>. Acesso em: 15 jul. 2014.