unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

LUIZ HENRIQUE ZUCULO

Análise energética da capacidade de geração de energia de uma industria de celulose em ciclo combinado para diferentes níveis de produção

Guaratinguetá - SP
2019

Luiz Henrique Zuculo

Análise energética da capacidade de geração de energia de uma industria de celulose em ciclo combinado para diferentes níveis de produção

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador : José Antonio Perrella Balestieri

Guaratinguetá - SP
2019

Zuculo, Luiz Henrique
Z94a Análise energética da capacidade de geração de energia de uma indústria de celulose em ciclo combinado para diferentes níveis de produção / Luiz Henrique Zuculo – Guaratinguetá, 2019.
62 f : il.
Bibliografia: f. 60-62

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.
Orientador: Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Co-Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins

1. Celulose. 2. Energia elétrica – Consumo. 3. Turbinas a vapor.
I. Título.

CDU 621.311

Luciana Máximo
Bibliotecária CRB-8/3595

unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

Luiz Henrique Zuculo

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUADO ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. Alex Mendonça Bimbato
UNESP-FEG

Prof. Dr. Fernando Henrique Mayworm de Araujo
UNESP-FEG

Dezembro 2019

DADOS CURRICULARES

LUIZ HENRIQUE ZUCULO

NASCIMENTO	30.06.1995 – Jaboticabal / SP
FILIAÇÃO	Luiz Anselmo Zuculo Liliana de Jesus Françolin
2014/2019	Curso de graduação Engenharia Mecânica – UNESP – Campus Guaratinguetá / SP.
2015/2016	Programa de Educação Tutorial Membro do grupo PET de Engenharia Mecânica - Guaratinguetá
2018/2019	Estágio supervisionado Suzano SA – Jacareí/SP

dedico este trabalho
de modo especial, à milha família

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos;

ao meu orientador, *Prof.* José Antonio Perrella Balestieri que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível;

aos meus pais *Luiz e Liliana*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos;

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

ao meu amigo Renato Morettin e todos os funcionário da Indústria de celulose de Jacareí que sempre me incentivaram e sempre me apoiaram durante meu estágio.

a minha republica do coração, na qual pude construir uma segunda família que esteve ao meu lado em todos os momentos e me proporcionaram experiências incríveis.

a minha família que a todo momento acreditaram em mim e no meu sucesso e sempre me incentivaram a buscar sempre conhecimento e desenvolvimento.

a Dona Madalena que virou minha segunda mãe durante o tempo da graduação cuidando de mim em todos os momentos e por sempre dedicar suas orações para mim.

RESUMO

No presente trabalho foi realizada uma análise energética da capacidade de geração de energia em uma indústria de celulose, para diferentes patamares de produção da unidade, de forma a observar a influência da produção no rendimento do sistema de geração de energia. O objetivo principal do trabalho, é analisar o quanto a redução de produção da fábrica implica na potência térmica proveniente das caldeiras e, consequentemente, na produção de energia pelas turbinas a vapor. A análise foi realizada por meio de balanço de massa e energia, utilizando a primeira Lei da Termodinâmica, a partir de dados reais extraídos do processo, para três casos distintos. No primeiro caso, a fábrica permanece operando com 100% de capacidade produtiva, ou seja, capacidade nominal. No segundo caso, a fábrica reduz sua operação a 65% de sua capacidade nominal. No terceiro caso, a unidade mantém sua operação a 65% de capacidade, mas com a diferença de estar com uma turbina fora de operação, de forma a concentrar todo o vapor produzido em apenas duas máquinas. Em todos os casos observados, a unidade fabril foi mantida a operação em paridade térmica. De acordo com os dados estudados e os cálculos realizados, quando comparado os resultados do caso um para o caso dois e três é possível observar uma redução de 25% da potência proveniente das caldeiras e uma redução de 30% na geração de energia pelas turbinas a vapor. Além disso, foi possível observar uma piora no consumo específico de vapor por megawatt de energia gerado, passando de 9,23 toneladas de vapor/MW para o caso um, para 10,44 e 9,97 toneladas de vapor/MW para os casos dois e três, respectivamente. Como última análise é levado em consideração, os rendimentos individuais de cada turbogerador e comparando - os as consequências de redução de produção para uma turbina a gás e uma turbina a vapor. Dessa forma foi possível concluir que a variação de produção de uma unidade tem grande influência no sistema de geração de energia proveniente das turbinas a vapor.

PALAVRAS-CHAVE: Celulose. Energia. Eficiência. Turbinas. Indústria.

ABSTRACT

In this work was done an energetic study in a pulp industry. The idea is to get to know how does the range of the production induces the capacity os power generation from the turbines. For doing this test it was necessary to get back to literature and do the analyse from mass and energy balance from the first low of thermodynamics. All the data necessary for doing the word were real numbers from the process. For that were tested three different cases, the first scenario the plant was working with 100% of the capacity of production, the second scenario because of an a company strategic the rhythm got down to 65% of the capacity and the third scenario the plant still working with 65% of the capacity but they decided to put in stand by one of the turbines to see how the process were going to respond. For all those scenarios the plant still always working in thermal parity. According with the cases and the data studied when the results from scenario one two the case two and three it is possible to see a shrinkage of 25% of thermal power from the boilers and also 30% of the steam turbines electric generation. Other statistic that also shows that the process got worse with the changes in the production of the factory was specific steam consumption per megawatt generated in the turbines the result for the first scenario was 9,23 steam ton/MW while for the second and the third were 10,44 and 9,97 steam ton/MW respectively. The last work done was to compare the output from all the steam turbines and see how they worked at the differences scenarios and also to compare the results of the energy generated from steam turbines and gas turbines. In this way was possible to imply that the changes in the range of the production will turn over at to the energy generated system that come from the steam turbine.

KEYWORDS: Pulp. Energy. Efficiency. Turbine. Industry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Países com maior produção de Celulose 17
Figura 2 – Preço da Celulose em diferentes países 17
Figura 3 – Custo de produção da Celulose em diferentes países 18
Figura 4 – Rendimento da produção de Celulose 18
Figura 5 – Projeção de consumo da Celulose 19
Figura 6 – Volume em preço da exportação de produtos 20
Figura 7 – Volume de produção de Celulose no Brasil 21
Figura 8 – Volume de Celulose exportado pelo Brasil 21
Figura 9 – Processo industrial de produção de Celulose 23
Figura 10 – Etapa inicial de produção de Celulose 24
Figura 11 – Processo de branqueamento da Celulose 26
Figura 12 – Processo de secagem da Celulose 27
Figura 13 – Reações químicas do processo de recuperação química 28
Figura 14 – Ciclo de licores do processo de produção 29
Figura 15 – Ciclo Rankine com superaquecimento 38
Figura 16 – Ilustração de um ciclo Bryton 39
Figura 17 – Temperatura X Entropia para um ciclo Bryton 40
Figura 18 – Ciclo Bryton com recuperação de calor 41
Figura 19 – Esquema de turbina a vapor de contrapressão e extração 45
Figura 20 – Esquema de turbina a vapor de contrapressão com duas injeções e extração 46
Figura 21 – Fluxograma do processo de geração de vapor 48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Introdução de dados gerais 47
Tabela 2 – Disponibilidade de vapor provenientes das caldeiras para caso 1 49
Tabela 3 – Parâmetros gerais de processo para caso 1 49
Tabela 4 – Disponibilidade de vapor provenientes das caldeiras para caso 2 50
Tabela 5 – Parâmetros gerais de processo para caso 2 51
Tabela 6 – Disponibilidade de vapor provenientes das caldeiras para caso 3 52
Tabela 7 – Parâmetros gerais de processo para caso 3 52
Tabela 8 – Resultados obtidos com o caso 1 54
Tabela 9 – Resultados obtidos para os turbogeradores caso 1 54
Tabela 10 – Resultados obtidos com o Caso 2 55
Tabela 11 – Resultados obtidos para os turbogeradores caso 2 55
Tabela 12 – Resultados obtidos com o Caso 3 56
Tabela 13 – Resultados obtidos para os turbogeradores caso 3 57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DBO	Demanda Biológica de oxigênio
ETA	Estação de Tratamento de Água
POINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia
TG	Turbogerador

LISTA DE SÍMBOLOS

η	Rendimento
$\dot{W}_{liq}$	Potência líquida
$\dot{Q}_h$	Potência térmica fornecida ao sistema
$\dot{W}_{tv}$	Potência fornecida pela turbina a vapor
$\dot{W}_b$	Potência consumida pela bomba
$\dot{W}_{cp}$	Potência consumida pelo compressor
$\dot{W}_{tg}$	Potência fornecida pela turbina a gás
PCI	Poder calorífico inferior
$\dot{m}$	Vazão mássica
c	Calor específico
T	Temperatura
P	Pressão
r_p	Relação de pressão
Σ	Somatória
dm_{vc}	Derivada parcial da vazão mássica para um volume de controle
dt	Derivada parcial do tempo
V	Velocidade
g	Aceleração da gravidade
Z	Altura
h	Entalpia
dE_{vc}	Derivada parcial da energia para um volume de controle
s	Entropia
$\dot{S}_{ger,v.c.}$	Entropia gerada
dS_{vc}	Derivada parcial da entropia
Δ	Diferença entre parâmetros

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
1.1 HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DA CELULOSE 13
1.1.1 Origem da Celulose 13
1.1.2 Eucalipto como matéria prima para Celulose 14
1.1.3 Histórico da Celulose e Papel no Brasil 15
1.1.4 Panorama mundial quanto a produção de Celulose 16
1.1.5 Panorama atual do setor no Brasil 19
1.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CELULOSE 22
1.2.1 Processo Kraft de produção de Celulose de Eucalipto 22
1.2.2 Caracterização da fábrica de Jacareí 30
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 34
3 OBJETIVOS 36
4 REVISÃO DOS CONCEITOS ENVOLVIDOS 37
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO CICLO RANKINE 37
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO CICLO BRYTON 39
4.3 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA 42
4.4 CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA DE UMA TURBINA A VAPOR 44
5 DESCRIÇÃO DOS CASOS A SEREM ESTUDADOS 47
5.1 CASO 1 – PLANTA OPERANDO COM 100% DE CAPACIDADE 48
5.2 CASO 2 – PLANTA OPERANDO COM 65% DE CAPACIDADE 49
5.3 CASO 3 – PLANTA OPERANDO COM APENAS DOIS TURBOS GERADORES A VAPOR 51
6 RESULTADOS E DISCUÇÕES 53
6.1 RESULTADOS OBTIDOS PARA O CASO 1 53
6.2 RESULTADOS OBTIDOS PARA O CASO 2 55
6.3 RESULTADOS OBTIDOS PARA O CASO 3 56
7 CONCLUSÃO 58
REFERÊNCIAS 60

1 INTRODUÇÃO

1.1 HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DA CELULOSE

1.1.1 Origem da Celulose

Ao longo de toda a evolução do ser humano é possível também acompanhar o desenvolvimento da escrita e das formas de comunicação. Os registros mais antigos encontrados são feitos em rochas, cerâmicas, couro de animais e madeiras, com escritas com formas típicas de cada região. Contudo a evolução da capacidade cognitiva e do manejo de instrumentos levou a uma maior demanda e número de registros, o que favoreceu o desenvolvimento de melhores formas de se comunicar e transmitir as ideias.

Segundo Fritoli, Kruger e Carvalho (2016), apesar de ter uma menor resistência, foram materiais compostos por fibras vegetais que ganharam espaço nesse ramo. Foi por volta de 3700 a.C. que se teve o registro dos primeiros materiais, desenvolvidos pelos egípcios, a partir do caule da planta Cyperus Papyrus, mais conhecida como Papiro, que futuramente daria origem ao nome papel conhecido hoje.

Mesmo com todos esses registros e avanços, a real origem do papel se deu na China. Segundo Teixeira (2017), desenvolvido por um oficial da corte T'sai Lun em 105 d.C. que em uma viagem observou que vespas trituravam fibras vegetais de amoreira e bambu formando uma pasta celulósica e as utilizavam para construção de seu ninho. Devido a essa observação o oficial resolveu pilar as fibras vegetais junto com restos de redes de pescas até formar uma pasta celulósica; formada a pasta ele separava em moldes e deixava secar por um longo tempo. Esse processo deu origem à primeira folha celulósica de papel. O processo é tão característico que seu princípio de produção é utilizado até os dias de hoje, mas com muito mais tecnologia envolvida.

Para Teixeira(2017), os chineses conseguiram deter o conhecimento dessa nova tecnologia por muitos anos, até que no século VIII, em uma batalha com os Árabes, alguns chineses foram feitos prisioneiros e, em troca, entregaram a receita da produção da folha. A partir disso o processo foi se difundindo ao longo dos povos devido às guerras e conflitos, chegando até a Espanha onde se teve o primeiro registro de um moinho de celulose.

Com o advento inicialmente dos moinhos movidos por força hidráulicas, a intensificação dos movimentos das colonizações, que favoreceu também a difusão da tecnologia, e posteriormente a revolução industrial, exigiu – se uma maior demanda da utilização do papel,

mas ao mesmo tempo devido a aprimoração do processo produtivo, para suprir essa demanda, principalmente com técnicas mais eficazes de branqueamento, utilizando produtos químicos, que alavancaram ainda mais a produção e a qualidade do papel e hoje estão presentes no dia a dia de toda a população em diferentes formas e utilidades.

1.1.2 Eucalipto como matéria prima para a celulose

Depois de muitos anos, muitos estudos e avanços tecnológicos quanto à produção de celulose e papel, a briga entre os povos deixou de ser pela forma de obtenção dos mesmos, e passou a ser a busca por um grande volume de produção e com uma boa qualidade. Devido a este fato, a busca por uma matéria prima que trouxesse grandes retornos se intensificou. Americanos, suecos e finlandeses tinham por crença que a melhor matéria prima para se produzir a celulose seria a de plantas que apresentavam fibras longas, por exemplo, os Pinheiros ou Araucárias; por outro lado essas plantas têm o problema de demorarem cerca de 50 anos para chegar na idade de corte. De acordo com Martini (2004), a crença era tão grande em cima da fibra longa, que os fabricantes consideravam os produtos com origem em fibras curtas de má qualidade e acabaram apostando mais esforço, tempo e dinheiro em desenvolver maquinários para aprimorar o processo de produção com fibra longa, do que abrir os olhos para as experiências do pioneiro do eucalipto no Brasil, Navarro de Andrade.

Navarro foi aos Estados Unidos carregando com ele algumas toras de Eucalipto e por meio de processos mecânicos conseguiu produzir a celulose que ia dar a origem ao papel. Com isso, para provar que o produto era de qualidade ele imprimiu a edição inteira de um jornal com o papel, mas de nada adiantou.

Com o passar dos anos os produtores se depararam com um grande problema: o tempo de crescimento das fontes de fibras longas e, com isso, o alto valor agregado, baixa produção e aumento da demanda. Em decorrência disso o mundo abriu os olhos para a celulose de fibra curta. O cenário da segunda guerra mundial, e a falta de celulose importada, fez com que uma família de imigrantes russos, Feffers, começassem a realizar estudos de produção de papel a partir de fibras de Bambu, bagaço de cana e Agave, até que, enfim, chegaram ao eucalipto, novamente, que tinha uma vantagem enorme frente às outras fontes de fibras, pois demorava apenas 7 anos para chegar na fase de corte, contra 50 anos das fibras longas.

Mesmo nesse cenário alguns industriais brasileiros ainda investiam em produção com fibra longa de Araucária, contudo, estavam indo para o mesmo caminho dos europeus, para uma baixa produção e com um alto valor agregado a ela.

De acordo com Queiroz e Barrichelo (2008), enquanto isso a família de russos investia muito em testes e fórmulas para se obter uma celulose de qualidade e que pudesse ter competitividades frente a celulose americana e européia. Depois de muitos testes eles realizaram um último teste na universidade da Flórida, Gainesville, que provou a qualidade da celulose de eucalipto e, com isso, começaram a produzir a sua celulose na companhia Suzano de Papel e Celulose.

1.1.3 Histórico da Celulose e Papel no Brasil

Segundo Roth (1982), o primeiro registro de papel em solo brasileiro se deu pela carta de descobrimento da nova terra escrita por Pero Vaz de Caminha, mas um papel totalmente diferente do que conhecemos hoje, era um papel de linho holandês.

O primeiro registro em papel produzido no Brasil é uma notificação enviada ao conde de Linhares, com a seguinte descrição: “O primeiro papel que se fez no Rio de Janeiro, em 16 de Novembro de 1809” (MOTA e SALGADO, 1971, p.44)

Segundo Mota e Salgado (1971), o registro da instalação da primeira fábrica no Brasil se deu em 1810 em Andaraí Pequeno (Rio de Janeiro).

Contudo, os negócios não eram favoráveis para a indústria de celulose e papel, pois a corte portuguesa considerava que o avanço do ramo poderia ferir seus interesses e ser perigoso para sua soberania, por isso, incentivavam outras áreas de produção, principalmente a agrária. Além disso, as fábricas sofriam com a falta de matéria prima para a produção.

O avanço do eucalipto no Brasil se deu inicialmente para suprir a demanda das ferrovias, pois era preciso bastante carvão para manter todas as linhas ferroviárias. As primeiras plantações se deram no interior de Jundiaí e Rio Claro. Contudo, com o surgimento dos trens movidos a eletricidade, a demanda pelo carvão caiu demais; com isso os eucaliptos passaram a ter utilidades como postes, base de cercas e mourões. Só depois de muitos anos a plantação de eucalipto passou a ter como objetivo a produção de celulose.

Muitos anos se passaram e com eles também foi se vendo um enorme avanço em tecnologia de produção da celulose e papel. A descoberta da família Feffer de produzir a celulose a partir do eucalipto revolucionou o papel do Brasil no ramo. Mesmo ainda com a dificuldade de aceitação imposta pelos norte-americanos e europeus sobre a celulose de eucalipto, as indústrias no Brasil foram se multiplicando. De acordo com Queiroz e Barrichelo (2008), no governo de Ernesto Geisel, 1974, criou-se o Plano Nacional de Papel e Celulose, com o objetivo de tornar o Brasil autossuficiente e exportador de celulose de fibra curta. O

plano deu tão certo que em duas décadas o Brasil já tinha atingido seu objetivo e o ramo não parava de crescer.

A grande vantagem do Brasil, perante aos seus concorrentes no setor de celulose era gritante. Devido ao clima favorável e a disponibilidade de terras, favorecia a produção, de forma que, o espaço para grandes plantações e um tempo de corte de 7 anos, influenciou para que o valor da celulose brasileira fosse muito menor quando compara com as de outros países, com isso as exportações só aumentavam, de forma a chamar atenção do mercado externo e com isso passaram a investir ainda mais no brasil ou se associaram a empresas brasileiras, de forma a abrir finalmente as portas para o eucalipto.

Como o mundo hoje em dia é muito mais dinâmico que no passado, em poucos anos o Brasil passou a ser o pais com maior volume em exportação de celulose de eucalipto do mundo.

1.1.4 Panorama mundial quanto à produção de celulose

Segundo a GEDF – CD/FIEP (2016), a indústria de celulose é um ramo bastante representativo no âmbito econômico mundial. Isso se deve à alta receita gerada, ao uso de uma avançada tecnologia e por ter grandes impactos em setores econômicos que se encontram antes e depois da cadeia produtiva.

Para Fao (2016), observando a Figura 1 é possível concluir que dez países são considerados os principais produtores de toda a celulose mundial, chegando a 82% da produção em 2015.

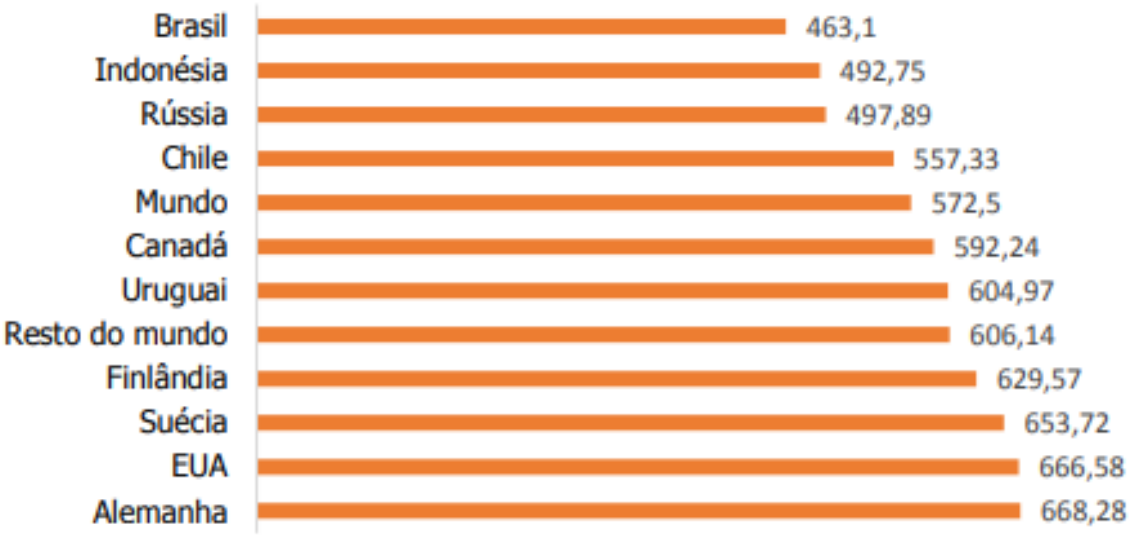
Figura 1: Países com maior produção de Celulose.



Fonte: GEDF-CD/FIEP (2016) a partir dos dados da FAO(2016).

A Figura 2 mostra que dentre os maiores países produtores o Brasil é o que detém o menor valor agregado por tonelada do produto, um valor bem abaixo até da média mundial que chega a US$572,50 por tonelada exportada. A Alemanha detém a celulose de maior custo do mercado (dados de 2016). O valor da celulose é definido de acordo com o mercado internacional, por isso, qualquer variação da moeda americana, instabilidade política de países e mesmo guerras comerciais podem impactar muito no seu valor.

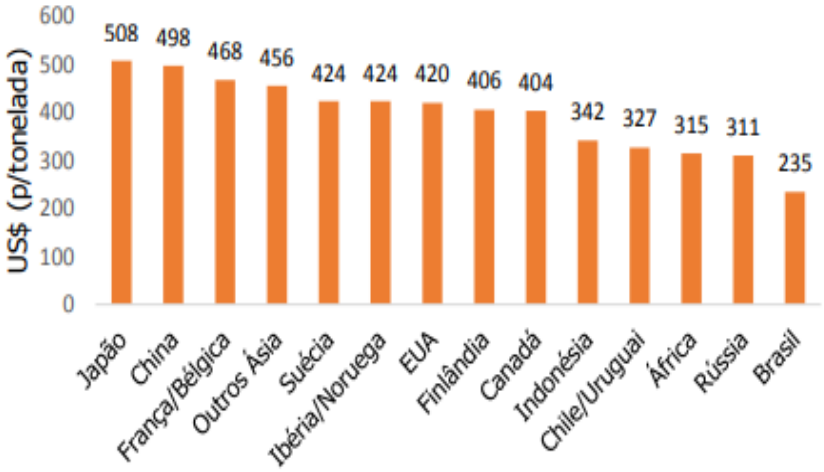
Figura 2: Custo da Celulose.



Fonte: GEDF-CD/FIEP (2016) a partir dos dados da FAO (2016).

O menor valor do produto brasileiro é devido principalmente ao menor custo de produção. Isso ocorre devido ao tipo de solo brasileiro, por ter como matéria prima o Eucalipto, árvore que apresenta excelente desenvolvimento em solos tropicais e, também, devido ao alto investimento em tecnologia de produção e de engenharia genética do eucalipto; isso é possível ser observado na Figura 3, a qual mostra os custos de produção de celulose proveniente de cada país.

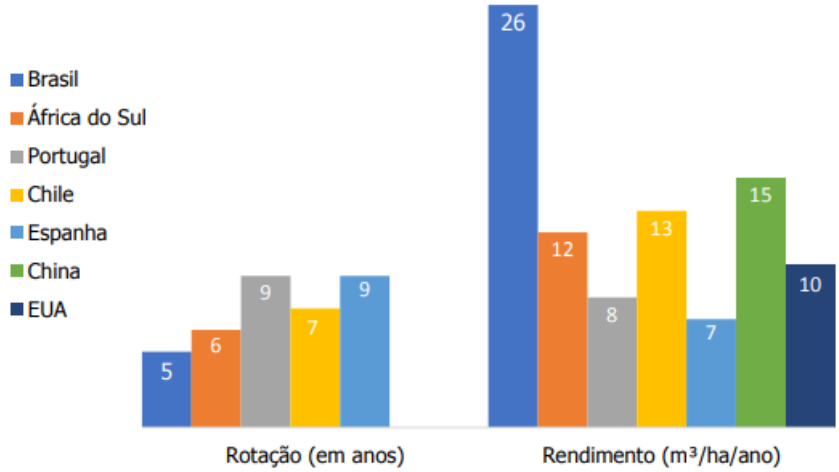
Figura 3: Custo de produção de Celulose.



Fonte: GEDF-CD/FIEP (2016) a partir dos dados da FIBRIA apud DEPEC/BRADESCO (2016).

É possível observar pela Figura 3 o menor custo de produção de celulose do Brasil comparado aos maiores produtores. A partir da Figura 4 é evidenciado o alto rendimento do Eucalipto brasileiro, com relação aos outros países, considerando o tempo de rotação da cultura, de forma que, para produzir 1 milhão de toneladas de celulose no Brasil seria necessária uma área de 93 mil hectares, enquanto esse mesmo volume seria necessário uma área de 480 mil e 200 mil hectares na Escandinávia e na China, respectivamente.

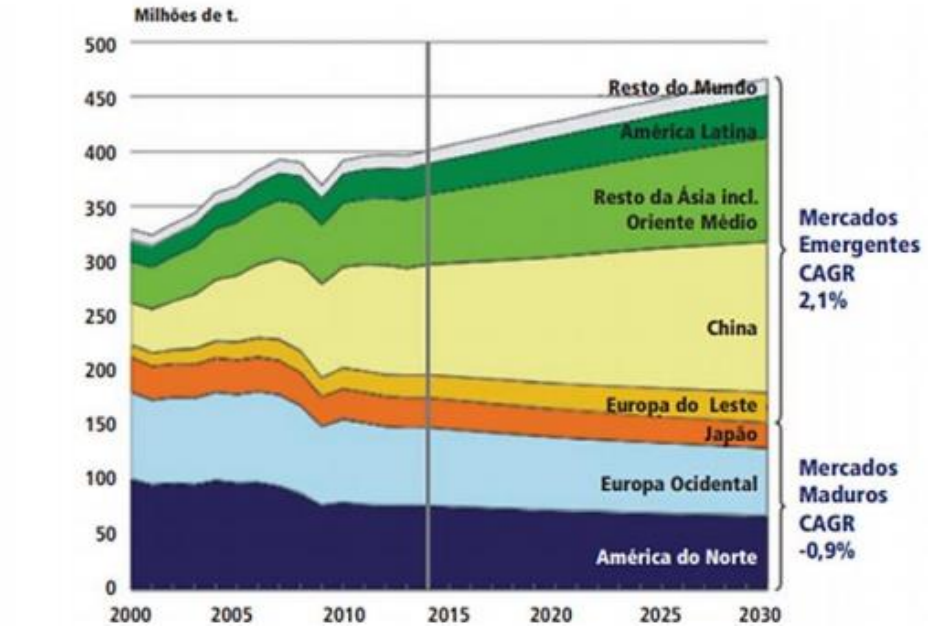
Figura 4: Rendimento de produção.



Fonte: GEDF-CD/FIEP (2016) a partir dos dados da DEPEC/BRADESCO (2016).

Economistas olham o mercado de fibra para papel de forma diferente entre as regiões. Isso ocorre devido às diferenças econômicas entre elas. É possível observar uma tendência de queda de consumo para países desenvolvidos devido, principalmente, ao avanço tecnológico e à demanda de papel impresso. Segundo Poyry (2015), por outro lado, a expectativa perante os países em desenvolvimento é muito positiva, pois o poder aquisitivo das pessoas está maior e com maior demanda por embalagens, papéis e cartões, por exemplo. Esse comportamento é notável na Figura 5:

Figura 5: Projeção de consumo de Celulose.



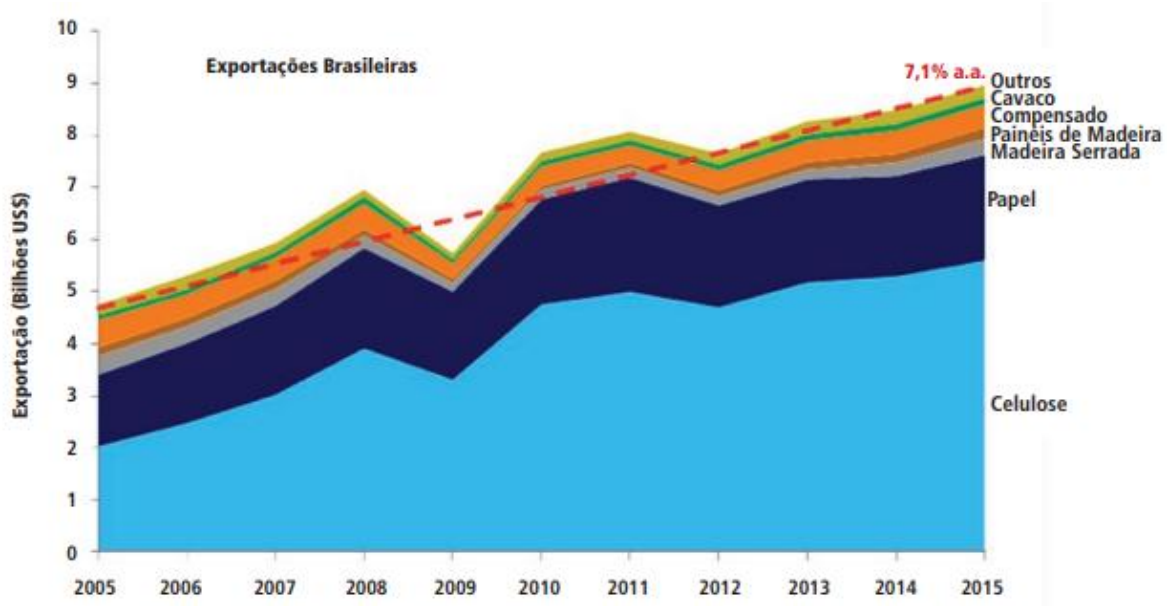
Fonte: Guia ABTCP(2016/2017).

Para Pinzón (2018), a partir do gráfico é possível observar que, até 2030, o mercado terá um aumento de cerca de 1,2%, devido prioritariamente aos países emergentes.

1.1.5 Panorama atual do setor no brasil

Com o passar dos anos o Brasil tem aumentado o seu peso no setor de produção de papel e celulose do mundo. As indústrias mais antigas, estão concentradas principalmente nas regiões Sudeste e Sul devido ao clima tropical favorável ao desenvolvimento das florestas e a mão de obra qualificada para o trabalho. Os novos empreendimentos estão mudando dos grandes centros, como forma de baratear os custos com transportes e em busca de terras mais baratas, se deslocando para as regiões Norte, Nordeste e Centro Oeste. Em 2012 o Brasil já ocupava o posto de quarto maior produtor mundial de celulose e o décimo primeiro maior produtor de papel e papelão, passando para segundo maior produtor de celulose em 2016, mas conseguindo o título de maior produtor mundial de celulose de fibra curta, e oitavo maior produtor de papel no mesmo ano. Isso tudo é consequência de todo o investimentos e avanços que o setor vem passando desde a década de sessenta, no qual fizeram com que o setor crescesse a taxas superiores aos concorrentes de outros países. A Figura 6 mostra o crescimento do volume em preço das exportações de celulose ao longo dos anos.

Figura 6: Volume em preço de exportação de produtos.



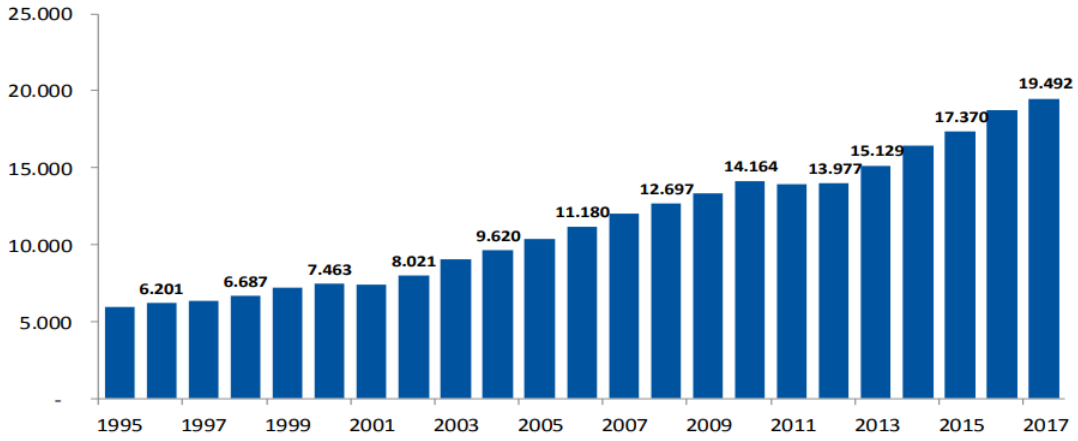
Fonte: Poyry (2016).

Uma característica de grande relevância na produção de celulose no Brasil é o investimento em pesquisas de melhoramento genético do eucalipto com o intuito de transformar a indústria florestal. Pesquisas, tem sida conduzidas, a desenvolver clones e reprogramação genética em busca de características importantes na madeira para a produção de celulose. Além disso, a maior parte da matéria prima utilizada na produção vem de florestas plantadas, respeitando os critérios de preservação ambiental do código florestal brasileiro e, também, faz com que a indústria se destaque perante os competidores internacionais, pois o impacto que o processo produtivo traz aos âmbitos sociais e ambientais é um fator predominante na negociação no mercado global. Grande parte dessas florestas foram plantadas em décadas passadas como forma de abastecer as indústrias siderúrgicas e a produção de carvão, principalmente para as ferrovias; com incentivos do governo a indústria de celulose foi ganhando espaço no mercado, devido ao grande retorno financeiro envolvido e com isso as área plantadas passaram a serem utilizadas como matéria prima.

Ao longo dos anos é possível observar o grande avanço em produção de celulose, praticamente triplicando em um período de 20 anos e quadruplicando as exportações no mesmo tempo.

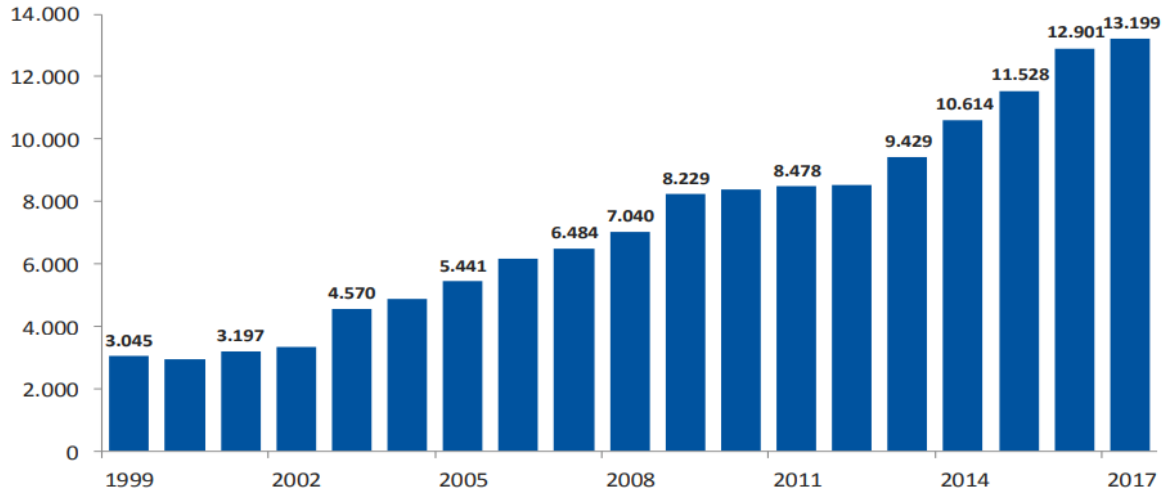
Tudo isso é possível observar nas Figuras 7 e 8.

Figura 7: Volume de produção de celulose (mil toneladas).



Fonte: Ibá, Bradesco (2018).

Figura 8: Volume exportado de celulose (mil toneladas).



Fonte: Ibá, Bradesco (2018).

A maior parte da celulose exportada é destinada a Europa, contudo com o mercado chinês vem sendo destaque nos últimos anos devido ao grande volume de celulose comprada.

1.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CELULOSE

1.2.1 Processo Kraft de produção de celulose de eucalipto

A produção de celulose no Brasil se dá basicamente a partir do processo Kraft; ele tem como principal matéria prima o Eucalipto, contudo, também existem empresas as quais obtém o produto de bagaço de cana de açúcar, bambu, palha da cana de açúcar entre outras matérias primas.

O processo de obtenção da celulose de eucalipto inicia em um laboratório. Grande parte do investimento das empresas se emprega em pesquisas de transgênicos da planta com o intuito de desenvolver uma muda que seja mais resistente a pragas, ao tipo de solo e clima, que apresentem maior produtividade entre outros quesitos que são importantes no ponto de vista das empresas. Todo esse processo de germinação, multiplicação, desenvolvimento, plantio e produção pode durar cerca de 12 anos até que as empresas resolvam investir em uma nova floresta com a nova planta. Esse processo ocorre continuamente durante anos. (PAULA, 2017)

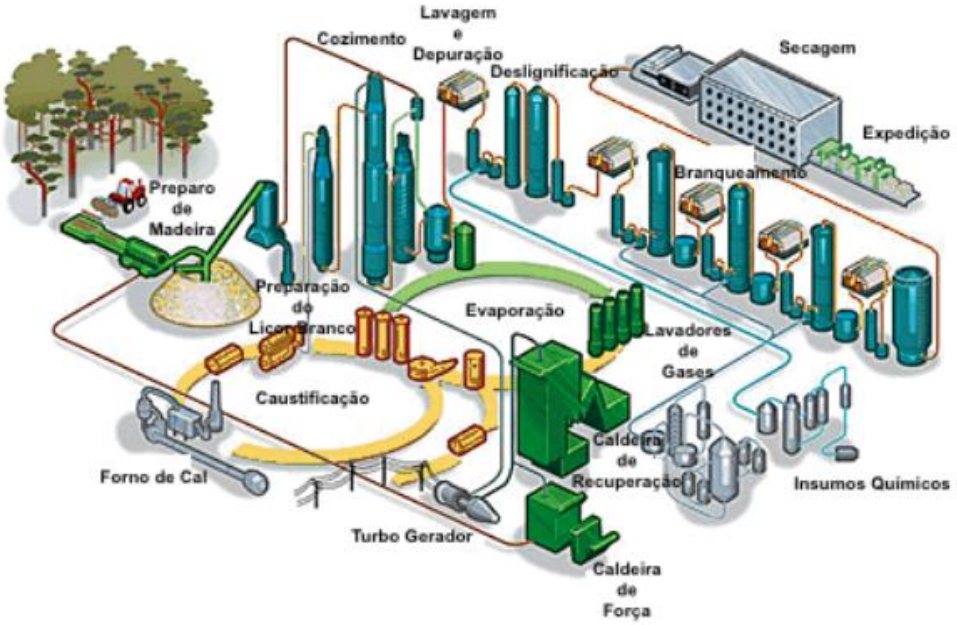
Depois de plantadas, as florestas demoram em média 7 anos para atingirem a idade de corte. O corte pode ocorrer por dois processos, utilizando motosserras, o qual é um processo já pouco utilizado devido principalmente a questões de segurança e ergonômicas e por meio de

máquinas conhecidas como “harvest”, as quais fazem o corte, retiram a casca e cortam o Eucalipto em tamanho menores já especificados para o processo industrial; com isso é possível obter maior agilidade e rendimento na colheita com a mecanização.

Após o corte o eucalipto é levado para a indústria no qual iniciará o processo industrial de produção da celulose. Essa primeira etapa de produção é a que emprega maior valor nos custos de produção de celulose, por isso, é sempre foco de busca por novas tecnologias, investimentos e acompanhamento.

Todo o processo industrial de produção está ilustrado na Figura 9.

Figura 9: Processo industrial de produção de celulose.

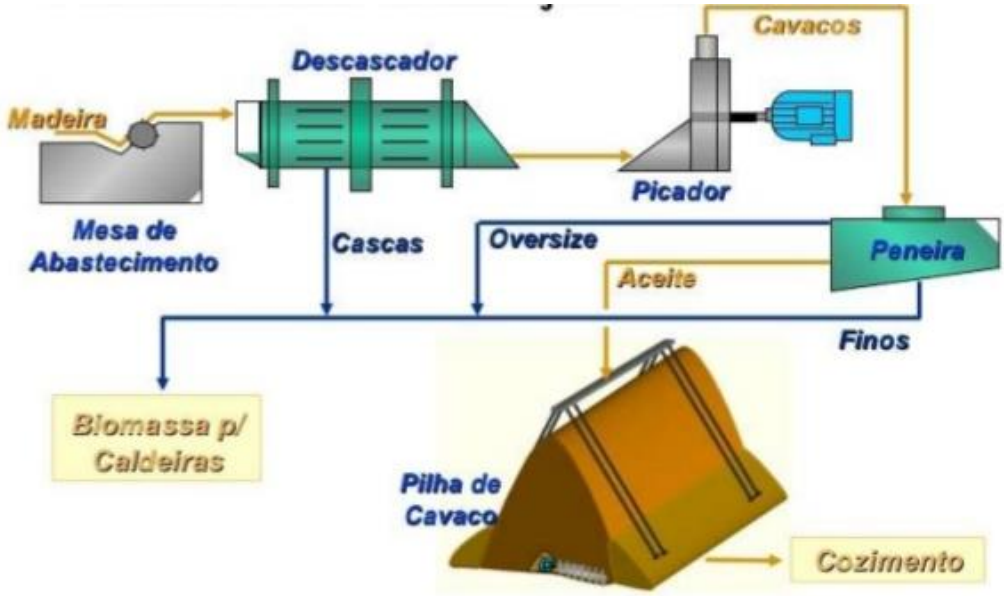


Fonte: Adaptado de Valmet Foward (2017).

O primeiro processo da produção industrial ocorre no pátio de madeira; na chegada do caminhão a madeira passa por um rigoroso processo de inspeção de qualidade e, posteriormente, é direcionada para um depósito. Toda a fábrica tem um pulmão de estoque de madeira de forma a evitar parada da fábrica devido à falta de matéria prima. Em seguida o eucalipto é direcionado para as mesas transportadoras que retiram o excesso de casca; em seguida passam por um processo de lavagem para tirar todo o excesso de areia, que é muito prejudicial para os seguintes processos. Depois de limpa as toras são direcionadas para os picadores, os quais são responsáveis por picar a madeira. Para se obter um melhor rendimento do processo produtivo a madeira picada deve ter um devido tamanho e forma, por isso, após os picadores a madeira passa por peneiras que separam os melhores pedaços e transportam eles para a pilha de cavacos

que são utilizados no processo produtivo. Os pedaços de madeiras rejeitadas pelas peneiras são levados para a pilha de biomassa que, posteriormente, serão queimadas nas caldeiras de biomassa para gerar vapor. A Figura 10 ilustra o processo inicial de preparo do cavaco para a produção de celulose.

Figura 10: Etapa inicial de produção de celulose.



Fonte: Mariano (2015).

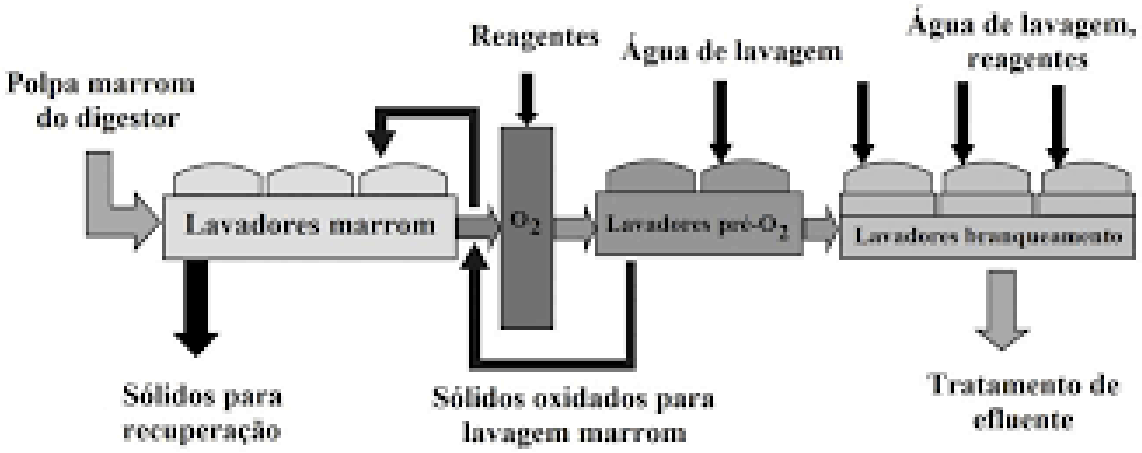
Os cavacos, então, são encaminhados para o digestor, equipamento responsável pelo cozimento da madeira, onde irão se misturar basicamente com hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (NaF2), na proporção aproximada de 5:1. Segundo Paula (2017), isso é o que caracteriza o processo Kraft de produção de celulose.

O processo de produção no digestor é dado pela mistura de cavaco com os químicos do cozimento pressurizado a alta temperatura. A madeira é basicamente composta por fibras, as quais estão ligadas estruturalmente pelo composto orgânico lignina, como exemplo, é possível pensar em uma construção, as quais os tijolos são as fibras e a lignina é o concreto que sustenta a estrutura. Dentro do digestor existem estágios pelo qual a mistura vai passando, com diferentes temperaturas e pressão para, com isso, ir extraindo a lignina presente entre as fibras, até chegar na descarga do digestor a massa celulósica, na qual a madeira já está em quase sua totalidade degradada formando a massa marrom composta apenas por fibras. A lignina extraída no processo inicial forma o licor Negro, que é um resíduo proveniente do cozimento da madeira com os químicos. Esse licor negro é um composto altamente toxico ao meio ambiente, devido

as reações dos químicos de cozimento com a madeira e por, esse motivo, ele não pode ser descartado para o meio ambiente. Como consequência disso a maior parte do licor é enviado para o processo de recuperação química, para recuperar os químicos do cozimento, e uma pequena parcela volta para o digestor para auxiliar no cozimento. O controle de qualidade aplicado sobre a polpa resultante do digestor é analisado por duas variáveis, número kappa e viscosidade. O número kappa está diretamente relacionado com o teor de lignina restante na polpa, ou seja, quanto maior o valor de kappa maior é o teor de lignina e, com isso, mais intenso deverá ser o processo de branqueamento, pois a lignina dá uma característica escura à polpa. Já a viscosidade da polpa está relacionada com o teor de celulose presente, ou seja quanto maior a viscosidade, maior o teor de celulose. Resumidamente, a busca das empresas é por um menor valor de kappa na polpa e um maior valor de viscosidade.

Resultante na descarga do digestor a polpa marrom, polpa celulósica com coloração escura devido a resquícios de lignina e madeira, é submetida a um processo de depuração no qual é responsável por retirar o resquícios de madeira e areia que passaram pelo processo de cozimento. Logo em seguida inicia-se o pré branqueamento da celulose, no qual a polpa marrom é lavada, basicamente com o filtrado extraído da própria polpa proveniente do sistema de prensas, e submetida a um processo de deslignificação por meio da ações de oxigênio gasoso e outros químicos, no final desta etapa tem – se removido grande parte da lignina presente na madeira. Seguindo o fluxo, a polpa segue agora para o processo de branqueamento. Esta é a etapa principal para o branqueamento da polpa; ela é feita a partir de uma sequência de lavagens, aplicação de produtos químicos (agentes redutores e agentes oxidantes) e filtração ou prensagem da polpa, de forma a se conseguir uma celulose branca. Os agentes redutores reduzem os grupos cromóforos de lignina presente na polpa, sem degradar a mesma, agindo somente sobre o aspecto de cor, já os agentes oxidantes tem o mesmo papel dos redutores, contudo oxidam os grupos cromóforos presentes na polpa, degradando a celulose de forma a danificar a qualidade dela, porém são elementos mais baratos quando comparados aos agentes redutores, por isso são muito utilizados nas indústrias. O controle de qualidade da polpa recebida ao final desse processo é dado pela variável alvura. A alvura (alvura é a capacidade de se conseguir uma fibra em seu estado natural, ou seja, livre de lignina e com pouca degradação) mede, basicamente, a porcentagem refletida de luz ao incidir um feixe sobre uma superfície celulósica, ou seja, o que se deseja no final de um processo de branqueamento é um maior valor de alvura. A Figura 11 ilustra o processo de branqueamento da celulose.

Figura 11: Processo de branqueamento da celulose.



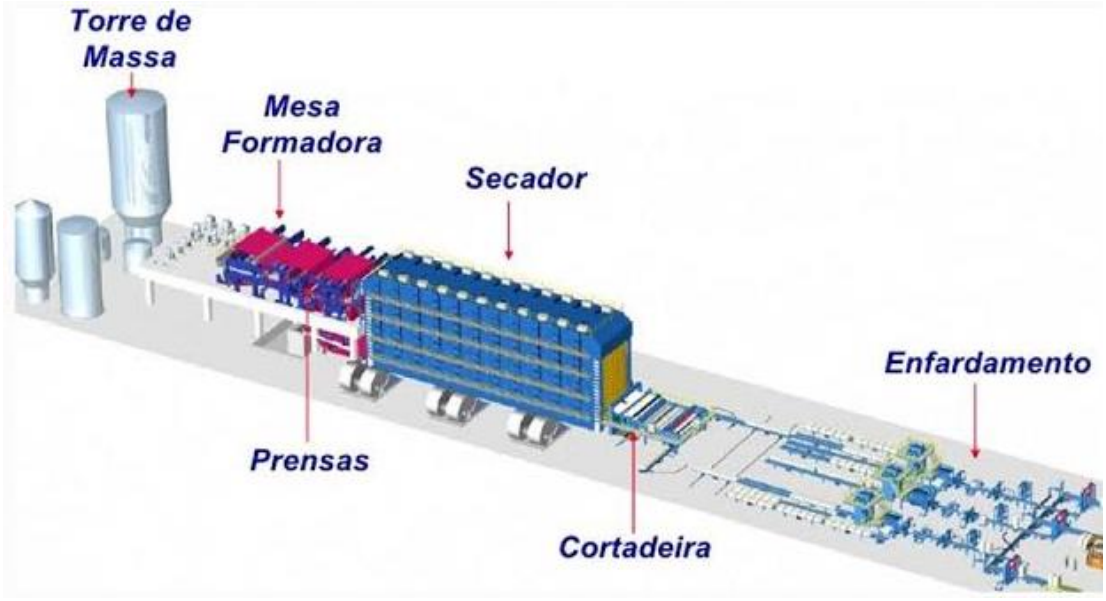
Fonte: Colodette; Martino (2012).

Por fim a polpa celulósica obtida no final do processo de branqueamento é enviada ao setor de secagem, como mostra a Figura 12, e formação da folha de celulose. O último processo tem como principal objetivo a retirada de água da polpa e a formação de uma celulose de qualidade. Inicialmente a massa passa por mais um processo de depuração que tem como objetivo tirar as possíveis contaminações vindas do processo de produção, em seguida a massa passa pela mesa desaguadora, na qual a folha começa a tomar forma e perder o excesso de água; na entrada da mesa a massa tem, em média, uma consistência de 90% de água, ao longo da mesa a massa chega a perder 20% de água, chegando a uma consistência de 30% no final. Por último a folha entra na máquina de secagem. Dentro da secadora a folha dá várias voltas podendo chegar a mais de um quilometro de comprimento, o processo de secagem é realizado pela adição de vapor no sistema que fazem com que se evapore o excesso de água da folha. No final do processo de secagem a folha atinge uma consistência de 90% de massa, ou seja, apenas 10% de água. Depois de seca a folha passa pelo processo de corte embalo e está pronta para ser transportada.

O controle da qualidade da celulose depende muito de todo o processo pelo qual a polpa passa desde o pré branqueamento, com isso, as indústrias na atualidade produzem diferentes tipos de produtos (celulose), no qual, cada produto tem uma particularidade em comparação com outros de forma a se chegar em uma maior ou menos alvura, sujidade entre outros.

O que difere a produção de papel para a produção de celulose é o último processo, a secagem. Basicamente, a diferença é dada pelo tipo de layout e tipo de máquina utilizada no processo de secagem e o processo de produção de papel contempla ainda uma outra etapa de adição de químicos, por exemplo, tintas que não são contempladas no processo de celulose.

Figura 12: Processo de secagem da celulose.



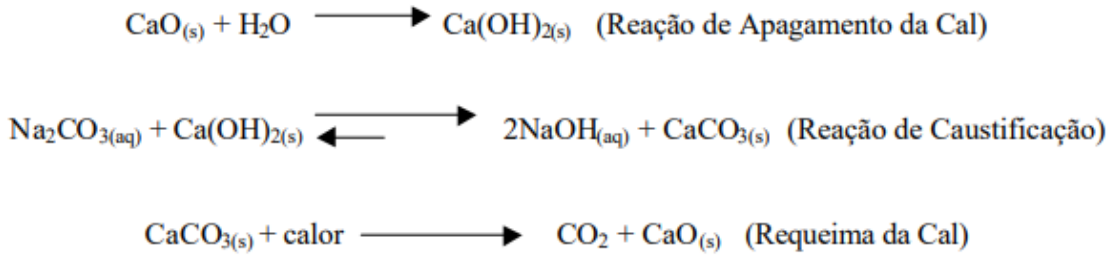
Fonte Slide Player, Mariano (2013).

Contudo, o processo de produção de celulose tem outras particularidades importantes, por exemplo, o processo de recuperação química. Uma indústria de celulose só é ambientalmente possível de existir devido a esse processo. O licor negro proveniente do processo de cozimento da madeira é altamente tóxico para o meio ambiente. Ele é composto basicamente de lignina, contudo os químicos utilizados no cozimento da madeira se misturam com a lignina tornado o licor ainda mais danoso. A alternativa encontrada pelas indústrias para destinar esse licor é utilizando ele como combustível para as caldeiras de recuperação química. Para que isso ocorra o licor é submetido a um processo de evaporação, isso porque o licor deixa a fase de cozimento com um teor de 15% de sólidos e 85% de água, e para poder ser queimado nas caldeiras o teor de sólidos deve chegar a cerca de 80%. O processo de evaporação é dado por vários estágios por meio de troca de calor, utilizando vapor vivo apenas no último estágio, nos primeiros estágios o vapor utilizado é o proveniente da própria evaporação do licor. Cada estágio se encontra a uma temperatura e pressão diferente, também é utilizado o vácuo para abaixar a temperatura de ebulição da água para tornar a evaporação mais efetiva utilizando menos energia. É importante observar que o condensado proveniente do estágio de troca com vapor vivo é recuperado e utilizado como água de alimentação das caldeiras novamente, já o condensado proveniente do vapor extraído do licor é considerado um condensado contaminado devido ao grande volume de gases dissolvidos neles, com isso parte desse condensado é utilizado no processo de branqueamento para lavagem da polpa como forma de recuperação de álcali no

processo, mas a maior parte dele é enviado para ser tratado na estação de tratamento de esgoto. Desse processo também são gerados alguns gases não condensáveis que são encaminhados para a queima também nas caldeiras de recuperação.

Atingindo o teor de 80% de sólidos o licor é enviando para as caldeiras de recuperação química para gerar vapor. Na fornalha a parte orgânica presente no licor negro é queimado, contudo a parte inorgânica forma o licor verde bruto. O licor verde bruto é constituído basicamente por Na2S e Na2CO3 e sólidos provenientes da má combustão na caldeira, por isso esse licor passa por um sistema de filtração para a retirada dos dregs (sólidos provenientes da má combustão). Depois de filtrado o licor verde clarificado vai para a etapa de caustificação. A etapa de caustificação o licor é reagido com óxido de calcio (CaOH2), como resultado da reação química proveniente desse processo há a formação de Na2S, NaOH e CaCO3. O CaCO3 (lama de cal) é um compostos sólido e por isso ele precipita enquanto os outros químicos dão a formação do licor branco que retornará no início do processo e será utilizado novamente no processo de cozimento da madeira. A lama de cal é enviada para o forno de cal no qual será queimada a altas temperaturas formando o CaO (Cal) e o CO2 (Gás carbônico), a cal é enviada para o silo de cal que posteriormente será hidratada novamente para a formação de oxido de cálcio para ser reutilizado no processo de caustificação, já o CO2 é encaminhado para o processo de branqueamento. Todas as reações estão resumidas na Figura 13.

Figura 13: Reações químicas do processo de recuperação química.

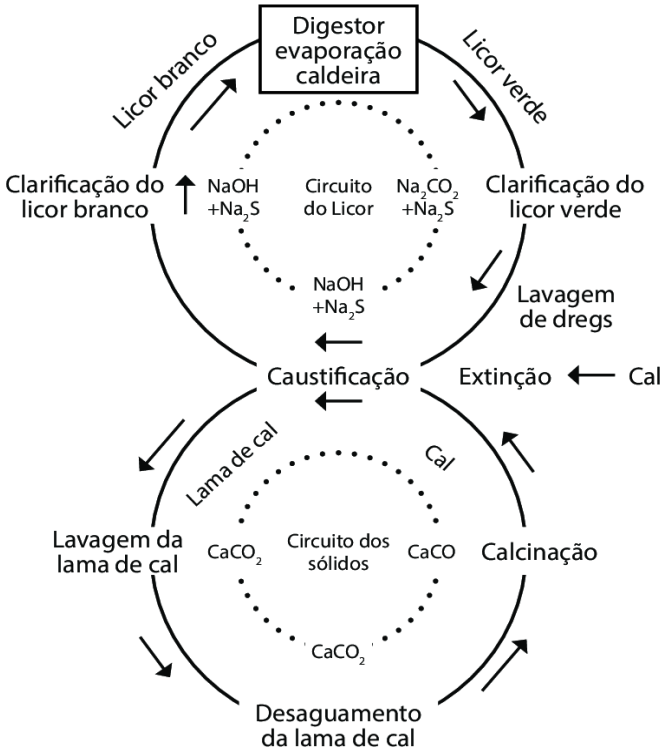


Fonte: Junior (2015).

O ciclo de recuperação química, portanto, é um ciclo fechado; isso é possível observar pela Figura 14, na qual as reações químicas possibilitam a recuperação de todos os químicos utilizados no processo de produção de celulose. Perdas durante o processo é o grande vilão das empresas, pois com isso são realizados makeup adição de químicos, ou seja, adição de químicos de fora no processo fazendo com que o preço de produção suba muito. Essas perdas podem

ocorrer por meio de vazamentos, arrastes, evaporação, instabilidade do processo, abertura de circuitos, entre outros. A variável que mede a perda de químicos é o álcali, toda a perda do sistema é dados pela perda alcalina e cada indústria tem seu valor de álcali base para a produção.

Figura 14: Ciclo de licores do processo de produção.



Fonte: Junior (2015).

Uma terceira área do processo produtivo de celulose é conhecida por utilidades. A área de utilidades é responsável por todos os parâmetros necessários para que uma indústria continue produzindo, sendo eles o tratamento de água para o processo industrial e o tratamento de água para caldeiras, todo o processo de geração de vapor e distribuição de vapor, a geração de energia e controle das turbinas, sistema de ar comprimido, sistema de torres de resfriamento e por último o processo de tratamento de efluentes geral da fábrica.

A água industrial em grande maioria é captada de rios, com isso ela é submetida a processos químicos e mecânicos para garantir a pureza dele e, também, para se conseguir a turbidez desejada menor de 1 NTU para ser utilizada no processo industrial. Já o volume de água disponibilizado para a produção de vapor nas caldeiras é submetido a um processo ainda mais complexo de purificação, de forma a obter uma água desmineralizada ela é submetida em grande parte dos casos a ultra filtrações por vasos pressurizados de areia e carvão, meio de

bancos de osmose reversa e vasos com trocas iônicas para retirada de sais dissolvidos na água. Além disso químicos são adicionados no processo e antes de ser enviados para caldeiras são submetidas ao desaerador que tem a função de retirar gases dissolvidos nessa água. Todo esse tratamento é dado como forma de proteger as caldeiras, para evitar incrustações e danos nas tubulações das caldeiras e também para que o vapor não arraste sais, principalmente de sílica, para as turbinas que podem danificar as pás do equipamento.

Além das caldeiras de recuperação química as indústrias de celulose contam com as caldeiras de biomassa, nelas são utilizadas as cascas vindas do processo inicial do processo industrial de produção. Todo o vapor gerado pelas caldeiras de recuperação mais o vapor produzido pela caldeira de biomassa se somam e são levados para o processo de geração de energia. Todo o vapor é submetido aos turbos geradores que acionam os geradores elétricos responsáveis pela geração de energia, com isso a grande maioria das fábricas conseguem ser autossustentáveis energeticamente e ainda buscam a venda de energia para o sistema nacional brasileiro.

A estação de tratamento de esgoto é uma das áreas mais críticas da indústria, pois ela tem como objetivo principal devolver ao leito pluvial um esgoto que não seja tóxico e que não seja danoso ao meio ambiente. Como parâmetro principal de controle da qualidade do efluente temos os sólidos decantáveis e a demanda biológica de oxigênio do efluente tratado. Os sólidos do efluente é medido com o auxílio de um cone com o volume de 1 litro, no qual é colocado o volume de um litro de efluente tratado e se espera 1 hora até que os sólidos decantem, o valor máximo ambientalmente que se pode ter de sólidos é de 1ml/l de efluente. Já a demanda biológica de oxigênio é medida com o auxílio de análises de laboratório, a análise consiste basicamente em medir a quantidade de oxigênio dissolvido em uma amostra de efluente, deixar esse efluente descansar a uma certa temperatura por cinco dias e depois medir novamente a quantidade de oxigênio dissolvido, essa diferença é a demanda biológica de oxigênio, ou seja, o quanto de oxigênio que foi utilizado pelos microrganismos presentes no efluente, esse limite de DBO varia para cada unidade industrial.

1.2.2 Caracterização da fábrica de Jacareí

A unidade industrial instalada no vale do paraíba, mais especificamente na cidade de Jacareí, é uma unidade restrita a produção de celulose apenas. Com toda a sua produção voltada para a exportação, a unidade contempla uma estação de ferroviária que é responsável por cerca

de 80% do escoamento da produção da unidade. Com uma produção recorde de 1.100.000 toneladas de celulose por ano a unidade industrial contempla duas linhas de produção.

Todo o processo inicial de cozimento é realizado por apenas um digestor, com capacidade de processamento de 3.300 toneladas por dia, todas essa produção é dividida para as duas linhas de produção, sendo a linha menor (linha B) com capacidade de processamento de 1.100 toneladas por dia e a linha maior (linha C) de 2.200 toneladas por dia. As linhas existentes enviam separadamente sua massa processada para a sua máquina de secagem especifica, sendo elas com a mesma capacidade de processamento da sua linha específica.

O processo de recuperação química também contempla duas linhas de produção, ou seja, a linha menor (evaporação III) com um processo de evaporação com capacidade de processamento de 8500 litros de licor por minuto, evaporando 350m³/h de água e a linha maior (evaporação IV) processando 12.000 litros de licor por minuto, evaporando 550m³/h de água. Seguindo o processo a caldeira de recuperação menor (caldeira de recuperação III) tem a capacidade de processar 80tss de licor gerando até 300 toneladas por hora de vapor a pressão de 88kgf/cm², além disso existe a possibilidade de queima de óleo como combustível auxiliar, já a caldeira maior (caldeira de recuperação IV) pode processar até 120 tss de licor gerando até 420 toneladas por hora de vapor a uma pressão de 88kgf/cm², podendo também queimar gás natural como combustível auxiliar. Além desses combustíveis também há a opção de queimar gases provenientes do processo produtivos. Composto por duas linhas também de caustificação com capacidade de processamento de licor verde, para recuperar o hidróxido de sódio e o sulfeto para serem utilizados no cozimento da madeira, de 4000 litros por minuto pela linha maior e 2000 litros por minutos pela linha menor. O ciclo é formado também por dois fornos de cal capazes de processar 420 toneladas de cal por dia, cada um dos fornos, como combustível dos fornos é utilizado o gás natural e também metanol proveniente do processo de evaporação.

A área de utilidades conta com uma capacidade de captação de água de 4.500m³/h passando por um processo de decantação para purificação da água. O que foi tratado inicialmente na ETA parte dela é utilizada pelo processo e a outra parte é encaminhada para o processo de água para alimentação das caldeiras. A área conta com dois processos de pré tratamento de água para as caldeiras, no qual são equipadas com oito filtros pressurizados de areia e pedra e mais nove filtros pressurizados de carvão ativado, esse processo é de suma importância para controle do cloro ativo presenta na e dos sólidos dissolvidos que não foram totalmente retirados pelo processo inicial de tratamento de água. Posterior ao pré tratamento a unidade contempla duas unidades de filtração por osmose reversa, sendo a primeira unidade com 6 bancos de osmose com dois estágios de ultrafiltração e uma segunda unidade com sete

bancos de osmose também com dois estágios de ultrafiltração. Cada banco de osmose pode processar até 67m³/h de água, sendo que 50m³/h é de permeado e os outros 17m³/h é de rejeito que é enviado como makeup nas torres de resfriamento. Posterior aos bancos de osmose o permeado é encaminhado para os vasos de desmineralização, no qual, a partir de troca iônica é retirado todos os íons dissolvidos na água, de forma a se conseguir uma concentração máxima de 20ppb de íons de sílica na água. A linha menor contempla três vasos de desmineralização com capacidade de processamento de 120m³/h de água, já a linha possui três vasos de desmineralização que podem processar até 160m³/h de água. Toda essa água processada é encaminhada para dois desaeradores, no qual, vão se misturar com condensado limpo, vindo do processo, e vapor até atingir uma temperatura de 110°C. O desaerador 1 alimenta ao mesmo tempo três caldeiras, sendo elas a caldeira de biomassa, a caldeira a gás e a caldeira de recuperação III, já o desaerador 2 alimenta duas caldeiras, a caldeira de recuperação química IV e a caldeira de cogeração.

Fora isso a área de utilidades cuida de todo o processo de geração de vapor. Acompanha o processo de geração de vapor de três caldeiras, sendo elas a caldeira de biomassa com capacidade de processamento de 18 toneladas de madeira por hora e também tendo a opção de gás natural como combustível auxiliar do processo podendo queimar até 2500 Nm³/h de gás, podendo gerar nominal até 70 toneladas de vapor por horas a uma pressão de 45 kgf/cm². Uma segunda caldeira que tem apenas o gás natural como combustível do processo com capacidade de geração de 80 toneladas horas de vapor a uma pressão de 88kgf/cm² podendo queimar até 6000 Nm³/h de gás natural e por último uma caldeira que utiliza como combustível gases proveniente do processo de geração de energia de uma turbina a gás em ciclo combinado, mas que também tem a opção de queimar gás natural como combustível auxiliar do processo, com capacidade de geração de vapor de 60 toneladas por hora a uma pressão de 88kgf/cm².

Todo o vapor gerado pelas caldeiras são enviados para dois coletores de vapor, em ciclo combinado, a 88kgf/cm² de pressão e um coletor de 45kgf/cm² de vapor que recebe o vapor da caldeira de biomassa. Todo esse vapor é encaminhado para os turbos geradores do parque que abastecem o parque industrial.

A matriz energética da unidade é composta por 3 turbo geradores a vapor, capazes de processar todo o vapor produzido pelas caldeiras. Os turbos admitem o vapor provenientes das caldeiras a 88kgf/cm² e 450°C, todos eles contêm um ponto de extração com uma pressão de 13,5kgf/cm² a 250°C e a contrapressão a 4,6kgf/cm² a 170°C. Um dos turbos geradores tem uma tomada de admissão de vapor a 45kgf/cm², vapor proveniente da caldeira de menor pressão, mas geralmente esse vapor é utilizado como sopragem de fuligem das caldeiras de recuperação

química devido à alta produção de fuligem. Além dos turbos geradores o parque é composto por redutoras instaladas nas linhas como forma de proteção do sistema e também por blowout no ramal de baixa pressão também como proteção. Devido ao fato do parque ser composto apenas por turbinas de contrapressão o sistema contempla um condensador de balanço como forma de recuperar o vapor gerado excedente e com isso evitar o uso de blowout, com uma capacidade de processamento de 80 t/h de vapor. Além desses equipamentos a malha de distribuição de vapor conta com redutoras de vapor que reduzem a pressão de vapor de 88kgf/cm² para 13 kgf/cm², 45 kgf/cm² para 13 kgf/cm² e para 4,6 kgf/cm²e 13 kgf/cm² para 4,6 kgf/cm², esse processo é importante para absorver as demandas de vapor da fábrica, quando os turbos geradores não conseguem mais variar sua produção de vapor de média e baixa pressão.

No ponto de vista de geração de energia elétrica a indústria é composta por geradores trifásicos acoplados as turbinas a vapor e também a turbina a gás. O gerador do turbogerador a vapor 1 tem capacidade de geração de 25MW de energia elétrica, o gerador do turbogerador a vapor 2 gera 38MW de energia elétrica, para o gerador da turbina a vapor 3 com uma produção nominal de 44MW de energia elétrica e um gerador acoplado a turbina a gás com capacidade de geração nominal de 31MW de energia, mas que devido as condições de altitude e localidade da fábrica gera apenas 26MW. Toda a energia gerada pelos geradores é distribuída ao barramento da fábrica a uma tensão de 13,5kV e 60Hz, as áreas produtivas são distribuídas pelos barramentos de acordo com as necessidades e do balanço de energia. A fábrica tem uma particularidade que é um barramento extra que interliga todos os outros, com isso a rede passa a ser um circuito no qual a corrente excedente em uma barra pode ir para outras e vice-versa. Quando a fábrica não tem autossuficiência de geração de energia ela tem a opção de compra de energia da concessionária por meio de duas linhas de transmissão, essa energia comprada chega a 88kV e 60Hz por isso a indústria dispõe de transformadores para correção da tensão para 13,5kV. Além disso o parque conta com sistema de banco de capacitores para correção do fator de potência da rede, principalmente para evitar a geração de energia reativa dos geradores e diminuir os danos aos equipamentos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A busca pela maximização energética das plantas industriais com o intuito de se tornarem autossuficientes em energia, pensando até na comercialização do excedente, vem ganhando bastante destaques ao longo dos anos. O governo criou um programa de incentivo as fontes alternativas de geração de energia elétrica (POINFA), o qual, tem o objetivo de aumentar a quantidade de energia elétrica disposta na rede nacional, vinda de fontes alternativas de energia.

Isso tudo culminou na ampliação da capacidade de geração das industrias, realizada pelas unidades industriais, principalmente aquelas que utilizam combustíveis renováveis como fonte de energia, por exemplo, biomassa e gás natural de cogeração.

Devido a este fato, é possível encontrar inúmeros estudos de otimização de eficiência elétrica, estudos de ciclos de cogeração, controle de consumo específicos para maior geração de energia. Como base de estudo para o desenvolvimento do trabalho pode ser citado os trabalhos:

Nayssa (2016) realizou um estudo em uma indústria de celulose do Paraná, em seu trabalho realizou o cálculo de rendimentos de geração de vapor da caldeira de recuperação química e a caldeira de força por meio de balanço energético das caldeiras, considerando as perdas do sistema por meio dos gases de exaustão, cinzas provenientes da queima e perdas por linhas. Além disso realizou um projeto das linhas de distribuição de vapor da fábrica e fez uma análise do excesso de ar de queima das caldeiras. Como conclusão de projeto foi considerado que um melhor gerenciamento de geração e distribuição de vapor seria essencial para um bom desempenho da indústria, controlando melhor a temperatura dos gases da chaminé, redução do excesso de ar de queima, realizar uma grande manutenção em vazamentos e tubulações do sistema de distribuição de vapor. Todos essas ações impactam positivamente na geração de energia elétrica pelos turbos geradores.

Lideir (2000) coloca em seu trabalho foco no aproveitamento devido de combustíveis como forma de maior rendimento de geração de energia, aplicando principalmente em processos de cogeração industrial. O seu estudo prático ocorre em uma industrial de papel e celulose, no qual, são simulados diferentes ciclos combinados de turbinas a vapor e a gás e os parâmetros de comparação são os custos de investimento, disponibilidade de energia, questões ambientais e de incentivos de combustíveis. Além disso é demonstrado uma conclusão do setor energético brasileiro, no qual, a partir do estudo prático é observado o potencial de utilização da cogeração como grande alternativa de investimento pelo pais, a grande flexibilidade de combustíveis obtendo grande rendimento global e reduzindo impactos ambientais. No estudo

de caso é simulado um ciclo combinado, no qual, é montado o ciclo de distribuição de vapor, comparando a energia do vapor gerado pelas caldeiras, de acordo com a pressão e temperatura, com a energia que se consegue gerar nas turbinas a vapor, menos a energia gasta pelas bombas de alimentação. É possível observar com a análise uma diferença de 37 MW de energia que podem ser atribuídas a perdas pelo processo, perdas na distribuição de vapor e também a problemas com máquinas, toda essa análise é realizada por meia da primeira lei da termodinâmica.

Marcelo (2004) realizou uma análise de eficiência energética e exergética de uma indústria de cana de açúcar que estava expandindo o sistema de cogeração de energia. No trabalho é avaliado cinco cenários diferentes de um projeto de expansão do sistema elétrico de uma unidade industrial. Os cenários vão desde turbinas de baixa pressão até turbinas de altas pressão com extração e condensação. Por meio da primeira e segunda lei da termodinâmica foi possível avaliar a eficiência de geração e distribuição de energia e calor para cada um dos equipamentos presentes em cada cenário. Além disso, também foram levados em conta indicadores como, específico de produção de vapor por tonelada de cana e específico de vapor de turbinas. Os projetos estudados seguem um detalhamento importante pois o estudo se trata de uma simulação aplicável a industrial, no qual, o melhor cenário pode vir a ser o escolhido como o investido pela empresa. Como conclusão do estudo foi possível notar que o cenário mais simples, turbina e caldeiras de baixa pressão, é o caso no qual se observa o menor rendimento do sistema, já o caso mais moderno de turbina de condensação e caldeiras de alta pressão realmente apresentam melhores rendimentos que todos os outros casos de turbinas de contra pressão e de estágio simples.

3 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal realizar uma análise energética, através da primeira lei da termodinâmica, de um ciclo de utilidades existente em uma unidade industrial de celulose, a qual estava passando por diferentes cenários de produção devido à demanda do mercado.

Propõe – se avaliar o desempenho do sistema de geração de vapor e energia já existente na unidade, levando em consideração dois cenários de estudos. O primeiro cenário é caracterizado pela produção plena da fábrica, no qual todos os parâmetros de processos estão próximos ao seu patamar de projeto máximo, já o segundo cenário estudado é o que conta com uma redução de produção da unidade, de forma que, todos os parâmetros de processo passam a trabalhar em patamares inferiores do que o de projeto, ou seja, com uma produção de aproximadamente 65% da capacidade. Com isso, realizar um comparativo de eficiência dos turbos geradores e energia fornecida pelas caldeiras ao processo, operando em nesses diferentes patamares.

Além disso, será analisado um terceiro caso, no qual a unidade passou o período de análise com a produção sobre patamares de 65% da sua capacidade, contudo, diferentemente do caso 2 a equipe de processo levantou, como oportunidade de melhoria de indicadores de processo, sendo ele o consumo especifico de vapor para geração de energia, a parada de um turbogerador, dessa forma será avaliado os resultados dessa ação comparando aos resultados obtidos no caso 2.

Adicionalmente serão comparados os rendimento de cada turbina para cada um dos casos e, também, será observado a diferença de geração elétrica de energia, proveniente de uma turbina a gás e outras a vapor, como reflexo da variação do patamar de produção da unidade, por último será analisado a produtividade para cada caso e também o consumo específico de energia por tonelada de celulose produzida.

4 DEFINIÇÕES E CONCEITOS ENVOLVIDOS

O sistema de geração de energia de uma unidade industrial de celulose é baseado principalmente no ciclo Rankine, existem unidades que contam com turbina a gás no parque, de forma a trabalhar também com ciclo Bryton, como é o caso da unidade estudada.

Toda a energia a vapor gerada é utilizada como fonte de geração de energia elétrica em turbinas o qual posteriormente será utilizado pelo processo. Este sistema pode vir a operar com dois princípios, paridade térmica ou paridade elétrica.

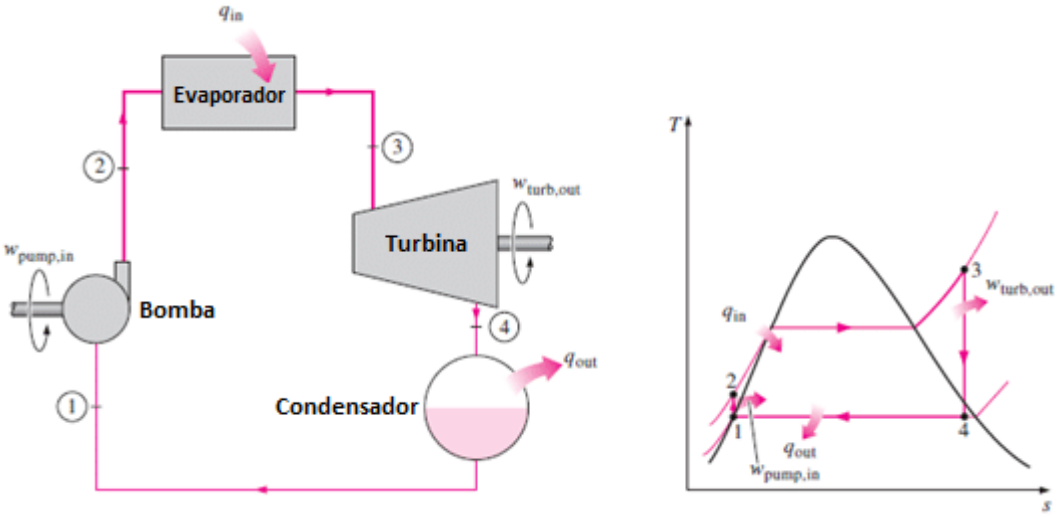
Paridade térmica tem como característica garantir o suprimento de energia térmica para o processo produtivo, variando a geração de vapor das caldeiras de acordo com a demanda do processo. Por outro lado, a paridade elétrica leva em consideração a demanda de energia da indústria, ou seja, a quantidade de energia elétrica consumida pelas áreas produtivas. Empresas muitas vezes mudam de estratégia de acordo com o cenário de mercado do momento, por exemplo, para empresas que contam com um custo de geração de vapor mais alto, pois utilizam combustíveis com maior valor agregado. Quando a energia elétrica está com um custo muito baixo e para industrias que não contam com turbinas de condensação normalmente trabalham em paridade térmica, porém para industrias que contam com turbinas de condensação no parque, que contém baixo custo com geração de vapor e quando o custo da energia está muito alto é preferível trabalhar com paridade elétrica de forma a garantir a demanda da fábrica e havendo a possibilidade exportar energia para a rede nacional.

Como consequência dessas ações é possível concluir que, quando a unidade opera em paridade térmica normalmente terá como consequência a necessidade de compra de energia extra da rede externa, já quando opera em paridade elétrica o objetivo principal é a venda de energia excedente para a rede externa com isso a geração de energia térmica seria acima da demanda da fábrica.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO CICLO RANKINE

O ciclo Rankine é considerado o ciclo ideal, aplicado a um sistema de cogeração de energia. A Figura 15 mostra como é representado um ciclo de cogeração típica de uma indústria.

Figura 15: ciclo Rankine com superaquecimento.



Fonte: Luiz;Cengel; Boles, 2006, Adaptado

O ciclo Rankine é caracterizado por dois processos isobáricos, a pressão constante, e dois processos isentrópicos, sem variação de entropia. O caminho de processo 1 para 2 é representado pelo bombeamento da água de alimentação da caldeira, tem como característica um processo isentrópico no qual fornece trabalho para o fluido e não fornece ou gera calor. O caminho de 2 para 3 é o responsável por elevar a temperatura do fluído até o superaquecimento, em caldeiras que contem superaquecido, por meio de um processo isobárico transmitindo energia para o fluido na forma de calor sem gerar trabalho. O fluido superaquecido é enviado para uma turbina, 3 para 4, na qual sofrerá um processo de expansão por meio de um processo isentrópico, sem geração de calor, trazendo o fluido para uma zona de saturação. Por último o condensador tem o papel de consumir a energia restante de 4 para 1, para aproveitamento no processo por exemplo, fornecendo um fluido de menor energia, por meio de um processo isobárico de com perda de energia na forma de calor, para ser bombeado pela bomba e continuar o ciclo.

O dado ciclo fornece um rendimento de 40%, Neves (2017), considerando todo o processo em condições ideias. O cálculo do rendimento é dados pelas equações 1.0 e 2.0:

$$\eta = \frac{\dot{W}_{liq}}{\dot{Q}_h} \tag{1.0}$$

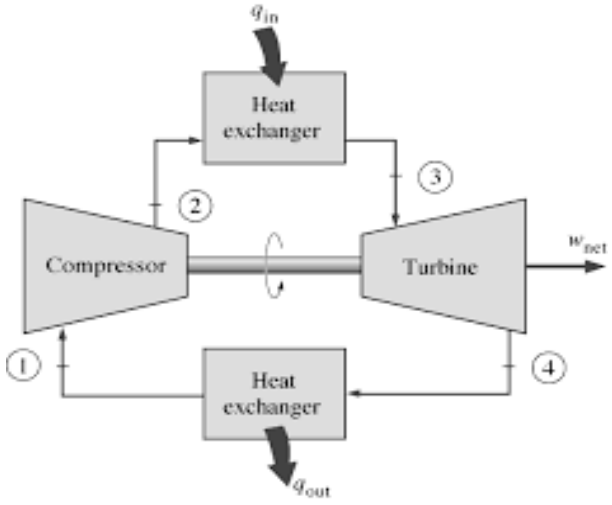
$$\eta = \frac{\dot{W}_{tv} - \dot{W}_b}{\dot{Q}_h} \tag{2.0}$$

Como ciclos derivados do ciclo de Rankine há também o ciclo regenerativo com aquecimento da água de alimentação e o ciclo com reaquecimento, ciclo sem superaquecimento e o regenerativo por exemplo. O rendimento do ciclo Rankine ideal é calculado pela razão da energia gerada pela energia disponível ao sistema, de acordo com as equações 1.0 e 2.0:

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO CICLO BRYTON

O ciclo Bryton, Figura 16, é caracterizado por um ciclo padrão de ar com gás natural para o acionamento da turbina a gás. O ciclo pode ser aberto ou fechado, sendo que, aberto corresponde a constante entrada de ar atmosférico no sistema de compressão e combustão, que tem o papel de fornecer energia para o sistema, que posteriormente irá expandir na turbina gerando energia elétrica. O ciclo fechado obtém energia de uma fonte secundária de calor, como nuclear ou biomassa.

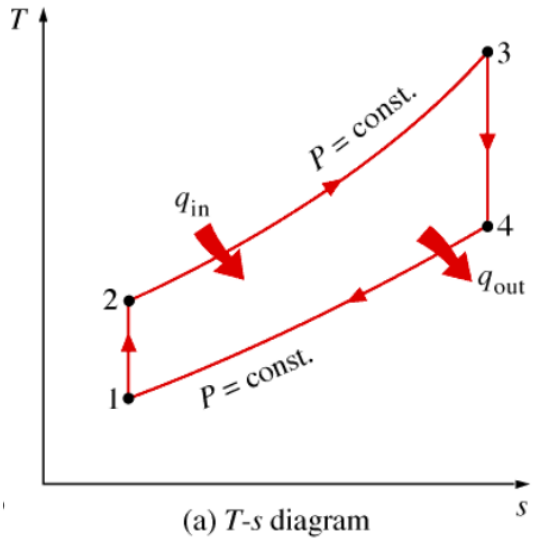
Figura 16: Ilustração de um ciclo Bryton.



Fonte: Franklin (2014).

O ciclo ideal é caracterizado como um ciclo fechado, com constante entrada e saída de calor do sistema. O sistema tem como característica de 1 para 2 uma compressão isentrópica pelo compressor chegando a uma temperatura de 400 a 470 °C, de 2 para 3 absorção de energia térmica a pressão constante pela câmara de combustão a uma temperatura de 1000 a 1400 °C, de 3 para 4 expansão isentrópica por meio da turbina chegando a uma temperatura de 400 a 600 °C e por último de 4 para 1 uma rejeição de calor a pressão constante. Isso é possível observar ilustrativamente na Figura 17.

Figura 17: Gráfico Temperatura X Entropia para um ciclo Bryton.

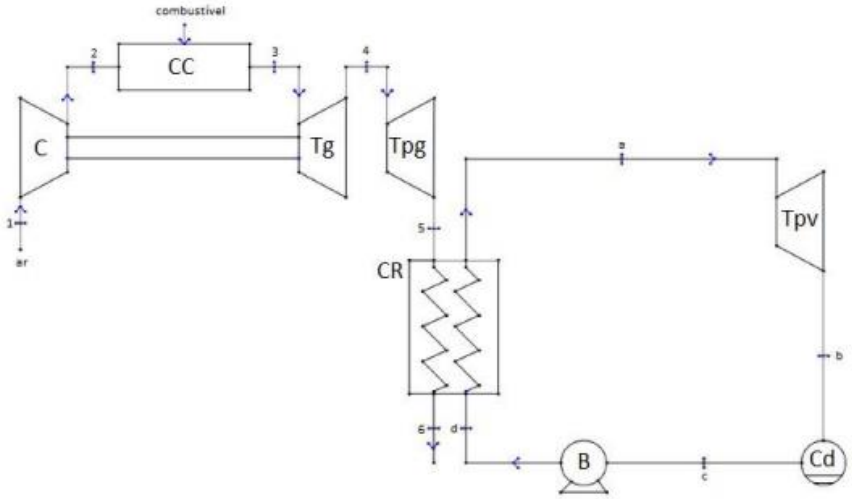


Fonte: Franklin (2014).

O rendimento ideal considerado para um ciclo Bryton com uma turbina a gás é de 35%. Uma forma de se melhorar esse rendimento seria por meio reduzir a faixa de compressão do compressor, reduzir a quantidade de energia via combustível e melhorar a potência gerada pela turbina.

Uma outra alternativa de melhoria de rendimento para um ciclo Bryton é por meio de um ciclo de cogeração acoplado ao ciclo a gás. Nesse caso é desenvolvido um ciclo combinado de Rankine e Bryton, no qual os gases provenientes da expansão da turbina, que normalmente chegam a uma temperatura de até 550 °C, são utilizados em uma caldeira de recuperação de calor como forma de recuperar essa energia térmica, gerando vapor para o processo, como mostra a Figura 18, com isso esse vapor poder ser utilizado para o acionamento de uma turbina a vapor e com isso pode percorrer todo o ciclo de Rankine.

Figura 18: ciclo Bryton com recuperação de calor.



Fonte: Neves (2017).

Com essa combinação é possível chegar a um rendimento de até 55% para o ciclo a gás devido a cogeração. Neves (2017)

De acordo com o ciclo Bryton ideal o seu rendimento é dado pela equação 3.0 que se reduz a 5.0 ou 6.0:

$$\eta = \frac{Wliq}{Qh} \tag{3.0}$$

$$\eta = \frac{Wtg - Wcp}{\dot{m}PCI} \tag{4.0}$$

$$\eta = \frac{\dot{m}c[(T_3 - T_4) + (T_1 - T_2)]}{\dot{m}c(T_3 - T_2)} \tag{5.0}$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{r_p^{\,k-1/k}} \tag{6.0}$$

$$r_p = \frac{P_2}{P_1} \tag{7.0}$$

Para o ciclo combinado de cogeração acoplado ao ciclo o gás o rendimento pode ser calculado considerando as potencias geradas pela turbina a vapor e a potência consumida pela

bomba de alimentação da caldeira, contudo essa potência é comumente desconsiderada do cálculo de rendimento.

Toda a análise feita em cima de um ciclo a vapor, seja ele ciclo Rankine ou Bryton é necessário definir um volume de controle sobre o equipamento em análise, de forma a considerar as entalpias, vazão mássica e temperatura do sistema.

4.3 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA.

A primeira lei da termodinâmica ou lei da conservação das massas relacionada a um volume de controle, leva em consideração a troca de energia entre um volume de controle e o meio em que está inserido, sendo por meio da potência térmica ($\dot{Q}$) ou trabalho ($\dot{W}$) de acordo com a situação. O estudo é pautado na vazão mássica de entrada e saída desconsiderando a vazão interna ao volume de controle, por considerar um regime permanente.

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \Sigma\dot{m}_e - \Sigma\dot{m}_s \tag{8.0}$$

Considerando portanto um regime permanente a equação 8.0 se reduz a:

$$\Sigma\dot{m}_e - \Sigma\dot{m}_s = 0 \tag{9.0}$$

Considerando agora o balanço de energia para a primeira lei da termodinâmica a equação pode ser descrita como:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \Sigma\dot{m}_e * \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e\right) - \Sigma\dot{m}_s * \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gZ_s\right) \tag{10.0}$$

Considerando portanto como regime permanente, a equação 10.0 se reduz a:

$$\dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \Sigma\dot{m}_e * \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e\right) - \Sigma\dot{m}_s * \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gZ_s\right) = 0 \tag{11.0}$$

Em muitos casos adota – se hipóteses de que as variações de energia cinética e potencial são dadas como irrelevantes para o volume de controle, com isso a equação 11.0 se reduz a:

$$\dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \Sigma \dot{m}_e * h_e - \Sigma \dot{m}_s * h_s = 0 \quad (12.0)$$

Com isso a equação 12.0 é a que representa o balanço de energia de grande parte de equipamentos da indústria. O que levou utilizar a primeira lei da termodinâmica em processos foi a definição da energia interna de equipamentos, o que como consequência possibilitou o uso da entalpia como meio quantitativo de análise dos volume de controle. A segunda lei da termodinâmica define uma outra propriedade, a entropia, que também possibilita a análise quantitativa de processos. Entropia e energia foram conceitos criados para contribuir na análise de observações experimentais, mas são conceitos abstratos idealizados.

A segunda lei da termodinâmica e dada, em sua formula completa, por:

$$\frac{dS_{vc}}{dt} = \dot{S}_{ger,v.c.} + \Sigma \left(\frac{\dot{Q_{v.c.J}}}{T_j} \right) + \Sigma \dot{m}_e * s_e - \Sigma \dot{m}_s * s_s \quad (13.0)$$

Levando em consideração de regime permanente para o volume de controle a equação 13.0 se reduz a:

$$\dot{S}_{ger,v.c.} + \Sigma \left(\frac{\dot{Q_{v.c.J}}}{T_j} \right) + \Sigma \dot{m}_e * s_e - \Sigma \dot{m}_s * s_s = 0 \quad (14.0)$$

Para a consideração de processos reversíveis e adiabático $s_s = s_e$, para casos em regime permanente e adiabáticos $s_s \geq s_e$

A eficiência térmica baseada na primeira lei da termodinâmica para equipamentos que produzem potência leva em consideração o trabalho realizado no volume de controle com o trabalho produzido em um processo isentrópico considerando o estado de entrada até uma mesma pressão de saída. Um processo adiabático e reversível leva como consequência uma entropia constante durante o processo caracterizando o processo isentrópico. As equações 15.0 e 16.0 definem a eficiência para turbinas e bombas para a primeira lei, respectivamente:

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{v.c.}}{\dot{m} * \Delta h_{iso}} \quad (15.0)$$

$$\eta_I = \frac{\dot{m} * \Delta h_{iso}}{\dot{W}_{v.c.}} \quad (16.0)$$

Observando as equações 15.0 e 16.0 é possível concluir que o rendimento de turbina é dado pelo inverso do rendimento de uma bomba e vice versa.

O rendimento característico para a segunda lei da termodinâmica não será considerado para avaliação do trabalho.

4.4 CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA DE UMA TURBINA A VAPOR.

Uma turbina a vapor é um equipamento robusto responsável por realizar a expansão do vapor, proveniente dos coletores de vapor de alta pressão e temperatura das caldeiras, gerando vapor a patamares menores que o de entrada. A turbina é composta por jogos de palhetas, sendo elas moveis e fixas, as pás fixas são as que direcionam o movimento do vapor dentro do equipamento, esse movimento, por meio das pás móveis, resulta na rotação do eixo da turbina, esse por sua vez está acoplado ao eixo de um gerador, o rotor do gerador portanto, entrando em movimento, é responsável pela geração de energia. É possível concluir então que a turbina a vapor recebe uma energia potencial termodinâmica, gera uma potência mecânica e por meio dessa potência mecânica gera uma potência elétrica por meio do gerador.

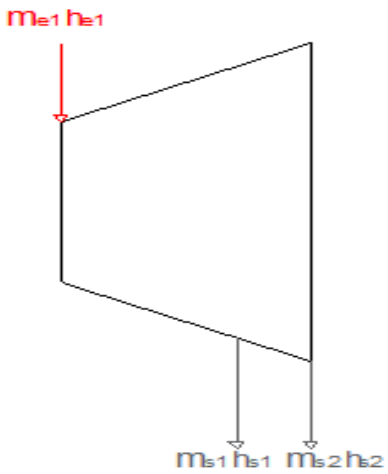
Uma turbina pode ser composta por vários estágios de expansão do vapor, o que vai definir isso é o design do equipamento, ou seja, as sequencias de características das palhetas. Além disso uma turbina pode ter mais de um estágio de escape de vapor dependendo da aplicação do equipamento.

Existem 4 tipos de turbos geradores a vapor característicos, são eles: turbina a vapor de contra pressão, turbina a vapor de contra pressão e extração, turbina a vapor de condensação e turbina a vapor de condensação e extração. A principal diferença entre elas é que turbinas de extração tem mais de um estágio de obtenção de vapor além do estágio de saída, sendo esses com diferentes pressões. Uma turbina de contra pressão proporciona vapor a uma dada pressão na saída, já a uma turbina de condensação é formada por um sistema de vácuo na saída responsável pela condensação de todo o vapor restante.

No dado trabalho vamos olhar mais a fundo as características de uma turbina a vapor de contra pressão com extração, pois é o tipo de equipamento existente na unidade estudada.

A Figura 19 ilustra uma turbina a vapor de contrapressão com uma extração, ela contempla as mesmas características de dois dos turbos geradores existentes na industria de celulose estudada. Um terceiro equipamento difere dos outros dois apenas devido a uma adicional injeção de vapor a uma pressão e temperatura menor que a admissão.

Figura 19: Esquema de Turbina a Vapor de contrapressão e extração.



Fonte: Produção do próprio autor.

Aplicando a equação 12.0 para esse equipamento e considerando a turbina como uma turbina ideal, com um volume de controle definido podemos encontrar o calculo da potência por:

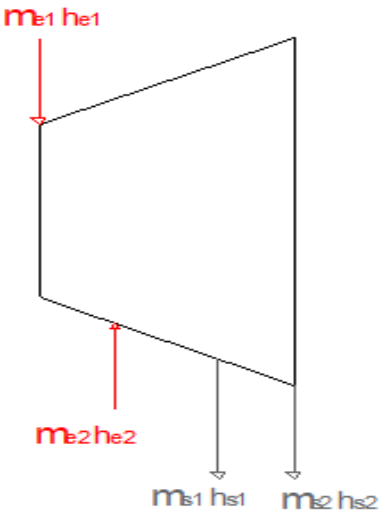
$$\dot{W}_{TV} = \dot{m}_e * \dot{h}_e - \left(\dot{m}_{s1} * \dot{h}_{s1} + \dot{m}_{s2} * \dot{h}_{s2}\right) \quad (17.0)$$

A equação 17.0 se encaixa para o caso de apenas 1 injeção. Contudo para o caso específico, do turbo gerador com duas injeções, conforme Figura 20, o cálculo será realizado de forma a considerar “duas turbinas em uma”, ou seja, considerar dois volumes de controle diferentes para a mesma turbina. Como consideração de cálculo primeiro será considerado o estágio inicial de injeção, ou seja, da injeção de alta até a injeção de baixa e depois uma segunda turbina da injeção de pressão mais baixa até o último estágio de extração, a soma dessas duas potências deve fornecer a potência total gerada pela máquina, ou seja, a soma das equações 18.0 e 19.0.

$$\dot{W}_{TV} = \dot{m}_{e1} * \dot{h}_{e1} - \left(\dot{m}_{s1} * \dot{h}_{s1}\right) \quad (18.0)$$

$$\dot{W}_{TV} = \dot{m}_{e2} * \dot{h}_{e2} - \left(\dot{m}_{s2} * \dot{h}_{s2} + \dot{m}_{s3} * \dot{h}_{s3}\right) \quad (19.0)$$

Figura 20: Esquema de Turbina a vapor de contrapressão com duas injeções e extrações.



Fonte: Produção do próprio autor.

5 DESCRIÇÕES DE CASOS A SEREM ESTUDADOS

Nesse capítulo são apresentados os diferentes casos que são analisados, por meio de balanço de massa e energia, para diferentes cenários de produção da fábrica. Durante o final do ano de 2018 e o ano de 2019 a unidade industrial modificou a estratégia de produção, de forma que, nesse período a fábrica deixou de trabalhar com 100% da capacidade produtiva (caso 1) e passou a operar com cerca de 65% da sua capacidade (caso 2), essa estratégia gerou mudanças nos rendimentos de muitos equipamentos e no processo como um todo. Ao longo desse período várias medidas foram tomadas como forma de reduzir o consumo específico de t/h de vapor consumido pela geração de energia elétrica, MW de gerado; uma dessas medidas foi a parada de um dos turbogeradores (caso 3) por aproximadamente 12 dias.

Tabela 1: Introdução de dados gerais

	Período	**Produção de Celulose média (t/dia)**	**Disponibilidade de vapor média (t/h)**
Caso 1	01/12/2017 – 01/05/2018	**3291,8**	**673**
Caso 2	01/12/2018 – 01/05/2019	**2096**	**534**
Caso 3	12 dias	**2065**	**496**

Fonte: Produção do próprio autor.

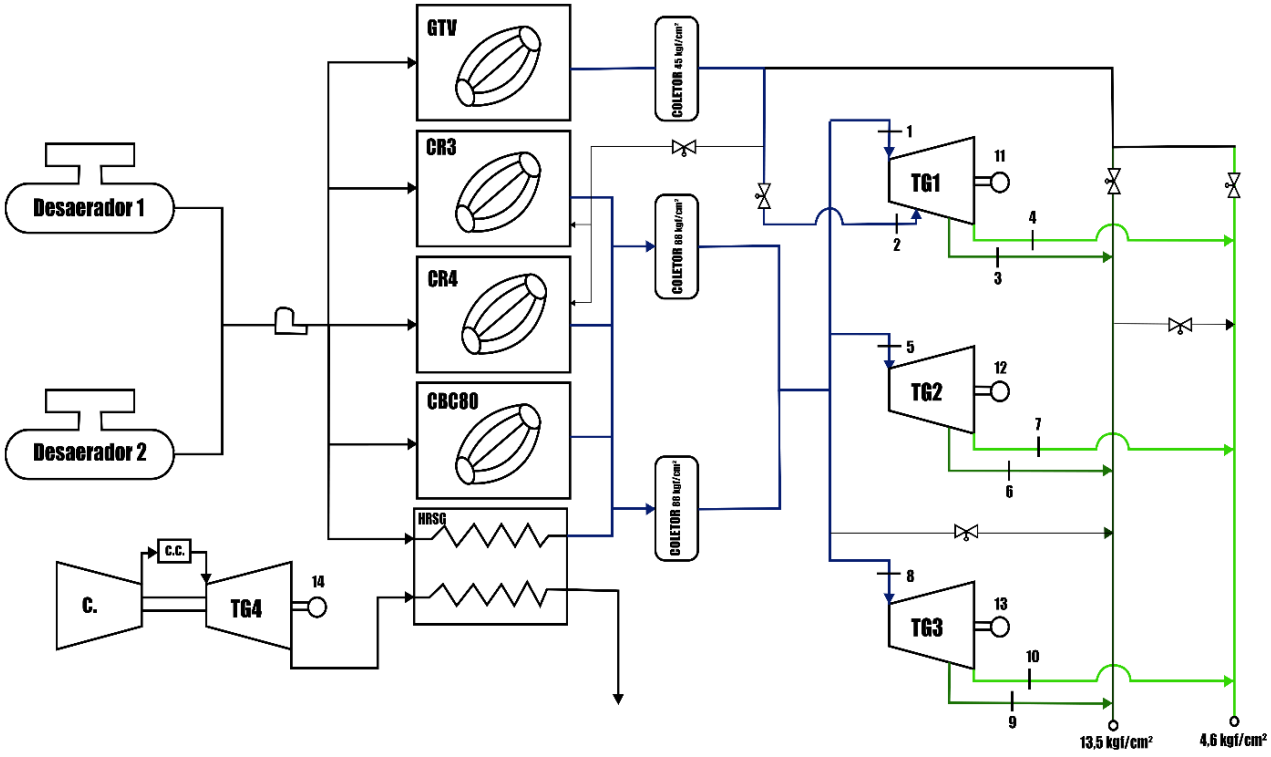
Uma particularidade do processo é que devido ao grande acúmulo de cinzas, por conta da a queima dos combustíveis na fornalha das caldeiras, sobre os tubos dos superaquecedores, evaporadores e economizadores as caldeiras contam com um sistema de sopragem de fuligem, de forma a evitar a incrustação sobre a tubulação dos trocadores de calor o que reduziria a capacidade de troca térmica dos mesmos. Esse sistema utiliza cerca de 50 t/h vapor superaquecido, devido a sua alta pressão, o que contribui positivamente para a limpeza. Como resultado tem – se a redução da quantidade de vapor disponível para passar pelos turbogeradores e consequentemente nem toda energia gerada pelas caldeiras estão disponíveis para o processo de geração elétrica. Outro fato importante é o de que a unidade contém um sistema de cogeração composto por uma turbina a gás com uma caldeira de recuperação de calor, conforme citado no item 1.2.2, o qual poderá ser observado como o ritmo de produção da unidade influência na

geração elétrica proveniente da turbina a gás e qual a diferença dela para os turbogeradores a vapor.

5.1 CASO 1 – PLANTA OPERANDO COM 100% DE SUA CAPACIDADE

O cenário 1 tem como característica a fábrica operando com 100% de sua capacidade, ou seja, com uma produção total de, aproximadamente, 3300 t/dia de celulose branqueada, como mostra a Tabela 1. Trabalhando em paridade térmica, devido a algumas deficiências e estratégias de processo, a produção de vapor da fábrica é consequência do consumo das unidades produtivas, de forma a não ter sobra de vapor no processo, dessa forma o processo conta com a operação de todos os turbogeradores, a uma capacidade praticamente plena de admissão de vapor superaquecido. A Figura 21 fornece uma ilustração do sistema de geração de vapor e energia elétrica.

Figura 21: Fluxograma do processo de geração de vapor.



Fonte: Produção do próprio autor.

Os dados considerados para a construção da Tabela 2 foram as médias diárias no período de 6 meses, 01/12/2017 a 01/05/2018, período que obedeceu aos parâmetros de análise pré-

definidos no item 5. A média de vapor superaquecido gerado pelas caldeiras, juntamente com as características do vapor, estão determinados na Tabela 3:

Tabela 2: Valores gerais de processo para o caso 1.

Pontos	m (t/h)	T (ºC)	P (kgf/cm²)	h (kJ/kg)	h_{iso}(kJ/kg)	s (kJ/kgK)
1	144,6	474	85,5	3329,32	3329,32	6,6143
2	8	340	38,1	3074,74	3074,74	6,5836
3	119,5	253	13,3	2938,60	2829,53	-
4	33.1	170	4,4	2794,97	2621,21	-
5	216,2	423	84	3198,21	3198,21	6,4400
6	32,4	253	12,8	2940,45	2754,63	-
7	183,8	170	4,8	2792,26	2575,83	-
8	249	464	87	3301,65	3301,65	6,5687
9	145	225	13,2	2873,18	2821,31	-
10	104	161	4,8	2772,02	2630,66	-

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 3: Disponibilidade de vapor proveniente das caldeiras para o caso 1.

Caldeira	**Disponibilidade de vapor (t/h)**	**Temperatura (°C)**	**Pressão (kgf/cm²)**
GTV	44,5	340	38,1
CBC 80	48	453	85,5
HRSG	8,5	453	85,5
CR3	214	453	85,5
CR4	358	453	85,5
Total	673	-	-

Fonte: Produção do próprio autor

5.2 CASO 2 – PLANTA OPERANDO COM 65% DE SUA CAPACIDADE

Diferentemente do caso 1, o cenário 2 tem como característica a fábrica operando com cerca de 65% de sua capacidade total de produção, ou seja, cerca de 2100 t/dia de produção de celulose como mostra a Tabela 1. Devido a demanda de mercado e por ajustes comerciais a unidade tomou a estratégia de reduzir a produção de forma a conter os estoques de celulose e a

competitividade da empresa. Contudo, essa decisão interferiu em todo o processo industrial, de modo que, por trabalhar em paridade térmica, ao reduzir a produção da unidade, a quantidade de vapor demandada pelo processo será menor, dessa forma a quantidade de vapor disponível para a geração de energia também reduz. Por consequência dos fatos, os turbogeradores passam a trabalhar com patamares inferiores de admissão de vapor superaquecido provenientes das caldeiras.

O layout da unidade não muda em nada a sua configuração, como mostra a Figura 21.

Os dados considerados para a construção da Tabela 4 foram médias diária ao longo de 6 meses, 01/12/2018 a 01/05/2019, período no qual houve a redução de produção da unidade, obedecendo os parâmetros de análise pré determinados. A média de vapor superaquecido gerado pelas caldeiras, juntamente com as características do vapor, estão determinados na Tabela 5:

Tabela 4: Valores gerais de processo para o caso 2.

Pontos	m (t/h)	T (ºC)	P (kgf/cm²)	h (kJ/kg)	h_{iso}(kJ/kg)	s (kJ/kgK)
1	100,5	470	85,7	3318,85	3318,85	6,5993
2	18,3	350	34,6	3107,32	3059,23	6,6777
3	69	250	13,2	2932,08	2874,01	-
4	49,8	170	4,3	2795,64	2656,59	-
5	137,5	420	81	3195,33	3195,33	6,4509
6	16,3	238	10	2917,32	2712,57	-
7	121,2	185	4,6	2826,35	2573,14	-
8	200	445	84	3256,68	3256,68	6,5227
9	130	215	12,5	2852,29	2788,27	-
10	70	163	4,6	2778,04	2603,36	-

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 5: Disponibilidade de vapor proveniente das Caldeiras para o caso 2.

Caldeira	**Disponibilidade de vapor (t/h)**	**Temperatura (°C)**	**Pressão (kgf/cm²)**
GTV	40	350	34,6
CBC 80	38	440	83,5
HRSG	39	440	83,5
CR3	144	440	83,5
CR4	273	440	83,5
Total	534	-	-

Fonte: Produção do próprio autor.

5.3 CASO 3 – PLANTA OPERANDO COM APENAS 2 TURBOS GERADORES A VAPOR.

O caso 3 é um caso que difere dos demais, pois o mesmo trata – se de uma alternativa levantada como forma de obter um melhor consumo específico de vapor por geração elétrica de energia disponível para a fábrica. A alternativa utilizada foi de parar o turbogerador 1 de forma a concentrar a passagem de todo o vapor gerado apenas pelos turbogeradores 2 e 3. Assim como o caso 2, no período de análise do caso 3, a unidade encontrava – se com a produção reduzida, cerca de 65% da capacidade plena de produção, como mostra a Tabela 1, em decorrência desse fato o caso 3 segue os mesmos parâmetros de processo que o caso 2, dessa forma será possível comparar se a alternativa levantada obteve algum ganho de processo.

Os dados considerados para a elaboração da Tabela 6 foram médias diárias ao longo do período de 12 dias, o qual o turbogerador 1 manteve – se parado, obedecendo os parâmetros de análise pré determinados no item 5. A média de vapor superaquecido gerado pelas caldeiras, juntamente com as características do vapor, estão determinados na Tabela 7:

Tabela 6: Valores gerais de processo para o caso 3.

Pontos	m (t/h)	T (ºC)	P (kgf/cm²)	h (kJ/kg)	h_{iso}(kJ/kg)	s (kJ/kgK)
1	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-
5	212	432	84,5	3221,55	3221,55	6,4708
6	30	251	10,7	2943,64	2734,41	-
7	182	165	4,5	2783,23	2577,74	-
8	204,7	454	87,6	3274,82	3274,82	6,5301
9	112	218	12	2862,13	2783,70	-
10	92,7	169	4,5	2792.09	2602,68	-

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 7: Disponibilidade de vapor proveniente das Caldeiras para o caso 3.

Caldeira	**Disponibilidade de vapor (t/h)**	**Temperatura (°C)**	**Pressão (kgf/cm²)**
GTV	49	345	35
CBC 80	38	443	86
HRSG	35	443	86
CR3	180	443	86
CR4	194	443	86
Total	496	-	-

Fonte: Produção do próprio autor.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, serão discutidos os resultados obtidos, com a análise energética de uma indústria de celulose, para os casos descritos nos itens 5.1, 5.2 e 5.3. Como forma de avaliação dos casos em questão, serão considerados os seguintes parâmetros de comparação: potência térmica disponível pelas caldeiras, a geração elétrica de energia pelo processo, o rendimento isentrópico de cada turbogerador e o consumo específico de vapor, disponível para o processo, pela potência elétrica total gerada. Dessa forma será possível analisar, inicialmente, os dados gerais da unidade como um todo. Em seguida como uma segunda análise, será observado a influência de cada turbina individualmente para o processo e suas diferenças, de forma a contribuir para análise do item 5.3.

Por último, será realizado uma terceira análise de comparação dos turbogeradores a vapor com a turbina a gás, de modo a visualizar a influência da produção para as diferentes máquinas.

Os cálculos desenvolvidos no trabalho, foram todos realizados em um modelo de Excel, no qual, por meio de funções que permitem a determinação de propriedades termodinâmicas, entalpia e entropia pincipalmente, possibilitaram a aplicação de balanço de massa e energia para obtenção dos resultados.

6.1 RESULTADOS OBTIDOS PARA O CASO 1

O caso 1 como descrito no item 5.1, levou em consideração os valores disponíveis na Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3, de forma a fornecer todos os dados necessário para a realização dos cálculos. Os valores foram obtidos por meio das equações 8.0, 12.0 e 15.0 e estão ilustradas na Tabela 8 e Tabela 9.

Tabela 8: Resultados obtidos para caso 1.

Potência disponibilizada pelas caldeiras	609,82	MW
Potência total gerada pelas turbinas	72,92	MW
Específico de geração total	9,23	t vapor/MW
Geração de potência pela turbina a gás	21,3	MW
Demanda de potência pela fábrica	103	MW

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 9: Resultados obtidos para os turbogeradores caso 1.

	Tg1	Tg2	Tg3
Potência elétrica gerada (MW)	17,3	23	32,5
Potência isentrópica (MW)	21,8	35,8	38,7
Rendimento isentrópico do TG (%)	79	64	84
Consumo específico de vapor (t vapor/MW)	8,81	9,38	7,65

Fonte: Produção do próprio autor.

Observando a Tabela 8, é possível notar uma grande diferença entre a quantidade de potência térmica fornecida pelas caldeiras com o total de energia gerada a partir do vapor. Além disso observa – se que nesse período a unidade obteve um déficit de energia de -8,8 MW, mesmo com a contribuição de 21,3 MW proveniente da turbina a gás, de forma que, para manter a unidade operando precisou comprar essa energia de alguma companhia fornecedora. Dentre os turbogeradores a vapor o que demonstrou um menor rendimento isentrópico, Tabela 9, foi o Tg2 e também um pior resultado quanto a consumo específico de vapor para geração de energia.

Foi possível observar também um consumo específico de tonelada vapor por tonelada de celulose produzida de 4,9 e um consumo específico de energia em MW por tonelada de celulose produzida de 0,5.

6.2 RESULTADOS OBTIDOS PARA O CASO 2

O caso 2 assim como descrito no item 5.2, teve como parâmetros de cálculos os valores fornecidos pela Tabela 1, Tabela 4 e Tabela 5, de forma a fornecer todos os dados necessários para a análise do caso. O valores foram obtidos por meio das equações 8.0, 12.0 e 15.0 e estão descritos na Tabela 10 e Tabela 11.

Tabela 10: Resultados obtidos para caso 2.

Potência disponibilizado pelas caldeiras	479,7	MW
Potência total gerada pelas turbinas	51,17	MW
Específico de geração total	10,44	t vapor/MW
Geração de potência pela turbina a gás	22,6	MW
Demanda de potência pela fábrica	87,6	MW

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 11: Resultados obtidos para os turbogeradores caso 2.

	Tg1	Tg2	Tg3
Potência elétrica gerada (MW)	13,6	13,7	24
Potência isentrópica (MW)	18	23	29,6
Rendimento isentrópico do TG (%)	75	60	81
Consumo específico de vapor (t vapor/MW)	8,75	10,05	8,36

Fonte: Produção do próprio autor.

A partir da Tabela 10 é possível observar, assim como no caso 1, uma grande diferença de potência térmica gerada nas caldeiras com a energia elétrica gerada pelas turbinas. Além disso observa – se um déficit de -13,8 MW de energia no período, mesmo com a contribuição de 22,6 MW proveniente da turbina a gás, para manter o funcionamento da indústria. Observando os resultados obtidos para os turbogeradores é possível observar uma piora no

rendimento isentrópico, assim como, uma piora nos consumos específicos de vapor por megawatt de energia gerada para os TG2 e TG3, Tabela 11, quando comparado ao caso 1 e dentre as turbinas a que entrega o pior rendimento continua sendo o Tg2.

Observando agora o consumo específico de tonelada de vapor por tonelada de celulose produzida para o caso 2 com o valor de 6,11 e o consumo específico de energia em MW por tonelada de celulose produzida de 0,58, comparando os valores com o caso 1 é possível observar um aumento das variáveis estudas.

6.3 RESULTADOS OBTIDOS PARA O CASO 3

O caso 3 assim como descrito no item 5.3, obteve a sua base de dados para os cálculos da Tabela 1, Tabela 6 e Tabela 7, de forma a fornecer todos os dados necessários para a aplicação das equações 8.0, 12.0 e 15.0, pela Tabela 12 e Tabela 13, de forma a obter todos os parâmetros de comparação dos casos propostos.

Tabela 12: Resultados obtidos para caso 3.

Potência disponibilizado pelas caldeiras	445,45	MW
Potência total gerada pelas turbinas	49,74	MW
Específico de geração total	9,97	t vapor/MW
Geração de potência pela turbina a gás	23,6	MW
Demanda de potência pela fábrica	85	MW

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 13: Resultados obtidos para os turbogeradores caso 3.

	Tg1	Tg2	Tg3
Potência elétrica gerada (MW)	-	24,5	25,3
Potência isentrópica (MW)	-	36,6	32,6
Rendimento isentrópico do TG (%)	-	67	77
Consumo específico de vapor (t vapor/MW)	-	8,66	8,1

Fonte: Produção do próprio autor.

Diferente dos itens 6.1 e 6.2, a Tabela 12 e Tabela 13 levam em consideração os dados apenas para os turbogeradores 2 e 3, conforme descrito no item 5.3. Levando em consideração os dados da Tabela 12, é possível observar, assim como nos casos 1 e 2, a grande diferença entre a potência térmica fornecida pelas caldeiras ao sistema com a quantidade de energia gerada pelas turbinas a vapor. Observou – se no período um déficit de -11,7 MW de energia para a unidade industrial, mesmo com a contribuição de 23,6 MW proveniente da turbina a gás. Além disso é possível observar valores de energia disponibilizada pelas caldeiras, para os casos 2 e 3, bem próximos, contudo é notável a melhora do rendimento isentrópicos fornecidos pelo turbogerador 3, mas é visto uma piora para o TG2, já o consumo específico de vapor necessário para gerar um megawatt de energia é observado uma melhora para os dois turbogeradores, Tabela 13.

Para o caso 3 o consumo específico de tonelada de vapor por tonelada de celulose produzida é de 5,76 e o consumo específico de energia em MW por tonelada de celulose é de 0,57. Com esses valores é possível observar uma piora quando comparado ao caso 1, mas uma melhora quando comparado ao caso 2

7 CONCLUSÃO

O objetivo desse trabalho foi alcançado por meio de uma análise energética de uma planta de geração de energia em uma indústria de celulose, através da primeira lei da termodinâmica. A partir das análises realizadas para diferentes cenários, item 5.1, 5.2 e 5.3, obteve – se dados que mostraram a influência da redução do ritmo de produção da unidade na geração de vapor e consequentemente na geração elétrica de energia. Analisando o caso 1, Tabela 8, o qual a unidade operava com 100% de capacidade, observa – se o fornecimento de potência térmica para o processo, proveniente das caldeiras, de 609,82 e uma geração elétrica de energia de 72,92 MW, quando comparado aos casos 2 e 3, os quais a unidade produzia cerca de 65% de sua capacidade, nota – se uma redução de aproximadamente 25% da potência fornecida pelas caldeiras e 30% da energia gerada pelas turbinas a vapor. Além disso é notável a piora no consumo específico de vapor para geração de um megawatt de energia e nos rendimentos isentrópicos dos turbogeradores que passou de 9,23 t vapor/MW no caso 1 para 10,44 e 9,97 t vapor/MW para os casos 2 e 3 respectivamente. Por último é possível avaliar um aumento do déficit de energia quando comparado ao caso 1, mesmo com o auxílio de maior geração de energia proveniente da turbina a gás, mas isso é mais um fator que demonstra um pior rendimento de processo com a estratégia de redução de produção da unidade.

Analisando individualmente o desempenho de cada turbogerador é possível visualizar uma piora no rendimento isentrópico quando comparado o caso 1 para o caso 2, sendo que, para o caso 1 os Tgs contava com um rendimento de 79% para o Tg1, 64% para o Tg2 e 84% para o Tg3 passando para 75%, 60% e 81% respectivamente, assim como no consumo específico de vapor para geração de energia piorou para o Tg2 e Tg3, já para o Tg1 não obteve grande mudança. Por fim é possível visualizar que o turbogerador que obteve pior rendimento isentrópico e pior consumo específico de vapor foi o Tg2.

Observando agora as particularidades do caso 3 e comparando – o ao caso 2, é notável o ganho em consumo específico de vapor para geração de energia, cerca de 0,5 toneladas de vapor, além disso é possível visualizar a melhora do rendimento isentrópico do turbogerador 3, mas uma piora para o turbogerador 2. Essa melhora, de consumo específico de vapor ocorreu principalmente devido a parada do Tg1, o que acarretou em concentrar todo o vapor gerado em apenas duas turbinas de forma que elas operassem em patamares mais altos produzindo melhores resultados. Analisando mais a fundo os dados os resultados poderiam ter sido ainda melhores se ao invés de tirar o Tg1 de operação tivesse parado o Tg2 pois é a turbina que para todos os casos apresentou os piores resultados. Comparando as variáveis de consumo específico

de tonelada de vapor por tonelada de celulose produzida e o consumo específico de energia em MW por tonelada de celulose é possível observar a piora quando comparado os casos 2 e 3 ao caso 1 e também uma melhora quando comparado o caso 3 com 2, de forma a mostrar também a influência da redução de produção da unidade e também os resultados atingidos com a parada de um turbogerador.

Por último é possível avaliar as diferenças de resposta de geração elétrica de uma turbina a gás e uma turbina a vapor quanto a redução de produção da unidade. A turbina a gás por se tratar de uma máquina que não necessita de vapor para a geração de energia ela não sofre interferência com a redução de produção enquanto as turbinas a vapor sofrem, isso é possível observar comparados os resultados obtidos nos itens 6.1, 6.2 e 6.3. Essa característica torna a turbina a gás uma opção interessante em casos como esse de redução de produção, pois com ela é possível ajustar melhor os parâmetros consumo/demanda de energia da unidade, de acordo com a estratégia utilizada pela equipe

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Vinius Bononi de. **Caracterização, analise e perspectivas da matriz energética do setor de papel e celulose.** 2013. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrônoma, Escola de Economia de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2013.

CASTRO, Heizir Ferreira de; GRABAUSKAS, Daniel. **Industria de papel e celulose:** branqueamento da polpa celulósica. 2013. Disponível em: http://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840855/LOQ4023/Branqueamentocelulose.pdf. Acesso em: 10 out. 2019.

DEPEC - DEPARTAMENTO DE PESQUISAS E ESTUDOS ECONOMICOS. **Papel e Celulose.** 2019. Disponível em: https://www.economiaemdia.com.br/EconomiaEmDia/pdf/infset_papel_e_celulose.pdf. Acesso em: 10 out. 2019.

FERREIRA, Bruno Manhãos. **Modelagem de plantas de ciclo combinado para simulação integrada de transitório eletromecânicos e termodinâmicos.** 2015. 118 f. Disserta玢o (Mestrado) - Curso de Engenharia El閏rica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

FIOMARI, Marcelo Caldato. **Analise energética e exergética de uma usina sucroalcooleira do oeste paulista com sistema de cogeração de energia em expansão.** 2004. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2004.

FOELKEL, Celso Edmundo Bochetti. **Eucalipto no Brasil, história de pioneirismo.** Disponível em: https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/va04-florestas-plantadas03.pdf. Acesso em: 02 out. 2019.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T. **Introdução a mecânica dos fluidos.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1998.

FRITOLI, Clara Landim; KRUGER, Eduardo; CARVALHO, Silmara Kuster de Paula. **História do papel:** panorama evolutivo das técnicas de produção e implicações para sua preservação. 2016. Disponível em: http://www.brapci.inf.br/index.php/res/download/89291. Acesso em: 10 out. 2019.

HORA, André Barros da. **Panoramas setoriais 2030 papel e celulose.** Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/14241/2/Panoramas%20Setoriais%202030%20-%20Papel%20e%20celulose_P.pdf. Acesso em: 10 out. 2019.

MARTINI, Augusto Jeronimo. **O plantador de eucaliptos:** a questão da preservação florestal no Brasil e o resgate documental do legado de Edmundo Navarro de Andrade. 2004. 332 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de História Social, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8138/tde-04062004-231644/publico/OplantadorDeEucaliptos1.pdf. Acesso em: 02 out. 2019.

MOURA, Jose M. de et al. **Analise da eficiência energética em segmentos industriais selecionados.** 2018. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/10584/105176754/PRODUTO+4_Vpublicacao.pdf/f48424df-30ef-464e-ac90-e30d97f41936. Acesso em: 02 out. 2019.

NEVES, Suellen Cristina Porto. **Analise de um ciclo combinado Brayton - Rankine com a utilização de diluído de carbono supercrítico.** 2017. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10022341.pdf. Acesso em: 06 out. 2019.

PAULA, Kauana Rafael de. **Analise da sulfides do processo Kraft em uma indústria de celulose.** 2017. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná Ponta Grossa, 2017. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8401/1/PG_COENQ_2017_2_16.pdf. Acesso em: 06 out. 2019.

QUEIROZ, Luiz Roberto de Souza; BARRICHELO, Luiz Ernesto George. **A celulose de eucalipto:** uma oportunidade brasileira. Vinhedo: Avisbrasilis, 2008. Disponível em: http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/A%20celulose%20de%20eucalipto.pdf. Acesso em: 02 out. 2019.

RIBEIRO, Nayssa Martins. **Analise de uma instalação a vapor em uma indústria de papel e celulose.** 2016. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná Pato Branco, 2016.

SILVA, Carlos Alberto Varinha e; BUENO, Jefferson Mendes; NEVES, Manoel Rodrigues. **A indústria de celulose e papel no Brasil.** Disponível em: https://www.poyry.com.br/sites/www.poyry.com.br/files/media/related_material/16out27a-abtcp.pdf. Acesso em: 15 out. 2019.

SOUZA, João Paulo Innocente de. **Analise de carga e eficiência de turbinas a gás com injeção de vapor considerando mapas de compressor em simulação computacional.** 2018. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.