

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA DA USP
PECE – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA

Lucas Pereira dos Santos

**Estudo da valorização energética do efluente proveniente do
processo de fabricação de celulose**

**São Paulo
2019**

LUCAS PEREIRA DOS SANTOS

**Estudo da valorização energética no efluente proveniente do
processo de fabricação de celulose**

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte da avaliação da disciplina Monografia II.
Área de Concentração: Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética – USP.

Orientador: Prof. Dra. Vanessa Pecora Garcilasso

**São Paulo
2019**

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha esposa e família, pela paciência, companheirismo e disponibilidade no auxílio desta difícil jornada.

A todas as pessoas que colaboraram, direta ou indiretamente, colegas e funcionários do PECE, pelo suporte e apoio nos momentos em que necessitei de informações e ajuda.

É importante ressaltar o apoio dos professores que souberam transmitir o conhecimento de forma clara e objetiva, a fim de me guiar para o sucesso.

E a empresa destinada ao estudo de caso, sempre solicita e parceira na transparência e confiança de seus dados fornecidos ao trabalho.

RESUMO

No processo de fabricação da celulose de fibra curta é utilizado um volume considerável de água. Esta água após todo o processo de fabricação e recuperação química retorna como rejeito sendo destinada a estação de tratamento de efluentes.

O balanço energético utiliza combustíveis auxiliares para manter o equilíbrio do processo. Dentre estes combustíveis, destaca-se o gás natural, que é utilizado como complemento auxiliar de queima em caldeiras e como combustível principal de uma turbina a gás que opera com pós-combustão alinhada a uma caldeira de recuperação de calor.

Portanto, neste trabalho será avaliado o potencial energético do efluente gerado no processo de conversão da madeira de eucalipto em celulose, com objetivo de encontrar oportunidades de geração do biogás/biometano para substituir ou otimizar os combustíveis fósseis utilizados no processo.

Palavras Chaves – Celulose, resíduos, bioeconomia, biorrefinaria, efluente industrial, biogás, biometano.

ABSTRACT

In the manufacturing process of short fiber pulp a huge volume of water is used. This water after the whole process of manufacturing and chemical recovery returns as waste being destined to the effluent treatment plant.

The energy balance uses auxiliary fuels to maintain the process balance. These include natural gas, which is used as an auxiliary boiler flare supplement and as the main fuel of a gas turbine operating after combustion in line with a heat recovery boiler.

Therefore, this work will evaluate the energy potential of the effluent generated in the process of converting eucalyptus wood to cellulose, aiming to find biogas generation opportunities to replace or optimize fossil fuels used in the process.

Keywords - Cellulose, waste, bioeconomics, biorefinery, industrial effluent, biogas, biomethane.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Matriz energética e elétrica brasileira	13
Figura 2.2: Tecnologias de aproveitamento energético.....	15
Figura 2.3: Rotas de conversão da matéria orgânica no tratamento de efluente1	17
Figura 2.4: Fases do processo anaeróbico.....	18
Figura 2.5: Biodigestor Indiano	21
Figura 2.6: Biodigestor Chinês.....	21
Figura 2.7: Esquema geral do biodigestor UASB.....	22
Figura 2.8: Reator de Circulação Interna.....	24
Figura 2.9: Possíveis utilizações já comercializadas do biogás/biometano.....	27
Figura 2.10: Matéria-prima de biomassa, processos e produtos.....	29
Figura 2.11: Rendimento teórico de cogeração	30
Figura 2.12: Plantas de Biogás em Indústrias de Celulose e Papel.....	31
Figura 3.1: Ranking dos dez maiores produtores mundiais de celulose em 2015.....	33
Figura 3.2: Ranking da Produção mundial de celulose oriunda do processo químico	34
Figura 3.3: Fluxograma das etapas de produção de Celulose	35
Figura 3.4: Fluxograma das etapas de produção de Papel	36
Figura 3.5: Fluxograma das etapas de plantas integradas com secagem de polpa.....	36
Figura 3.6: Processo de Fabricação da Celulose	39
Figura 3.7: Resíduos Gerados no processo	40
Figura 3.8: Processo de Lodo Primário.....	41
Figura 3.9: Processo de Lodo Biológico	41
Figura 4.1: Balanço da Fábrica estudo de caso.....	43
Figura 4.2: Fluxograma de Produção da Celulose e Papel.....	46
Figura 4.3: Capacidade Instalada por Combustível no Brasil em 2014 (MW).....	47
Figura 4.4: Balanço Energético da planta em estudo	48
Figura 4.5: Balanço energético do Gás Natural	50
Figura 4.6: Fluxograma de Tratamento do Efluente Industrial.....	52
Figura 4.7: Arranjo de Cogeração Ciclo Combinado	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Comparação entre DBO e DQO	16
Tabela 2.2: Composição média do Biogás em percentual de volume	20
Tabela 2.3: Biodigestor UASB	23
Tabela 2.4: Intervalo de composição de misturas gasosas combustíveis	26
Tabela 4.1: Tarifa do gás – Cogeração.....	51
Tabela 4.2: Parâmetros Físico-Químicos do efluente industrial	54
Tabela 4.3: Valores Potenciais de Biogás, Biometano e Gás Natural	57
Tabela 4.4: Comparativo entre cogerações.....	59
Tabela 4.5: Seleção de Reator a partir da Taxa de Aplicação.	61
Tabela 4.6: Estimativa de ganho Financeiro	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	- Norma Brasileira
HRSG	- <i>Heat Recovery Steam Generators</i>
DBO	- Demanda biológica de oxigênio
DQO	- Demanda bioquímica de oxigênio
BRS	- Bactérias redutoras de sulfato
UASB	- <i>Up flow anaerobic sludge blanket</i>
RAFA	- Reator anaeróbio de fluxo ascendente
TRH	- Tempo retenção hidráulica
EGSB	- Reator de leito granular expandido
IC	- Reator de circulação Interna
PCI	- Poder calorífico inferior

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivo	11
1.2 Justificativa.....	12
1.3 Metodologia da Pesquisa	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Matriz energética e elétrica brasileira.....	13
2.2 Biomassa	14
2.3 Resíduos Orgânicos Industriais	15
2.4 Processo de Digestão anaeróbica	18
2.4.1 Biodigestores utilizados para a digestão anaeróbica de efluentes	20
2.5 Biogás e Biometano	25
2.6 Bioeconomia	27
2.7 Cogeração.....	30
2.8 Case de produção do Biogás (Efluente do processo de Celulose e Papel)	31
3. SETOR DE CELULOSE	33
3.1 Processo de Fabricação de Celulose.....	37
4. ESTUDO DE CASO – VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DO EFLUENTE PROVENIENTE DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CELULOSE	43
4.1 Balanço Energético	47
4.2 Consumo de Gás Natural.....	50
4.3 Fluxograma do Efluente Industrial.....	52
4.4 Características do Efluente Industrial.....	53
4.5 Potencial Energético do Efluente Industrial.....	55
4.6 Potencial de aplicação do biogás.....	58
4.7. Resultados, análise e discussões	59

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	64
5.1 Conclusão	64
5.2 Recomendações	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
ANEXO	72
Anexo I – SISTEMAS DE REFERÊNCIA NO MUNDO INTEIRO	72
Anexo II – SISTEMAS DE REFERÊNCIA NO MUNDO INTEIRO	73
Anexo III – Reator Biopaq IC	74

1. INTRODUÇÃO

O desafio das indústrias modernas refere-se à busca por maximizar os lucros de forma sustentável e agregar valor ao produto final com uma margem competitiva em seu mercado de atuação. Uma das vertentes para o sucesso deste objetivo é agregar valor ao resíduo gerado no processo de forma a alavancar o reaproveitamento energético reduzindo o custo com o descarte de materiais. Outra vertente refere-se a reduzir o consumo de combustíveis fósseis, substituindo por fontes renováveis coerentes ao processo e ou localização geográfica.

O setor de papel e celulose tem seu destaque no setor energético por ser conhecido pelo consumo intensivo de energia elétrica, representando 5% de todo consumo no país. Neste caso, no processo de fabricação da celulose os combustíveis fósseis são utilizados no balanço energético como fontes complementares de calor, como por exemplo, o gás natural e o óleo 3A, ambos utilizados em queimas auxiliares de caldeiras e fornos. Os resíduos gerados no processo são de natureza sólida, líquida ou gasosa. O resíduo líquido, pode ser denominado como efluente industrial, resultante da água utilizada nos processos de cozimento, lavagem e secagem da poupa de celulose. Alinhado ao conceito de biorrefinaria, pode-se estudar alternativas para utilização deste resíduo para que seja possível transformá-lo em bioenergético para substituir de forma total ou parcial algum combustível fóssil.

Embora ainda em estágio de desenvolvimento, com produtos e rotas tecnológicas em fase de identificação ou de aprimoramentos, as biorrefinarias são as unidades industriais potencialmente capazes de materializar uma desejada abordagem integrada, que gere a fabricação tanto de produtos de elevado volume, como os bioenergéticos (biocombustíveis, biogás, calor e eletricidade), quanto outros de menores volumes, mas de maior valor agregado, como produtos químicos, bioplásticos e alimentos (SCARLAT, 2015).

A empresa selecionada para fazer parte deste estudo é líder mundial na fabricação de celulose de fibra curta¹ proveniente do eucalipto, em função da importância que ela representa no setor industrial do país, com forte olhar para a inovação e sustentabilidade de seu negócio.

O capítulo 2 apresenta o referencial bibliográfico para fundamentar a pesquisa, foram realizados levantamentos em fontes secundárias tais como: levantamentos bibliográficos, documentais, pesquisas efetuadas junto à internet a fim de construir o referencial teórico, além de pesquisas de campo, a fim de apoiar as fundamentações propostas neste estudo.

O capítulo 3 aborda detalhes do estudo de caso, onde são apresentados dados do processo de fabricação da celulose, resíduos gerados, balanço energético e parâmetros do efluente industrial para avaliação do potencial de geração de biogás a partir do seu tratamento.

Em sequência, no capítulo 4 são discutidas as opções de valorização do potencial energético do biogás gerado a partir do efluente industrial, de forma a avaliar os ganhos em relação ao balanço energético atual.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo o potencial energético do efluente gerado no processo de conversão da madeira de eucalipto em celulose, com objetivo de encontrar oportunidades de geração do biogás/biometano por meio de tratamento anaeróbico do efluente industrial, para substituir ou otimizar os combustíveis fosseis utilizados no processo.

¹ A Celulose de Fibra Curta, que é produzida a partir do eucalipto, álamo, bétula e acácia, tem fibras mais curtas e geralmente é mais adequada para fabricar papéis de imprimir e escrever revestidos e não revestidos, lenços de papel e papéis sanitários e papel cartão de embalagem. As fibras curtas são mais adequadas para a fabricação de papel sem pasta mecânica (*woodfree*) com boa capacidade de impressão, maciez, brilho e uniformidade (Suzano, 2019).

1.2 Justificativa

O balanço energético da fábrica de celulose escolhida selecionada para este estudo utiliza combustíveis auxiliares para manter o equilíbrio do processo. Dentre esses combustíveis, destaca-se o gás natural, que é utilizado como complemento auxiliar de queima em caldeiras e como combustível principal de uma turbina a gás que opera com pós-combustão alinhada a uma caldeira de recuperação de calor.

Este estudo tem como finalidade a avaliação do potencial do efluente resultante do processo de fabricação de celulose para a produção de biocombustíveis, neste caso o biogás/biometano, com intuito de substituir parte do gás natural utilizado no processo.

1.3 Metodologia da Pesquisa

A metodologia aplicada neste trabalho para atingir os objetivos se estrutura em revisão bibliográfica e estudo de caso. A revisão bibliográfica aborda as práticas mais relevantes citadas por diversos autores do tema fabricação de celulose, tratamentos de efluentes industriais, produção de biogás/biometano, matriz energética brasileira e bioeconomia. Esta pesquisa pode ser classificada como descritiva e exploratória, de natureza qualitativa.

Inicialmente serão apresentados os conceitos básicos sobre a produção de biogás através de reatores anaeróbico e as aplicações desta tecnologia, de forma a torná-las explícitas.

O procedimento de investigação foi conduzido com a pesquisa de campo no processo selecionado para o estudo de caso.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Matriz energética e elétrica brasileira

O Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica que responde por 65,2% da oferta interna. As fontes renováveis representam 80,4% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável (BEN, 2018).

A Figura 2.1 apresenta a matriz energética e elétrica brasileira em 2018.

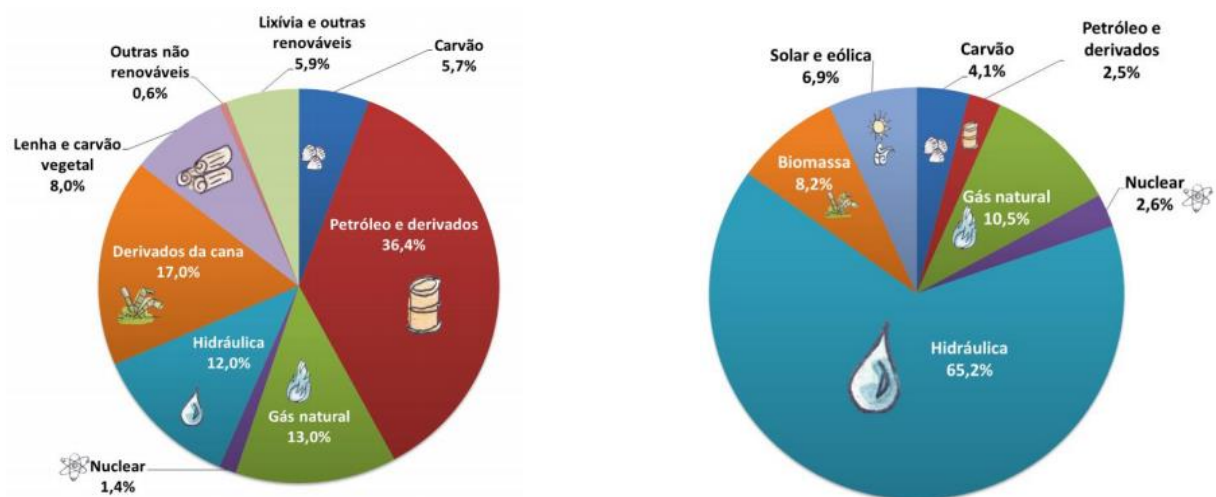


Figura 2.1: Matriz energética e elétrica brasileira
Fonte: (EPE, 2018)

Segundo o BEN (2018) a matriz energética dispõe de potencial exploratório para crescimento em diversas vertentes das renováveis. Dentre elas a produção do biogás a partir de biomassa, essa oriunda de diversos tipos de resíduos, dentre eles os efluentes industriais, estudo de caso deste trabalho.

2.2 Biomassa

A biomassa aplicada ao aproveitamento energético, é uma fonte primária de energia, não fóssil, que consiste em matéria orgânica de origem animal ou vegetal. A biomassa contém energia armazenada sob a forma de energia química (BEN, 2018).

É importante destacar que o aproveitamento energético da biomassa de origem sustentável é considerado neutro em relação a geração de CO₂, porém se faz necessário avaliar a origem da matéria prima, tecnologia utilizada no processamento e capacidade de produção. De forma ilustrativa, pode-se considerar que a utilização da biomassa por exemplo na substituição do carvão natural, tem a capacidade de redução de 0,5 toneladas de carbono emitido para cada tonelada de biomassa processada.

Já as origens das biomassas para fins energéticos podem ser classificadas nas seguintes categorias: (i) biomassa energética florestal, seu produtos e subprodutos ou resíduos; (ii) biomassa energética da agropecuária, as culturas agro energéticas e os resíduos e subprodutos das atividades agrícolas, agroindustriais e da produção animal; e (iii) rejeitos urbanos (BEN, 2018).

O aproveitamento da biomassa pode ser feito por meio da combustão direta (com ou sem processos físicos de secagem, classificação, compressão, corte/quebra etc.), de processos termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação) ou de processos biológicos (digestão anaeróbia e fermentação). As principais tecnologias de aproveitamento energético da biomassa são apresentadas na Figura 2.2 (ANEEL, 2003).

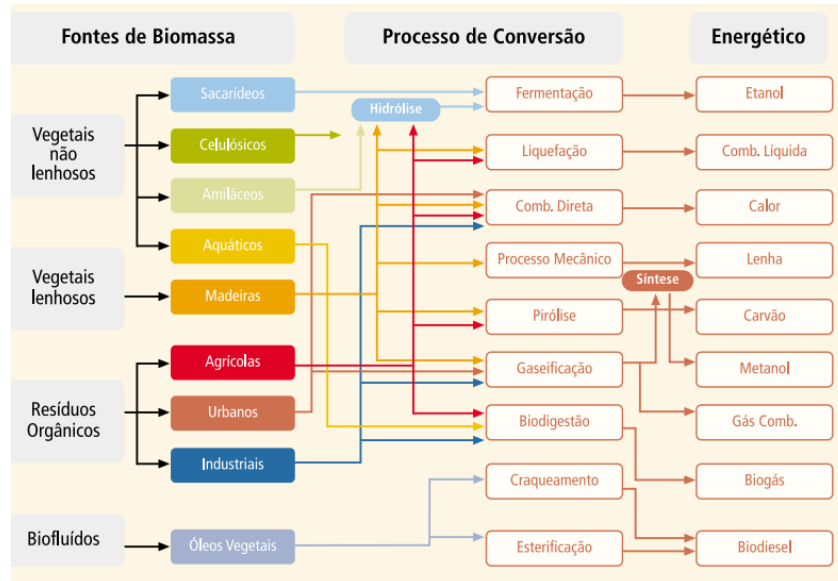


Figura 2.2: Tecnologias de aproveitamento energético
Fonte: (ANEEL, 2003)

Pode-se observar na Figura 2.2 que existem diversos tipos de aproveitamentos energéticos para diferentes tipos de biomassa, no caso dos resíduos orgânicos, tem-se a variação de origem, sendo a agrícola, urbana e a industrial. Neste estudo de caso são abordados os resíduos orgânicos industriais, com foco na biodigestão como processo de conversão para produção do biogás.

2.3 Resíduos Orgânicos Industriais

Os resíduos podem ser caracterizados como sólidos, líquidos e gasosos, sendo preciso observar que nem todas as indústrias geram resíduos com poder impactante nesses três ambientes. Como objetivo deste estudo, será avaliado o potencial do efluente de um processo de produção de celulose, o resíduo líquido.

De acordo com a Norma Brasileira — NBR 9800/1987, efluente líquido industrial é o despejo líquido proveniente do estabelecimento industrial, compreendendo emanções de processo industrial, águas de refrigeração poluídas, águas pluviais poluídas e esgoto doméstico (José Almir, 2014).

As características físicas, químicas e biológicas do efluente líquido industrial variam de acordo com o tipo de indústria, com o período de operação, com a matéria-prima utilizada, com a reutilização de água etc. Com isso, o efluente líquido pode ser solúvel ou com sólidos em suspensão, com ou sem coloração, orgânico ou inorgânico, com temperatura baixa ou elevada (José Almir, 2014).

Entre as determinações mais comuns para caracterizar a massa líquida estão as determinações físicas (temperatura, cor, turbidez, sólidos etc.), as químicas (pH, alcalinidade, teor de matéria orgânica, metais etc.) e as biológicas (bactérias, protozoários, vírus etc.). Uma das determinações mais realizadas é a da matéria orgânica total, que pode ser biodegradável ou não. Para quantificar as concentrações de matéria orgânica total e de matéria orgânica biodegradável são realizadas as determinações da Demanda Química de Oxigênio - DQO e da Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO₅ (José Almir, 2014).

A Tabela 2.1 apresenta a comparação entre a DBO e DQO.

Comparação entre DBO e DQO	
DBO	DQO
Parecida com processos naturais	Pouco parecida com processos naturais
Oxidação via microorganismos	Oxidação via reagentes químicos
Cinco dias de análise	Rápida
Pouca repetibilidade	Melhor repetibilidade

Tabela 2.1: Comparação entre DBO e DQO
Fonte: (José Almir, 2014)

Segundo (Coelho et al, 2018), o tratamento do resíduo líquido (efluente industrial ou sanitário) consiste na fase física do tratamento, como decantação e sedimentação, seguido pelos processos químicos e biológicos, tais como limpeza e digestão. A literatura também classifica como tratamento preliminar, primário e secundário, no caso do efluente de fábricas de celulose não é aplicado o tratamento preliminar, mas os outros se assemelham ao sanitário, conforme segue:

- Tratamento Primário (Efluente Industrial ou esgoto): o tratamento primário, o efluente passa por unidades de sedimentação (mecanismo físico que ocorre por meio de decantadores) para remoção de pequenos sólidos em suspensão. A formação de lodo ocorre nesta etapa do tratamento, denominado lodo primário bruto, e a eliminação média da DBO é de 30% a 40%.

- Tratamento Secundário (Efluente Industrial ou esgoto): o tratamento secundário pode ser realizado em meio aeróbio (com a presença de oxigênio) ou anaeróbio (sem a presença de oxigênio) via biodigestores. É nesta fase onde ocorre a redução dos patógenos e a remoção da matéria orgânica, podendo alcançar 90% ou mais a redução da DBO do efluente.

Ainda de acordo com (Coelho et al, 2018) o produto resultante da decomposição aeróbia é apenas o gás carbônico, já o resultado da decomposição anaeróbia é o biogás. A Figura 2.3 apresenta as rotas de conversão da matéria orgânica no tratamento de efluente, onde destaca além da diferença de produto gerado no tratamento, mas também a redução do resíduo sólido (lodo) e o ganho em efluente tratado para retorno a origem de capitação.

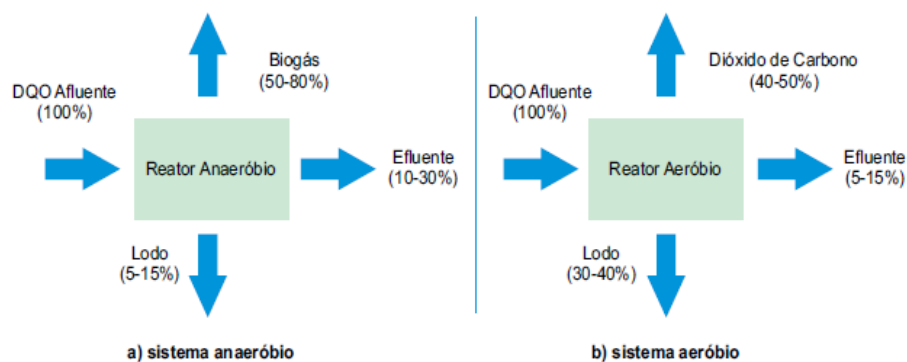


Figura 2.3: Rotas de conversão da matéria orgânica no tratamento de efluente1
Fonte: (CHERNICHARO, 2007).

2.4 Processo de Digestão anaeróbica

A digestão anaeróbica consiste na decomposição do material pela ação de bactérias (microrganismos acidogênicos e metanogênicos). Trata-se de um processo simples, que ocorre naturalmente com quase todos os compostos orgânicos. A digestão anaeróbica de matéria orgânica basicamente segue as seguintes etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, conforme apresentado na Figura 2.4 (AQUINO E STUCKEY, 2008; FLOTATS, 2013).

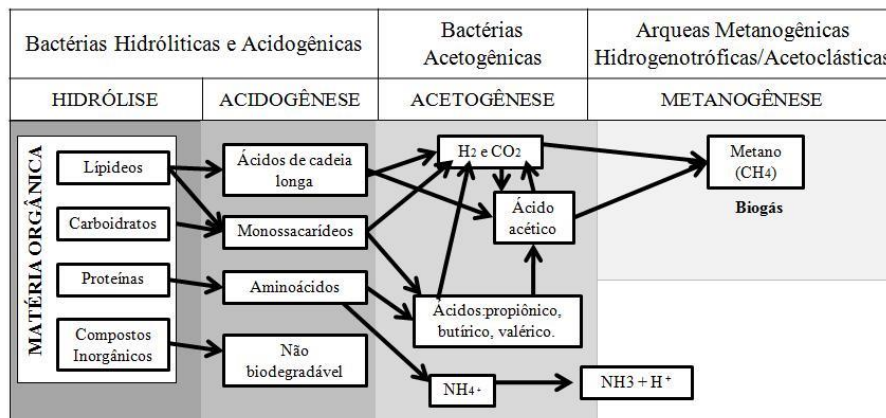


Figura 2.4: Fases do processo anaeróbico
Fonte: (AQUINO E STUCKEY, 2008; FLOTATS, 2013)

A primeira fase da digestão anaeróbica é a hidrólise. Nesta fase as proteínas, carboidratos e gordura do substrato são convertidos em substâncias orgânicas solúveis (aminoácidos e ácidos graxos) pela ação de enzimas extracelulares excretadas pelas bactérias hidrolíticas (LORA e VENTURI, 2012). A hidrólise tem grande importância na velocidade global de degradação. Esta etapa pode ser um fator limitante do processo quando o material orgânico presente contiver alta concentração de sólidos ou grandes quantidades de celulose, diminuindo a velocidade do processo (LI et al., 2011).

Os produtos formados na fase anterior são degradados pelas bactérias acidogênicas durante a acidogênese (segunda etapa do processo), gerando ácidos carboxílicos de cadeia curta, os ácidos voláteis (fórmico, acético, propiônico, butírico, valérico). As bactérias acidogênicas também produzem alguns compostos

secundários, como amônia, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio (TABATABAEIA et al., 2010).

A terceira etapa do processo de digestão anaeróbia é a acetogênese, onde a maior quantidade de ácidos e álcoois produzidos pela acidogênese são convertidas pelas bactérias acetogênicas, produzindo ácido acético, bem como o dióxido de carbono e o hidrogênio. Esta conversão é controlada em grande parte pela pressão de hidrogênio na mistura. Esta fase é considerada a mais crítica do processo, sendo conduzida por um grupo de bactérias denominadas acetogênicas, as quais estabelecem relação de simbiose com as arqueas metanogênicas e as bactérias homoacetogênicas. A simbiose entre os organismos dos dois grupos microbianos distintos possibilitam que ambos apresentem crescimento, assegurando a viabilidade de produção de acetato a partir de ácidos orgânicos (APPLES et al. 2008; SANT'ANNA Jr., 2010).

A última etapa é a metanogênese, onde ocorre a formação de metano (CH_4) por duas rotas principais, por meio do ácido acético ou do hidrogênio (doador de elétrons) e dióxido de carbono (aceptor de elétrons) presente no meio (APPLES et al., 2008).

Na presença de compostos de enxofre, surge a etapa de sulfetogênese, onde sulfatos, sulfitos e outros compostos sulfurados serão reduzidos a sulfeto, durante a oxidação de compostos orgânicos através da ação das bactérias redutoras de sulfato (BRS). Ao utilizarem compostos com enxofre, como receptoras de elétrons, essas bactérias competem por substrato com as arqueas metanogênicas, como ácidos graxos voláteis, hidrogênio, metanol, etanol, glicerol, açúcares, aminoácidos entre outros. Por utilizarem compostos intermediários da digestão anaeróbia, elas alteram a rota do metabolismo gerando menor quantidade de metano na constituição do biogás (APPLES et al. 2008; SANT'ANNA Jr., 2010).

Em termos energéticos, o produto final é o biogás, uma mistura de gases produzidos pela decomposição natural de matéria orgânica por micro-organismos em anaerobiose (Pires, 2009). Sua composição varia de acordo com a matriz orgânica, a composição média é retratada na Tabela 2.2. (Nogueira, 1986; CETESB, 2014).

Composição	Nogueira (1986)	CETESB (2014)
Metano (CH ₄)	55 - 75 %	50 - 70 %
Dióxido de Carbono (CO ₂)	25 - 45 %	25 - 50 %
Nitrogênio (N ₂)	0 - 3 %	0 - 7 %
Hidrogênio (H ₂)	0 - 2 %	0 - 1 %
Gás Sulfídrico (H ₂ S)	0 - 1 %	0 - 3 %

Tabela 2.2: Composição média do Biogás em percentual de volume
Fonte: (Nogueira, 1986); CETESB, 2014

O poder calorífico do biogás pode chegar até 11.661,02 kcal.kg⁻¹ com um grau de purificação extremamente alto, em torno de 99% CH₄ e 0,1% CO₂, garantindo semelhança com o gás natural combustível (Iannicelli, 2008). Segundo Ross et al. (1996), biogás com 65% de metano equivale a 0,6 m³ de gás natural.

2.4.1 Biodigestores utilizados para a digestão anaeróbica de efluentes

O processo de digestão anaeróbica é feito por meio de biodigestores. Desenvolvido há séculos pelos chineses e indianos, o biodigestor teve sua origem na produção de fertilizantes e posteriormente foi identificado seu potencial na geração do biogás, que pode ser utilizado para a geração de energia (elétrica e/ou térmica) ou então transformando em biometano para substituir o gás natural. Dentre os diversos modelos existentes de biodigestores, os modelos chinês e indiano são os mais conhecidos na literatura.

O biodigestor modelo indiano possui uma campânula móvel utilizada como gasômetro, acoplada na parte superior, que pode se deslocar verticalmente conforme ocorre a produção de biogás, permitindo que o sistema opere a pressão constante. Possui também uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras, permitindo maior recirculação do efluente por todo o biodigestor (DEGANUTTI et al., 2002). A Figura 2.5 apresenta o esquema estrutural do biodigestor Indiano

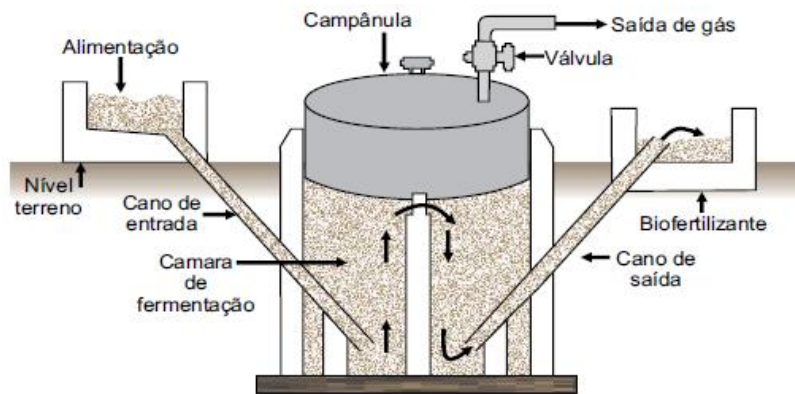


Figura 2.5: Biodigestor Indiano
Fonte: (PERLINGEIRO, 2014)

O biodigestor modelo chinês é constituído por uma câmara cilíndrica, geralmente de alvenaria, com teto impermeável destinado ao armazenamento do biogás produzido (gasômetro, que neste caso não é móvel) (BENINCASA et al., 1990). A Figura 2.6 apresenta o esquema estrutural do biodigestor Chinês.

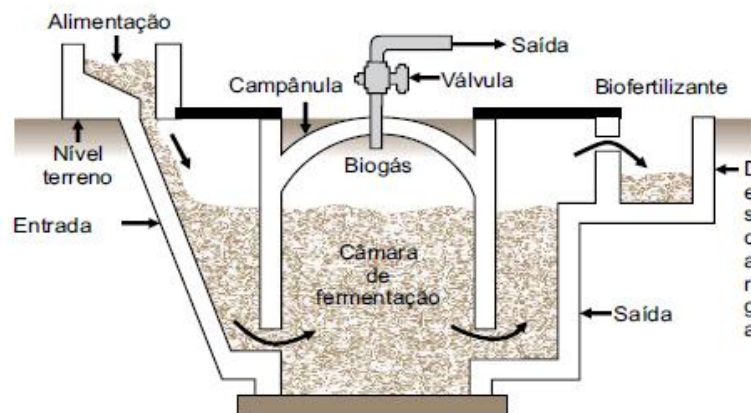


Figura 2.6: Biodigestor Chinês
Fonte: (PERLINGEIRO, 2014)

A tecnologia predominante relacionada aos sistemas anaeróbios no Brasil é denominado de biodigestor UASB (Up-flow Anaerobic Sludge Blanket), também conhecido como RAFA (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente).

De acordo com (Coelho et al, 2018) o biodigestor UASB é o mais difundido para o tratamento de esgoto sanitário e também pode ser usado para o tratamento de matéria orgânica presente em resíduos urbanos e rurais. A Figura 2.7 apresenta o esquema geral do biodigestor UASB.

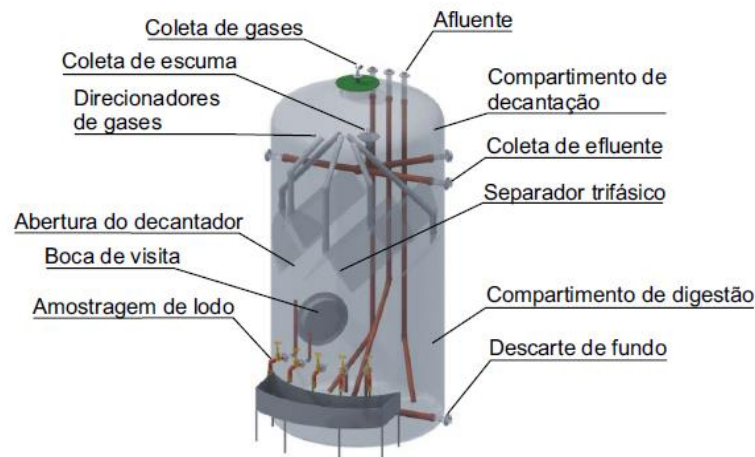


Figura 2.7: Esquema geral do biodigestor UASB
 Fonte: (NOVA ERA AMBIENTAL, 2018)

Ainda segundo (Coelho et al, 2018), o biodigestor UASB permite o tratamento de efluentes com elevada carga orgânica ($DBO > 1.000 \text{ mg/L}$) e baixo tempo de retenção hidráulica (TRH de 4 a 12 horas, dependendo das características do efluente). Seu princípio de funcionamento baseia-se no fluxo ascendente, ou seja, o efluente entra no biodigestor pela parte inferior, atravessa uma manta de lodo que permite a remoção da matéria orgânica, e sai pela parte superior após passar por placas defletoras (também denominadas de separadores trifásicos) que, além de direcionarem o biogás produzido para o topo do biodigestor, funcionam como sedimentadores promovendo a separação das fases sólida e líquida, garantindo uma maior retenção de biomassa no interior do reator.

A tabela 2.3 apresenta as vantagens e desvantagens do Biodigestor UASB.

Biodigestor UASB	
Vantagens	Desvantagens
Alto grau de estabilização do efluente	Necessidade de um pós-tratamento
Baixa produção de lodo	Temperatura relativamente alta (30-35°C)
Baixa demanda por área e custos baixos na implantação	Baixa velocidade do crescimento das bactérias metanogênicas
Baixo consumo de energia	Baixa remoção de nitrogênio, fosforo e patógenos
Possibilidade de manutenção da biomassa, sem alimentação do reator	Possibilidade de geração de maus odores e corrosão
Tolerância a elevadas cargas orgânicas	Eficiência entre 65-80% em termo de remoção DBO
Baixa remoção de nutrientes	
Metano como produto final	

Tabela 2.3: Biodigestor UASB
Fonte: (FEAM, 2015)

Na busca pela evolução do reator UASB, seguiu-se uma tendência de ampliação do leito de lodo na relação diâmetro e altura, de forma a ganhar desempenho e economizar espaço ocupado pelos reatores. Esta nova família foi denominada EGSB (Reatores de Leito Granular Expandido), onde destaca-se o reator IC (Reator de Circulação Interna), que tem como detentor de sua patente a empresa Holandesa PAQUES.

Segundo (Claudio Piazza, 1999), o reator IC consiste de dois reatores UASB superpostos um sobre o outro, um alimentado com alta carga orgânica e o outro com uma carga menor, onde sua característica especial é a separação do biogás em dois estágios dentro do reator. O gás coletado no primeiro estágio, na metade da altura do reator, produz uma pressão ascendente que é usada para promover uma circulação interna do substrato. O sistema IC é um reator delgado com altura entre 16 e 24 m e superfície de área relativamente pequena (ver Figura 2.8).

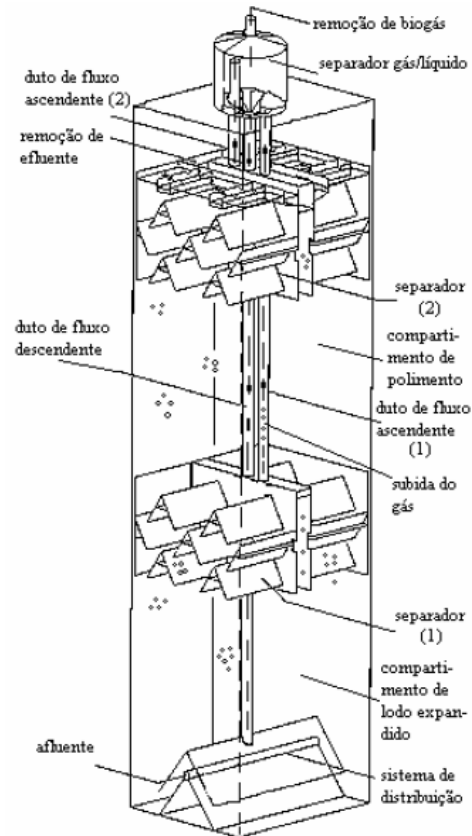


Figura 2.8: Reator de Circulação Interna
Fonte: Driessen, 1996.

O afluente é bombeado para dentro do reator via sistema de distribuição, onde ocorre a mistura entre este, o lodo reciclado e o efluente. O primeiro compartimento contém o leito de lodo granular expandido e é onde a maior parte da DQO é convertida em biogás (Claudio Piazza, 1999).

O biogás produzido neste compartimento é coletado pelo primeiro conjunto de separadores e usado para gerar a pressão que permite que a mistura de resíduo em processamento e lodo bacteriano seja carregada pelo primeiro duto de fluxo ascendente, até um separador gás/líquido no topo, onde ocorre a separação (Claudio Piazza, 1999).

O biogás, livre da mistura, deixa o sistema, e esta é direcionada, pelo primeiro duto de fluxo descendente, de volta ao fundo do reator, onde é novamente misturada ao leito de lodo e ao afluente que entra no reator. O efluente do primeiro compartimento sofre um pós-tratamento no segundo (compartimento de polimento), onde a DQO restante é removida (Claudio Piazza, 1999).

O biogás produzido neste compartimento é coletado no separador superior, enquanto que o efluente transborda, deixando o reator (Driessen, 1996; Verstraete, 1986).

A taxa de recirculação dos reatores IC depende da DQO do afluente, pois é proporcionada, como já foi dito, pela produção de biogás, sendo, portanto, auto regulada; isto é, quanto maior a concentração de DQO do afluente, maior a pressão do biogás produzido no primeiro compartimento e mais resíduo em processamento e lodo são novamente circulados pelo primeiro duto de fluxo ascendente; e, similarmente, quanto menor a concentração de DQO do afluente, menor pressão do biogás e menor a taxa de recirculação interna do efluente (Claudio Piazza, 1999).

2.5 Biogás e Biometano

O biogás é uma mistura gasosa combustível composta principalmente de metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2), derivada da atividade biológica durante a decomposição de resíduos orgânicos em meio anaeróbio (sem a presença de oxigênio) (SAAE, 2006).

A composição do biogás varia de acordo com o substrato a ser degradado e com as condições físicas e químicas que influenciam no processo da biodigestão anaeróbia. De acordo com Wereko-Brobby & Hagen (2000) a composição volumétrica típica do biogás é cerca de 60% CH_4 , 35% CO_2 e 5% de outros gases: nitrogênio, amônia, gás sulfídrico, monóxido de carbono e oxigênio, entre outros (SAAE, 2006).

Observa-se na Tabela 2.4 a composição média do biogás comparada a outras duas misturas gasosas: Gás Natural e Gás de Síntese (SynGas), proveniente do processo de gaseificação de biomassa.

Compostos	Unidade	Concentração (%)		
		Biogás	Gás Natural	SynGas
Metano (CH ₄)	Vol. %	55 - 70	91	0 - 15
Etano (C ₂ H ₆)	Vol. %	0	5,1	0
Propano (C ₃ H ₈)	Vol. %	0	1,8	0
Butano (C ₄ H ₁₀)	Vol. %	0	0,9	0
Pentano (C ₅ H ₁₂)	Vol. %	0	0,3	0
Gás Carbônico (CO ₂)	Vol. %	25 - 40	0,61	25 - 35
Hidrogênio (H ₂)	Vol. %	0	0	20 - 40
Gás Sulfídrico (H ₂ S)	Vol. %	0,5 - 1	< 0,001	0
Nitrogênio (N ₂)	Vol. %	< 0,001	0,32	2 - 5.
Amônia (NH ₃)	Vol. %	< 0, 01	< 0,001	< 0,001
Monóxido de Carbono (CO)	Vol. %	< 0,01	0	35 - 40

Tabela 2.4: Intervalo de composição de misturas gasosas combustíveis
 Fonte: (MONET, 2003; PERLINGEIRO, 2014)

O biogás pode ser utilizado para diferentes finalidades, são elas: produção de eletricidade, fins térmicos, substituição de combustíveis fósseis convencionais em veículos e também injeção em redes de distribuição de gás natural. Entretanto, para seus diversos usos finais é necessário que o biogás seja purificado, como é o caso da utilização em substituição do gás natural.

O tratamento a ser aplicado ao biogás depende das suas características, outro fator importante são as exigências tecnológicas de aproveitamento energético. Um dos principais componentes que deve ser removido do biogás é o gás sulfídrico (H₂S), este altamente corrosivo para a maioria dos equipamentos utilizados nos processos de conversão energética. Ainda a ser removida, temos a umidade, que tem influência direta no poder calorífico, afetando o processo de queima, a temperatura adiabática de chama e influenciando nos limites de inflamabilidade. Segundo (Coelho et al, 2018), por exemplo para uso veicular ou injeção nas redes de distribuição de gás natural é necessário que seja também removido do biogás o CO₂ presente.

Segundo (Coelho et al, 2018), ao remover os constituintes, e outras impurezas, o biogás apresenta uma fração elevada de metano (> 95%) e passa a ser denominado biometano, que pode ser utilizado como substituto ao gás natural. A

Figura 2.9 ilustra as possíveis utilizações já comercializadas do biogás e do biometano.

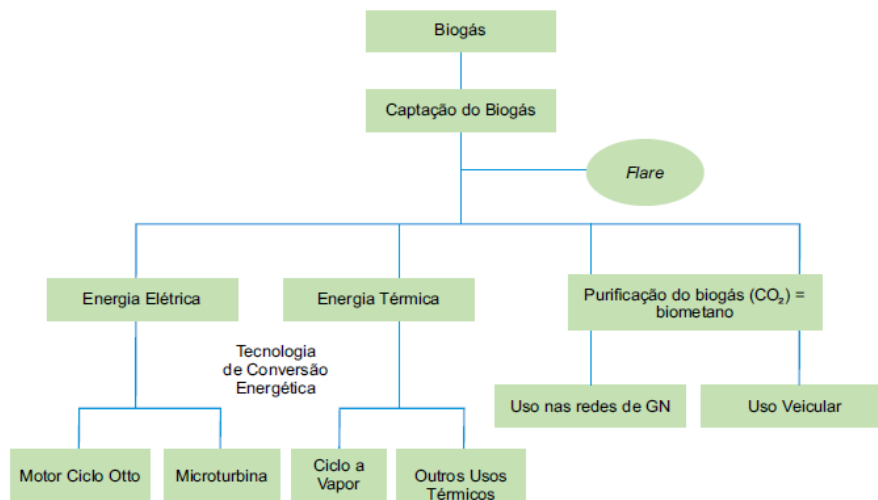


Figura 2.9: Possíveis utilizações já comercializadas do biogás/biometano
Fonte: (Coelho et al, 2018).

Nessa forma, o biogás pode ser utilizado em ciclos combinados de calor e eletricidade para produção de energia. Outras formas de aproveitamento são em substituição ao diesel em equipamentos agrícolas, ao gás natural veicular ou na própria injeção a rede de gás natural.

2.6 Bioeconomia

A bioeconomia pode ser definida como um conjunto de atividades nas quais os blocos de construção básicos para materiais, produtos químicos e energia são derivados de recursos biológicos renováveis (McCORMICK; KAUTTO, 2013).

A bioeconomia possibilita um fortalecimento das relações entre as atividades do setor primário, como a agricultura, e as atividades da indústria de transformação e dos serviços, tornando os segmentos de um mesmo processo e contribuindo, assim, para o desenvolvimento econômico.

No Brasil a definição de bioeconomia decorreu por meio de suas aplicações, notadamente nas atividades econômicas apontadas abaixo:

- Produção primária, ou agronegócio, que inclui a criação de plantas e animais e as aplicações veterinárias;
- Produção de biocombustíveis;
- Biotecnologia industrial, envolvendo o processamento e a produção de produtos químicos, plásticos e enzimas;
- Aplicações ambientais, como biorremediação, biossensores e outros métodos para reduzir impactos ambientais; e
- Saúde humana (particularmente biotecnologia médica), englobando novos procedimentos diagnósticos e terapêuticos, como farmacogenética, alimentos funcionais e equipamentos médicos (CNI, 2013; Parisi e Ronzon, 2016)

Por essa razão, a bioeconomia tem sido vista como uma oportunidade para a agricultura brasileira utilizar e aprimorar todo o seu potencial de produção de alimentos, fibras, energia e novos produtos (IPEA, 2017). Os governos de vários países têm direcionado políticas e incentivos ao uso de fontes de insumos renováveis, o que pode tanto contribuir para solucionar problemas ambientais como estimular o crescimento econômico e dos empregos. Além dos governos, muitas empresas têm reafirmado seu compromisso de utilização de insumos biológicos em favor de um modelo econômico mais sustentável (MORRISON; GOLDEN, 2015).

As unidades industriais chamadas de biorrefinarias são destinadas a utilizar como insumos fontes renováveis tais quais a biomassa e, dessa maneira, reduzir a atual dependência de combustíveis fósseis como o petróleo nas refinarias.

A Figura 2.10 mostra algumas matérias-primas que podem ser originadas das biomassas, as tecnologias de processos e os produtos que poderiam ser obtidos em biorrefinarias, denominados de bioderivados.

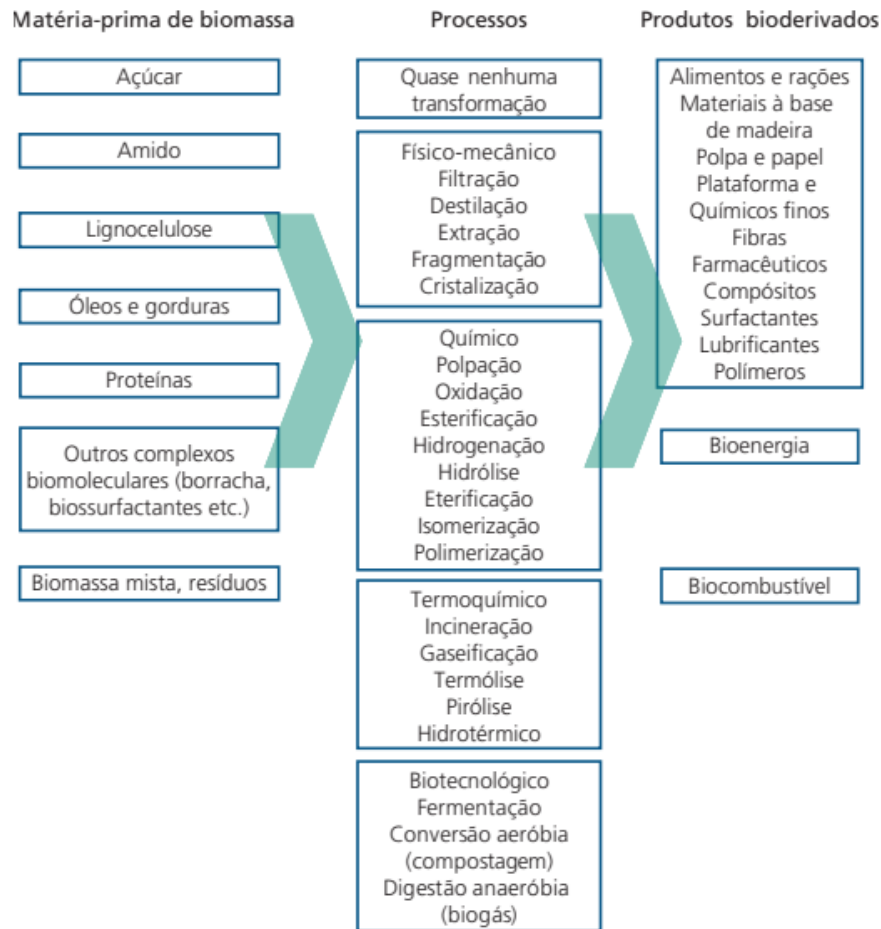


Figura 2.10: Matéria-prima de biomassa, processos e produtos
 Fonte: PIOTROWSKI, S.; CARUS, M.; CARREZ, D. European bioeconomy in figures. Industrial Biotechnology, v. 12, p. 78-82, 2016.

A implantação prática do conceito de biorrefinarias não será uma tarefa fácil. Além da necessária viabilização técnica e econômica de novos processos produtivos, ela deverá envolver a integração entre diferentes plantas de manufatura e destas com outras atividades, algumas de outros setores econômicos, como a agricultura, a pecuária, serviços ou outras indústrias de transformação.

As plantas de celuloses são por natureza consideradas biorrefinarias, onde sua matriz energética é em média mais de 95% de fontes renováveis, com combustíveis como o licor negro, biomassa e metanol. A bioeconomia neste setor deve ser discutida para promover estudos e incentivos para alcançar o uso de fontes renováveis na matriz energética e otimizar os processos existentes.

2.7 Cogeração

Para utilizar o biogás como combustível em motores de combustão interna é necessário que sejam removidos o gás carbônico e o gás sulfídrico (Coelho, 2006).

A purificação do biogás é importante, pois o gás sulfídrico, por ser um gás com alto poder de corrosão, pode deteriorar os equipamentos, e por outro lado, a remoção do gás carbônico aumenta o poder calorífico, uma vez que mantém armazenada maior densidade de biogás concomitantemente a diminuição da presença de gás abafante presente (Oliveira, 2009).

Para efeito comparativo, foram avaliadas três alternativas, sendo elas: (i) motores ciclo Otto (motores de combustão interna com ignição); (ii) turbinas a gás em ciclo Brayton e (iii) ciclo combinado com turbina a gás operando com caldeiras de recuperação de calor (HRSG) integradas ao ciclo Rankine com turbinas a vapor.

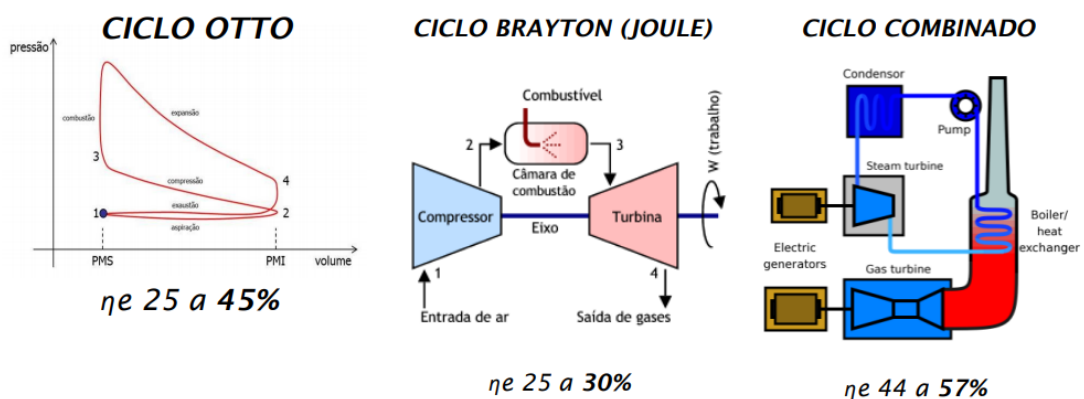


Figura 2.11: Rendimento teórico de cogeração
 Fonte: Aula de Cogeração, 2019

O ciclo termodinâmico que tem por característica a combustão interna a partir de ignição por centelha é denominado de ciclo Otto (Figueiredo et al., 2013). Estes motores operam em quatro tempos, ou seja, inicialmente há a entrada da mistura ar/combustível (admissão), depois ocorre a compressão desta mistura em câmara fechada, seguida de sua ignição, gerada por centelha elétrica, e por fim, a saída dos gases de combustão (Andrade, 2007).

As turbinas a gás operam no chamado ciclo Brayton, funcionam com fluido de trabalho em estado gasoso, por isso a denominação de turbina a gás. O ar é

admitido por um compressor, de forma contínua e sofre processo de compressão em alta pressão. Posteriormente é direcionado à câmara de combustão para, junto com o combustível, gerar um fluxo contínuo de ar de elevada temperatura e energia. Este fluxo é direcionado à turbina de potência expandindo-se e gerando energia.

Na busca de aumentar o rendimento, o ciclo combinado é utilizado, isto porque ele é realizado a partir da combinação de dois ou mais ciclos. É considerado de alta eficiência (Colotta et al., 2010; Leo et al., 2003).

Para utilização do ciclo combinado para geração de energia elétrica a turbina pode ser a gás ou a vapor (Azevedo, 2001).

2.8 Case de produção do Biogás (Efluente do processo de Celulose e Papel)

Como pesquisa exploratória foram encontrados alguns cases de produção do biogás em indústrias do segmento de celulose e papel. Como pode ser observado, no Brasil ainda é inicial a aplicação e requer maior aporte de pesquisas e fabricantes da tecnologia. No mundo, a China se destaca com grande volume de plantas de biogás no segmento, bem à frente de outro país pioneiro na produção de biogás, a Índia.

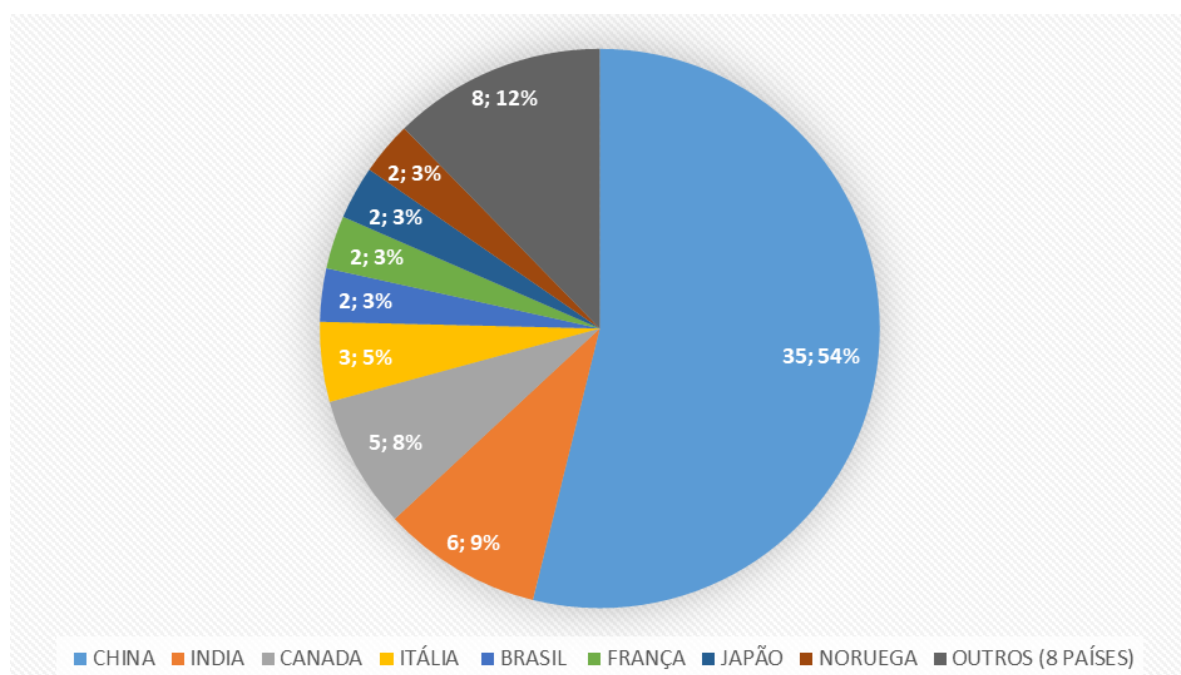


Figura 2.12: Plantas de Biogás em Indústrias de Celulose e Papel
Fonte: Autor, 2019.

Estes são exemplos de plantas de um único fabricante, a qual disponibilizou os dados para o estudo. As plantas variam seus anos de implantação de 1988 como o caso Quesnel River Pulp, empresa do Canada até mais atuais como a Jinfenghuang Paper, localizada na China. As duas empresas brasileiras já não dispõem mais da tecnologia devido a mudança de seus produtos, onde o processo foi totalmente modificado e ou desativado. Por meio destes dados foi possível identificar a aplicação do reator IC em plantas de fabricação de celulose, papel e ou produtos semelhantes. Os dados destes cases podem ser encontrados no anexo 1.

3. SETOR DE CELULOSE

O setor de papel e celulose é bastante representativo para a economia nacional e também para o cenário mundial. Isto é devido à receita gerada, aos elevados investimentos e devido, também, ao impacto que esse setor tem sobre os outros diversos setores econômicos, tanto para os que se encontram antes quanto depois de sua cadeia produtiva.

A indústria de celulose apresenta características diferentes dos demais mercados, devido ao fato de possuir um elevado nível de desenvolvimento tecnológico, que utiliza instalações industriais com grande capacidade de produção, uma ampla base de recursos florestais plantados e intenso capital aplicado em tecnologia.



Figura 3.1: Ranking dos dez maiores produtores mundiais de celulose em 2015
 Fonte: GEDF-CD/FIEP (2016) a partir dos dados da FAO (2016)

A produção de celulose mundial equivale a 180,9 milhões de toneladas. Segundo os diferentes tipos de processos (químicos, de alto rendimento, semiquímico e pastas de outras fibras), onde 74% da produção mundial equivale à produção de celulose pelo processo químico, o que representa aproximadamente 135 milhões de toneladas.

A produção de celulose selecionada para este estudo de caso é proveniente do processo químico, onde se concentra em 9 países que juntos representam mais

de 84% da produção mundial. Observa-se os EUA como maior produtor, com a produção de 42,1 milhões de toneladas de celulose, provenientes do processo químico, em 2015 (Figura 3.2).

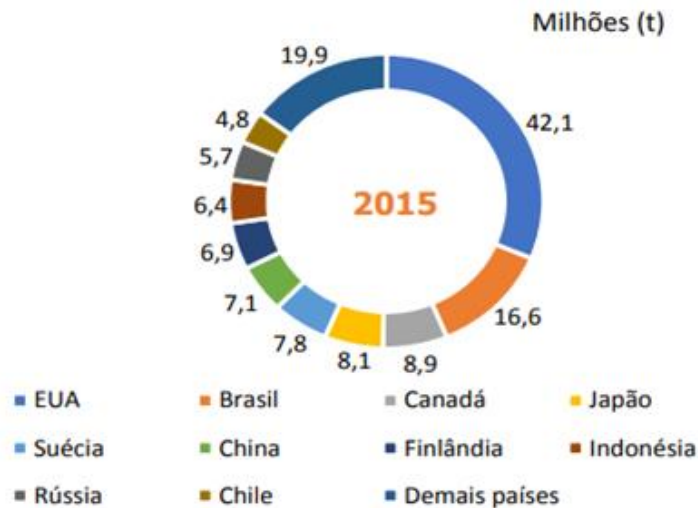


Figura 3.2: Ranking da Produção mundial de celulose oriunda do processo químico
Fonte: GEDF-CD/FIEP (2016) a partir dos dados da FAO (2016)

Em 2016, a indústria de papel e celulose foi responsável por 14,7 % do consumo energético industrial, e o segmento da cadeia de papel e celulose foi responsável por 4,8 % do consumo energético total do País, revelando a marcante característica eletro intensiva desta indústria, sendo responsável por 21,93% do consumo final de energia elétrica do setor industrial brasileiro, algo em torno de 18.284 GWh. Esse setor é marcante por ser responsável a gerar grande parte da energia elétrica consumida, sendo responsável por 48,1% da energia total autoproduzida em todo segmento industrial brasileiro, algo em torno de 11.639 GWh (EPE – 2017/2026).

As plantas podem ser projetadas para produção de celulose, somente papel ou celulose e papel. O processo de fabricação da celulose começa com o preparo de cavaco, onde a madeira é cortada e classificada, logo esse material segue para os digestores, onde ocorre o cozimento com vapor direto aquecido sob pressão e adição de licor branco. Posteriormente ocorre a etapa de desilignação que consiste na separação do material nos depuradores e a lavagem da pasta de celulose, logo o produto das fibras segue para o branqueamento e por uma filtragem, onde retém a maior parte de sólidos. Essa solução retida contém material orgânico do processo do

cozimento, e este segue para o processo de recuperação química. Por fim a celulose segue para a secagem e enfardamento e é enviada para expedição. Predominantemente as empresas são autossuficientes em energia elétrica e alguns grandes grupos exportam energia para rede.

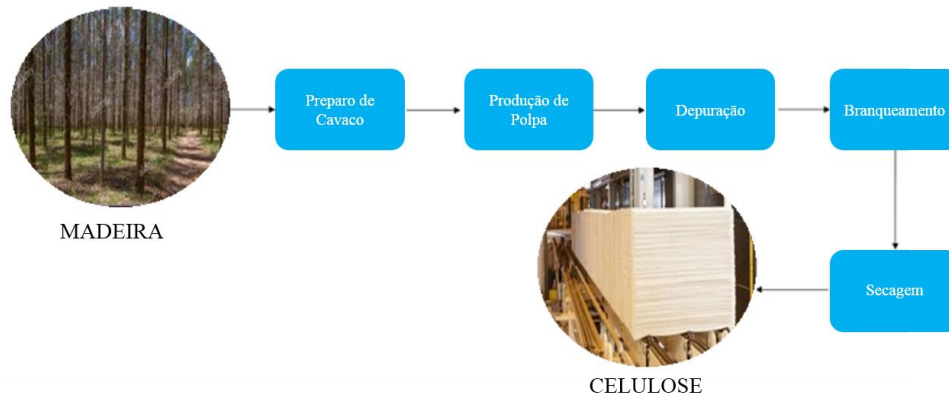


Figura 3.3: Fluxograma das etapas de produção de Celulose
Fonte: Autor 2019

A celulose aplicada ao processo de fabricação de papel varia com o tipo de fibra, devido às características mecânicas diversas. De uma forma geral, os papéis de imprimir e escrever, os papéis sanitários e alguns tipos de papel cartão, são fabricados a partir de fibras curtas, que proporcionam maior opacidade e maciez. Os papéis para embalagem, papelão ondulado e outros tipos de papel cartão são fabricados a partir de fibras longas, que propiciam maior resistência mecânica. Existem também as chamadas pastas de alto rendimento, que são utilizadas na produção de papel imprensa e revista.

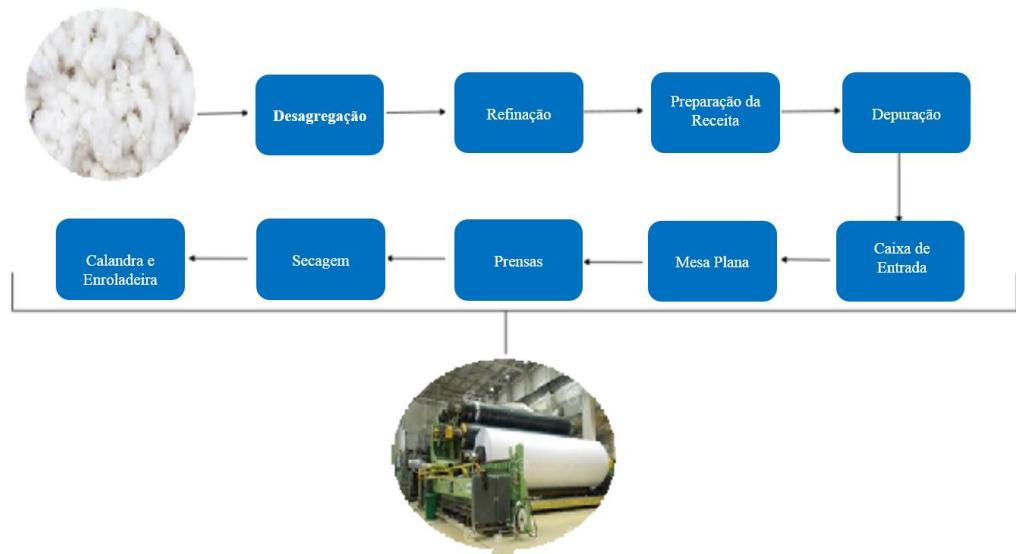


Figura 3.4: Fluxograma das etapas de produção de Papel
Fonte: Autor, 2019.

Para as fabricas integradas, a pasta já vem em suspensão e é armazenada em tanques de distribuição de massa, apropriando um ganho térmico, já que não há a etapa de secagem da celulose. As plantas integradas são mais eficientes em termos de energia do que a combinação de uma fábrica de celulose e fábrica de papel já que a secagem da polpa pode ser evitada. A maioria das melhorias na eficiência energética alcançadas até agora vieram de fábricas integradas de celulose e papel em que a maior parcela do calor recuperado está no processo de secagem de papel.

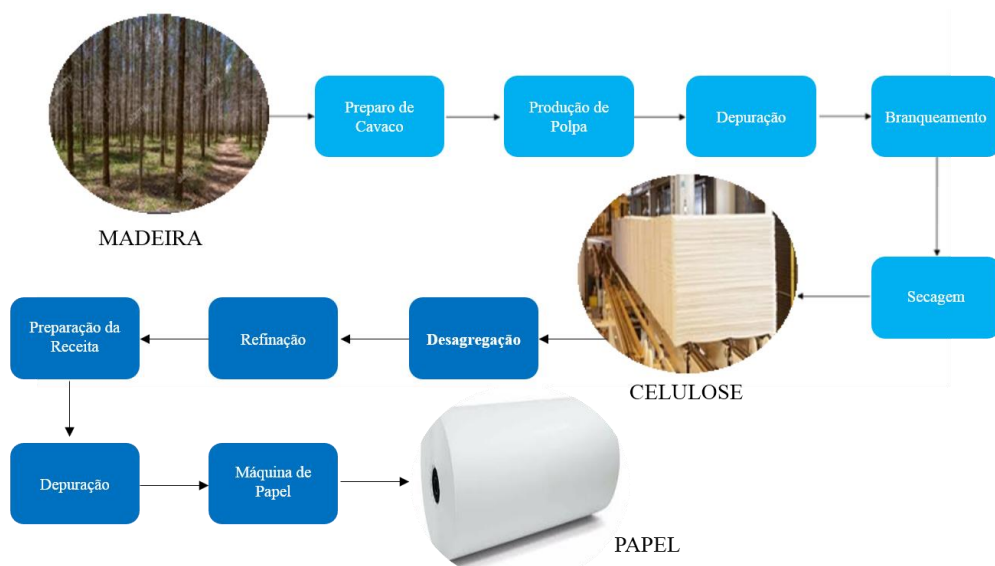


Figura 3.5: Fluxograma das etapas de plantas integradas com secagem de polpa
Fonte: Autor, 2019.

As fábricas integradas de pasta de celulose e papel também possuem uma vantagem nos custos de fabricação em relação às fábricas que somente produzem papel, já que nas primeiras se elimina a necessidade de secagem da pasta de celulose. Esta etapa representa um desperdício, em termos de consumo de energia, uma vez que a pasta seca deve ser novamente dispersa em água antes de ser processada na máquina de papel.

As fábricas de celulose de mercado que não são integradas geralmente secam a celulose, para facilitar seu manuseio e reduzir as despesas com o frete, e entregam a celulose na forma de fardos às fábricas de papel. A unidade do estudo de caso se caracteriza como uma unidade integrada porém com processo de secagem de 92% da produção total, desta forma os benefícios da integração quase não são perceptíveis para o balanço energético.

3.1 Processo de Fabricação de Celulose

A fabricação de celulose começa na floresta, onde são plantadas e cultivadas as árvores de eucalipto. Cada árvore leva de 6 a 15 anos para estar pronta para colheita. Os eucaliptos já descascados e cortados em toras, são transportados via rodoviária, ferroviária ou marítima.

A madeira é feita principalmente de fibras celulósicas aderidas umas às outras com uma "cola" chamada lignina. Para converter madeira em polpa, se deve separar estas fibras, ou seja, remover a lignina. Existem duas maneiras de romper as ligações na madeira e liberar as fibras: Processo mecânico ou Processo químico.

O Processo mecânico utiliza predominantemente energia mecânica, com pouca ou nenhuma substância química. Esse processo se divide em duas etapas, o primeiro consiste no desfibrilamento, onde toras de madeira são forçados contra uma pedra em revolução que possui superfície abrasiva. O segundo é chamado de refinação, uma evolução na produção mecânica, onde os cavacos de madeira são lançados entre dois discos metálicos de superfícies abrasivas, sendo que um deles em revolução.

O consumo de energia elétrica para produzir uma tonelada de polpa é significativamente maior no primeiro caso. A celulose que resulta desse processo é

conhecida como pasta de alto rendimento e possui um elevado teor de lignina e, por isso, tende a amarelar mais rápido. Devido a essa característica, a celulose mecânica é considerada um bem de qualidade menor e é utilizada para a fabricação de papéis menos nobres, como o papel de imprensa.

O Processo Químico é muito utilizado na indústria de celulose e papel com a utilização de produtos químicos e calor para dissolver a lignina. A celulose permanece quase intacta e uma fração de polioses permanece na polpa. O equipamento mais utilizado no processo químico de produção de pastas de celulose é um recipiente aquecido e pressurizado que se chama digestor, no qual os cavacos de madeira são inseridos, junto com produtos químicos.

Esta ação no vaso digestor é denominada de Cozimento, basicamente consiste em submeter os cavacos de madeira a uma ação química do licor branco forte e do vapor d'água no digestor a fim de dissociar a lignina entre a fibra e a madeira. Esse processo pode ocorrer em dois meios: alcalino (Kraft e Soda) e ácido (Sulfito).

O processo alcalino, também denominado de kraft ou sulfato, os cavacos de madeira são digeridos em solução química, sob uma pressão de 6,8 a 9,2 atm, temperatura de 170 a 177° C, durante 2 a 5 h, podendo ser aplicado a uma grande variedade de espécies de madeira. Após a reação, os produtos de hidrólise da lignina e das hemiceluloses, assim como os extraíveis, permanecem em solução, formando o que é denominado de licor negro.

No processo sulfito, os cavacos de madeira são digeridos em uma mistura de ácido sulfuroso e íons bissulfito a uma pressão de 6,1 a 7,5 atm, a uma temperatura de 125 a 160° C por um período de 6 a 12 h. A polpa obtida nesse processo é muito utilizada para a produção de papéis brancos.

No capítulo 4 todas as etapas do processo de produção da celulose serão apresentadas. A Figura 3.6 exemplifica o fluxo do processo de fabricação da celulose.

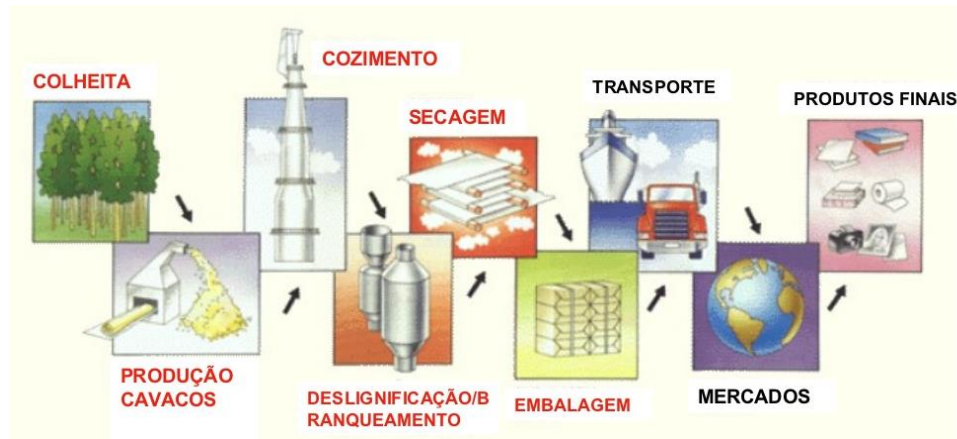


Figura 3.6: Processo de Fabricação da Celulose
 Fonte: Documento interno, julho 2015

3.2 Resíduos do Processo de Fabricação de Celulose

Os resíduos são gerados em diferentes etapas no processo de transformação da madeira de eucalipto em celulose. Inicialmente há o processo de preparação da madeira, onde entre o corte e a picagem, tem-se a geração de casca, areia e finos de cavaco como resíduos, estes utilizados na caldeira de biomassa para geração de vapor.

No processo de digestão da madeira, alvejamento da polpa marrom e secagem da polpa branqueada, são descartados os resíduos denominados nó, palitos e aparas de celulose. Na etapa de recuperação química, onde a lignina é concentrada e utilizada como combustível nas caldeiras, tem-se a geração de cinzas e dregs². Já no processo subsequente, nos fornos de cal e caustificadores, temos a geração do grits e CaO^3 . A Figura 3.7 apresenta os resíduos gerados no processo de fabricação da celulose.

² Dregs são os sólidos suspensos presentes no licor verde bruto, o licor verde bruto por sua vez é a solução química produzida no tanque de dissolução, quando o fundido de saída das caldeiras de recuperação química é dissolvido com licor branco fraco.

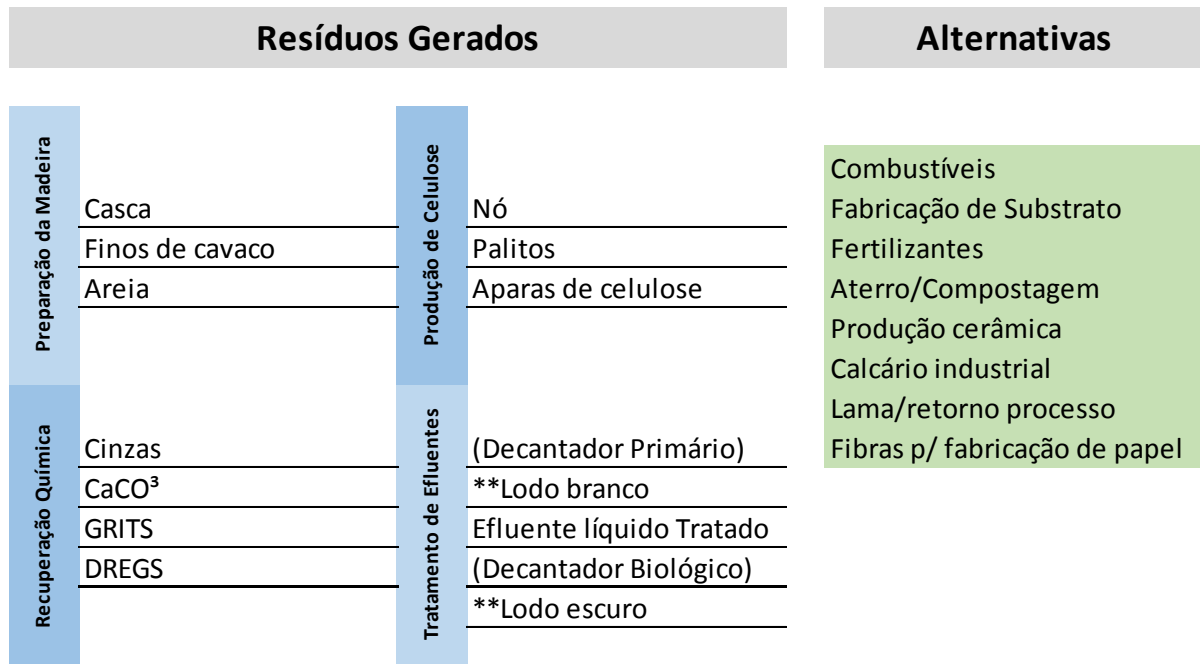


Figura 3.7: Resíduos Gerados no processo
 Fonte: Autor, setembro 2019

Todas essas etapas são comuns ao processo de fabricação de celulose, onde geram além dos resíduos sólidos destacados, também o resíduo líquido, neste caso denominado efluente industrial. O efluente é coletado e direcionado para um tanque de equalização ou neutralizador, onde é controlado o pH e analisado alguns parâmetros de processo para direcionar o efluente para tratamento ou retenção na lagoa de equalização. Parâmetros esses como condutividade, toxicidade e cor.

Na estação de tratamento do efluente industrial ocorre a separação do efluente primário (residual de fibras) e efluente secundário (residual orgânico), de maneira que do efluente primário é extraído o resíduo sólido denominado “lodo branco” ou “lodo primário”. Este lodo é seco através de prensas desaguadoras para obter teor de sólido satisfatório para sua destinação final. A Figura 3.8 apresenta o processo de lodo primário.

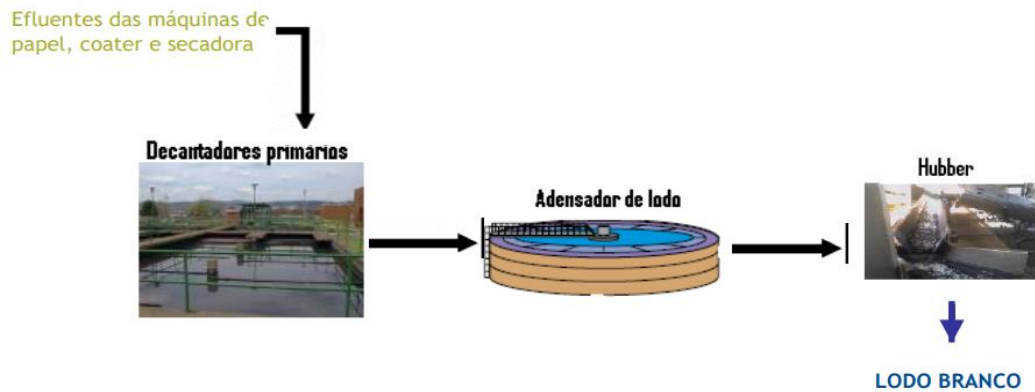


Figura 3.8: Processo de Lodo Primário

Fonte: <http://www.celso-foelkel.com.br/artigos>, acessado em setembro 2019.

No efluente secundário é extraído o “lodo biológico” ou “lodo escuro”. Este lodo é extraído por meio de sistemas centrífugos de separação de modo a atingir valores de teor seco satisfatórios. No caso desta planta em estudo, existe um sistema denominado secador de lodo, utilizado para secar o lodo biológico de modo a alcançar valor de teor seco a nível de possibilitar a queima do material na caldeira de biomassa, transformando o resíduo em combustível e permitindo a redução da destinação a aterros sanitários. A Figura 3.9 apresenta o processo de lodo biológico.

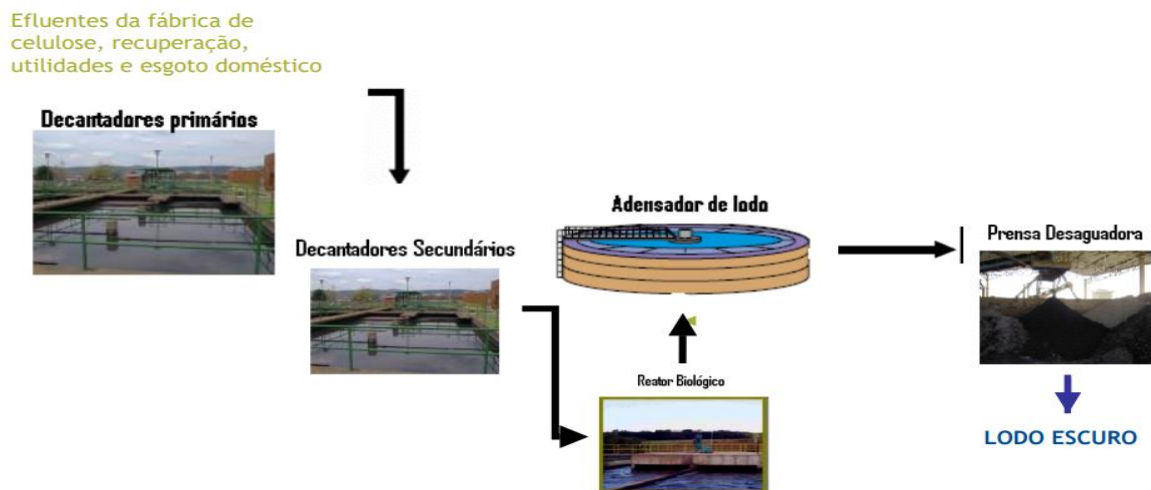


Figura 3.9: Processo de Lodo Biológico

Fonte: <http://www.celso-foelkel.com.br/artigos>, acessado em setembro 2019.

Após o tratamento do efluente o mesmo é direcionado para sua origem, em geral para o rio. Devido à grande demanda de água, normalmente as fábricas de celulose são instaladas à margem de rios. Os resíduos extraídos, lodo primário e biológico, podem ser reaproveitados por terceiros, utilizados na matriz energética ou destinados a aterros industriais. No capítulo 4.3 será explorada a destinação destes resíduos neste estudo de caso.

O digestor consiste de um vaso de pressão vertical, constituído de um separador de topo, peneiras de extração de licor negro e um raspador de fundo. Sua função é prover as condições de temperatura e pressão necessárias para que ocorra a remoção da lignina dos cavacos pelo licor negro de cozimento, permitindo a obtenção de polpa marrom com número kappa³ e rendimento satisfatórios.

Após o processo de digestão, surge o produto denominado polpa marrom, essa polpa passa por dois processos antes da etapa de branqueamento, a separação dos nós, lavagem e depuração. A separação atua na remoção dos nós, que não foram adequadamente deslignificados durante o processo de cozimento. Esse processo evita que os nós degradem o produto final, causando consumo excessivo de produtos químicos nos estágios de branqueamento subseqüentes, bem como transtornos em outras partes do processo. Os nós são separados e enviados para o silo de cavacos, sendo reaproveitados no processo.

Em sequência, o sistema de depuração de polpa marrom tem a função de limpar a polpa marrom bombeada dos separadores de nós. O sistema remove contaminantes maiores, mais pesados que as fibras, como shives (palitos), areia, vidro, pedras, grampos, parafusos e pregos. O sistema é composto de quatro estágios (primário, secundário, terciário e quaternário). A remoção desses contaminantes mantém a qualidade da polpa marrom e evita danos aos equipamentos subsequentes no processo.

A polpa marrom já limpa segue para processo de branqueamento, onde o principal objetivo do branqueamento é aumentar a alvura da polpa, mantendo ainda boas propriedades de resistência física. Os seguintes estágios fazem parte do processo de branqueamento: estágio de dióxido de cloro, extração alcalina, ozônio e estágio de peróxido. No final desta etapa, a polpa se encontra branca e pronta para processo de secagem e enfardamento.

No processo de secagem a polpa branqueada passa por um processo de depuração para remoção de sujeitas remanescentes do processo anterior, após essa etapa a massa é destinada a mesa de formação, onde está aplicada a telas de formação e prensas atinge sua forma de folha para dar início ao processo de secagem. A folha entra no secador de celulose com aproximadamente 50% de consistência, após o processo de desaguamento da seção das prensas. No

³ O número Kappa é uma indicação do teor de lignina residual ou da capacidade de branqueamento da pasta celulósica.

secador de celulose, o ar quente seca e sustenta a folha, à medida que passa pelo secador, fazendo passagens horizontais para frente e para trás em um colchão de ar. Os tubos de vapor aquecem o ar de insuflamento, onde os ventiladores de circulação alimentam as caixas sopradoras. As caixas sopradoras se estendem por toda a largura do secador e distribuem o ar na parte superior e inferior da folha.

A folha sai do secador com aproximadamente 90% de consistência e entra na cortadeira para ser processada por um corte transversal e dez cortes longitudinais, formando assim dez folhas. Estas são empilhadas e transportadas para linha de enfardamento na forma de fardos de 250 kg cada, onde são encapados, amarrados e identificados, os fardos são empilhados pelo empilhadores de fardos, em quatro fardos. Duas pilhas de fardos são transportadas para a unitizadora, onde são unitizados com arames. Essa unidade de 8 fardos com 2 toneladas é liberada para início do processo logístico.

Terminada a fabricação da celulose, inicia-se o processo de recuperação química, onde o licor negro é o fluido do processo recuperado da polpa de fabricação (lavagem). Esse licor é composto de duas partes distintas: uma parte orgânica e outra inorgânica. A parte orgânica é, em sua maioria, composta de lignina (a cola que une as fibras da madeira), ácidos graxos e resinas (sabão). A parte inorgânica é, em sua maioria, composta de sais de sódio, tal como sulfato de sódio e carbonato de sódio. O licor preto diluído, vindo da lavagem de polpa, com uma concentração de sólidos secos de aproximadamente 15%, é processado no sistema do evaporador para compor o licor preto com uma concentração de sólidos secos de aproximadamente 72%. O licor preto, com uma concentração de sólidos secos a 72%, é queimado em uma caldeira de recuperação, desta forma é possível recuperar os produtos químicos descarregados pelo digestor, gerar energia elétrica por meio de turbinas a vapor, reduzir o impacto ao meio ambiente com descarte mínimo de resíduos e obter o menor custo de operação. O fundido residual da queima do licor negro é diluído no tanque de dissolução e bombeado para processo de caustificação como licor verde. O sistema de caustificação consiste em converter o licor verde e a cal queimada em licor branco e lama de cal. O licor branco é usado nos digestores, e a lama de cal é queimada novamente no forno de cal, fechando assim o ciclo do licor negro no processo.

O processo de utilidades e águas/efluente serão explorados nos capítulos de balanço energético e fluxograma do efluente. Todas as etapas do processo geram resíduos, sólidos ou líquidos. Os resíduos líquidos são canalizados e centralizados na captação de efluentes, onde o potencial energético será avaliado.

Uma particularidade da fábrica selecionada para este estudo de caso é ter duas máquinas de secagem para exportação da celulose e também ser integrada à uma máquina de papel, essa estrutura compromete o balanço energético e térmico, neste caso a tecnologia adotada para equilibrar a matriz energética foi a instalação de uma caldeira de recuperação de calor integrada a um turbo gerador a gás com capacidade de 24 MW de energia elétrica e 75 toneladas/h de vapor superaquecido a 88 bar.

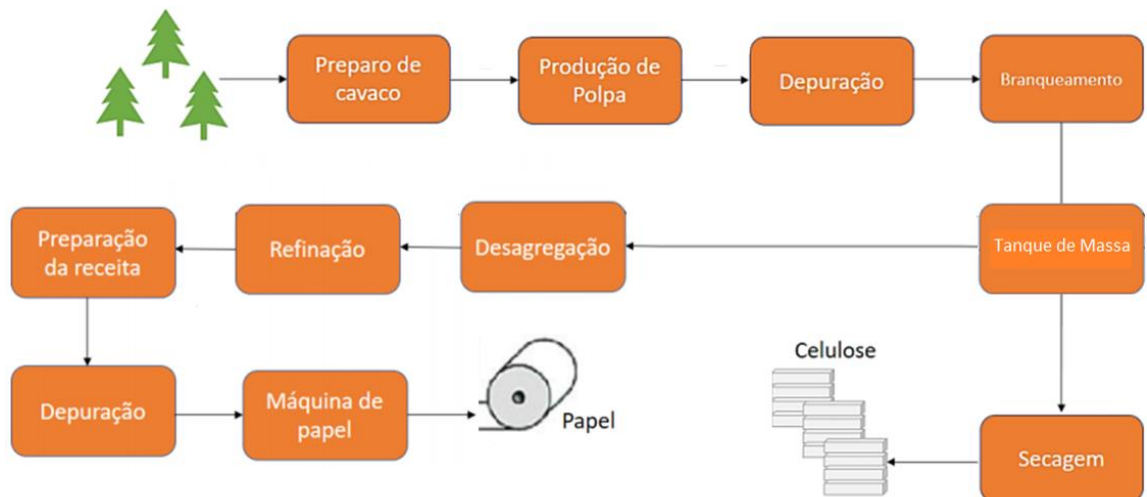


Figura 4.2: Fluxograma de Produção da Celulose e Papel
Fonte: Autor, 2019.

4.1 Balanço Energético

A cogeração da indústria de celulose e papel tem como característica o ciclo *topping*⁴, onde a viabilidade se dá pelo custo baixo do combustível, neste caso o licor negro. O licor negro é extremamente importante para a viabilidade de um processo de fabricação de celulose, o combustível renovável é a única fonte capaz de abastecer a demanda térmica e elétrica necessárias para o processo e torna-lo financeiramente viável. Este combustível é o terceiro com maior capacidade instalada no Brasil. Na Figura 4.3 observa-se a distribuição dos combustíveis utilizados na geração de energia no Brasil.

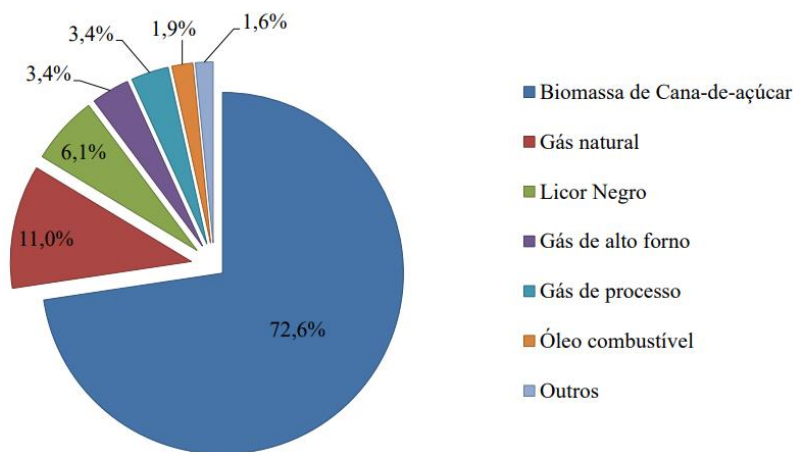


Figura 4.3: Capacidade Instalada por Combustível no Brasil em 2014 (MW)
Fonte: (EPE, 2014)

Particularmente na planta em estudo para equilíbrio do balanço energético, há também um ciclo combinado de uma turbina a gás e caldeira de recuperação de calor, devido a existência de duas máquinas de secagem e uma de papel.

A matriz energética do processo é composta basicamente por três combustíveis: licor negro (lignina), gás natural (GNP) e biomassa (rejeitos do processo de picagem e cascas). O balanço energético é constituído por cinco caldeiras e quatro turbo geradores, conforme pode ser observado na Figura 4.4.

⁴ No ciclo Topping, objetivo principal do combustível é a geração de energia elétrica e na sequência o aproveitamento térmico.

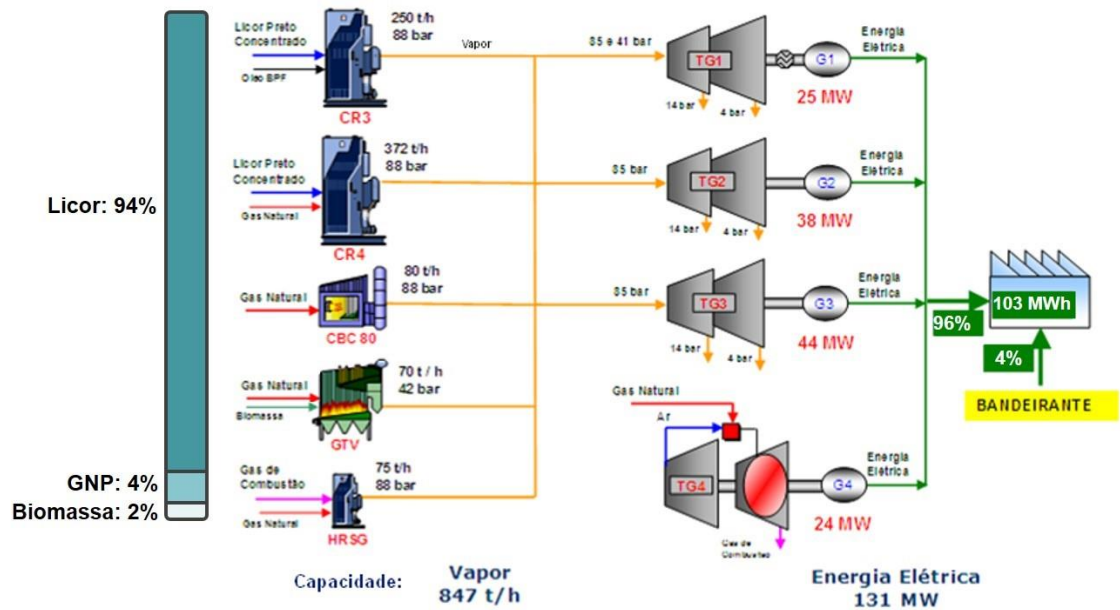


Figura 4.4: Balanço Energético da planta em estudo
Fonte: (Documento interno, julho 2015)

O licor negro proveniente do processo de cozimento da madeira é o combustível responsável pela maior parte da geração de energia, podendo corresponder a 94% da matriz. Após sua extração no digestor, o licor passa pelo processo de concentração através da evaporação da água em evaporadores, com densidade em valores médios de 75%, posterior é queimado em caldeiras de recuperação química para geração de vapor. A caldeira de recuperação química tem sua capacidade medida pela quantidade de sólidos secos (Tss/h) que pode queimar. A caldeira de recuperação 3 foi projetada para uma carga de 80 toneladas de sólidos secos por hora, correspondendo a 250 toneladas/hora de vapor. A caldeira de recuperação 4 foi projetada para uma carga de 125 toneladas de sólidos secos por hora, correspondendo a 372 toneladas/hora de vapor.

A biomassa é aplicada a caldeira com capacidade de geração de 70 toneladas por hora de vapor a 42 bar de pressão. O combustível é basicamente resultado dos rejeitos do processo de picagem das toras de eucaliptos, das cascas e de madeira compradas de terceiros.

Por último, o gás natural é responsável por alimentar uma caldeira de força para geração de vapor (80 toneladas por hora a 88 bar de pressão) e uma turbina a gás integrada a uma caldeira de recuperação de calor (75 toneladas por hora a 88 bar de pressão). Além destes processos primários, o gás natural também é utilizado

como combustível auxiliar da maior caldeira de recuperação química, da caldeira de biomassa e dos fornos caustificadores.

O vapor superaquecido totalizando 777 toneladas por hora á 88 bar de pressão é direcionado para um coletor e disponibilizado para os turbo geradores. Esse vapor é aplicado a admissão dos turbo geradores, onde a extração opera a 14 bar de pressão e o escape com 4 bar de pressão. O turbo gerador 1 possui uma injeção de vapor, onde está utiliza-se do vapor gerado pela caldeira de biomassa a 42 bar de pressão e 70 toneladas por hora.

A geração elétrica base vapor é estimada em 107 MW com consumo específico de $7,26^5$, esse balanço para a fábrica de celulose é suficiente, onde o conceito de paridade térmica foi aplicado. Por ser uma planta com digestor único para duas linhas de branqueamento, a extração de licor negro é limitada em relação ao potencial a ser explorado das máquinas a vapor instaladas.

Porém, devido a fábrica ser integrada à uma máquina de papel, se faz necessário o complemento da matriz elétrica e térmica, neste caso a tecnologia adotada foi a instalação de uma caldeira de recuperação de calor integrada a um turbo gerador a gás com capacidade de 24 MW.

A capacidade instalada de geração de energia elétrica chega a 131 MW, mas o processo não demanda essa quantidade. A caldeira a gás CBC80 só opera em necessidade de complemento à matriz térmica, por exemplo em parada de manutenção de uma caldeira de recuperação ou de biomassa. No total a demanda de energia elétrica em produção nominal da planta chega a 106 MW. O sistema trabalha conectado à rede da concessionária, com contrato para importação de até 50MW. A energia excedente pode chegar até 6 MW, mas o controle é configurado para manter o balanço de energia elétrica sem excedente, devido a planta não ter contrato de exportação com a concessionária.

⁵ Consumo Específico: (7,2 toneladas por hora de vapor para produzir 1 MW de energia elétrica)

4.2 Consumo de Gás Natural

O gás natural é um composto de hidrocarbonetos leves (metano, etano, propano e butano e outros gases) oriundo da degradação de matéria orgânica. Considerado um combustível fóssil e não renovável, costuma ser extraído em rochas porosas profundas, submetido a condições de temperatura e pressão específicas, apresenta-se no estado gasoso e pode ser encontrado associado (junto ao petróleo) ou não associado (encontrado isoladamente ou junto a pequenas quantidades de petróleo).

Neste caso sua utilização basicamente é destinada a geração de vapor, chegando a 80% de representatividade no processo. Em unidades integradas de celulose e papel a demanda energética é elevada, ocasionando um déficit na geração versus o consumo. Neste caso a aplicação de uma turbina a gás integrada a uma caldeira de recuperação de calor foi à escolha para equilibrar essa balança. Outras opções podem exercer esse papel, como as turbinas de condensação, ao qual atualmente são cotadas em estudos com retorno e eficiência mais atrativas para processos *topping*. O balanço do gás natural é apresentado na Figura 4.5.

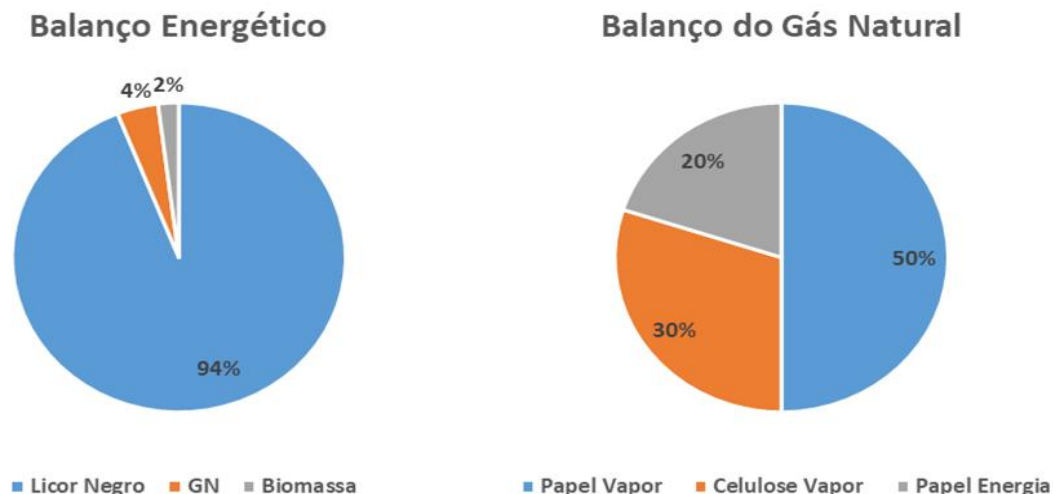


Figura 4.5: Balanço energético do Gás Natural

Fonte: Elaboração própria com base nos dados fornecidos pela empresa estudo de caso

Em plantas de cogeração o valor cobrado (R\$) para o normal metro cúbico (Nm³) do gás natural segue uma tabela de valores diferenciados, sempre priorizando valores mais atrativos para plantas qualificadas na geração (rendimento > 45%) e

com maior volume anual contratado. A Tabela 4.1 apresenta exemplos de valores cobrados de grandes cogerações pela maior distribuidora do estado.

Classes	Volume m ³ /mês	Valores sem ICMS		Valores com ICMS	
		Variável - R\$/m ³		Variável - R\$/m ³	
		1	2	3	4
1	Até 5.000.00 m ³	0,51164110	0,50282030	0,60193070	0,59155330
2	5.000.01 a 50.000.00 m ³	0,40180000	0,39487280	0,47270590	0,46455620
3	50.000.01 a 100.000.00 m ³	0,34589880	0,33993540	0,40693980	0,39992400
4	100.000.01 a 500.000.00 m ³	0,26275360	0,25822360	0,30912190	0,30379250
5	500.000.01 a 2.000.000.00 m ³	0,27161390	0,26693120	0,31954580	0,31403670
6	2.000.000.01 a 4.000.000.00 m ³	0,24584920	0,24161070	0,28923440	0,28424790
7	4.000.000.01 a 7.000.000.00 m ³	0,21512230	0,21141350	0,25308510	0,24872180
8	7.000.000.01 a 10.000.000.00 m ³	0,18439050	0,18121160	0,21693000	0,21319010
9	> 10.000.000.00 m ³	0,15294500	0,15030820	0,17993530	0,17683320

Tabela 4.1: Tarifa do gás – Cogeração
Fonte: Comgás, 2019

Baseado nessa planilha de tarifas, pode-se avaliar o custo estimado mensal de gás aplicado a esta planta, de forma a apresentar valores teóricos referenciais para o estudo, de modo a não ter semelhança exata com a realidade. Considerando para esta planta um contrato anual de 60.000.000 Nm³ de GN, o custo estimado mensal de utilização deste combustível é de R\$ 7.874.660,00.

O consumo segue o balanço energético e de produção, sendo assim, este varia de mês a mês. Ocorrências ou paradas programadas de manutenção interferem diretamente no balanço energético da empresa, uma vez que para manter a matriz é necessário um consumo extra, além das retomadas de produção “startup” que também acabam por consumir valores elevados de combustível auxiliar.

4.3 Fluxograma do Efluente Industrial

O efluente industrial gerado varia de acordo com a produção de celulose. Em média a planta opera com valores próximos a 2.630 m³/h. O valor de projeto nominal da estação de efluente é de 3.100 m³/h. O tratamento é realizado em etapas, sendo que o primeiro passo é o bombeamento de todas as fontes geradores para um tanque central, chamado de neutralização.

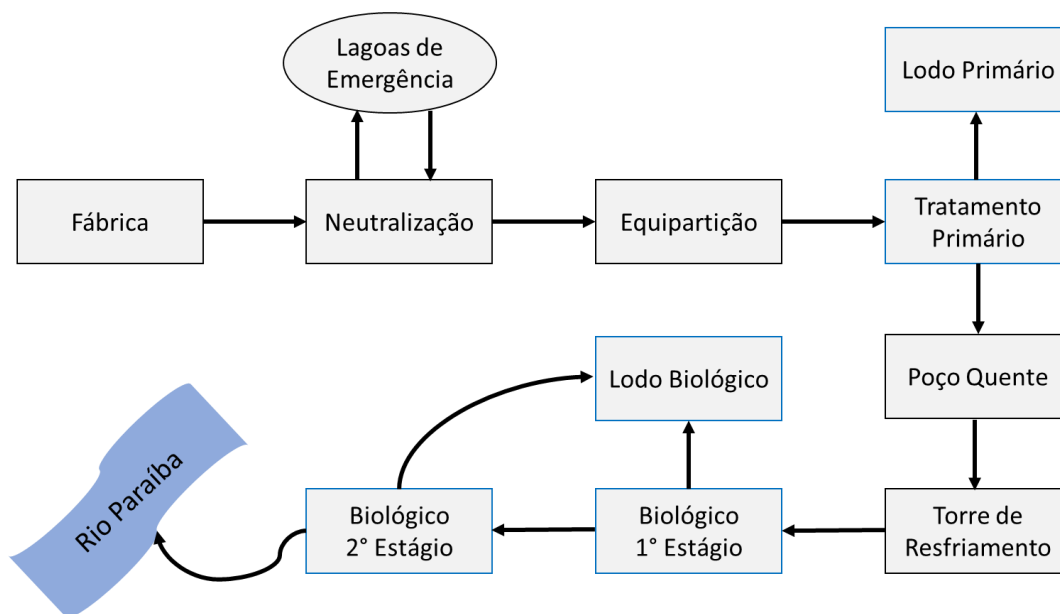


Figura 4.6: Fluxograma de Tratamento do Efluente Industrial
Fonte: (Autor, 2019)

Este primeiro tanque possui três funções, sendo a primeira de receber todo o efluente gerado, a segunda de destiná-lo para tratamento ou desviar para lagoa de emergência, e por último, mas não menos importante, a etapa inicial de correção do pH. A destinação para lagoa de emergência em sua maioria tem relação com a indisponibilidade da planta de tratamento em receber a vazão momentânea, seja por problemas de processo ou de manutenção. Outro fator importante para determinar este desvio são parâmetros de controle, como a toxicidade e condutividade do efluente.

A próxima etapa passa pelo tanque de equipartição, onde é feito o controle de pH com ajuste de 6,5 de *setpoint*, através da aplicação de soda caustica para

valores abaixo da meta ou ácido sulfúrico para valores acima da meta. Também é feita a divisão volumétrica do efluente para dois tanques decantadores.

No processo de decantação ocorre a separação das fibras para o tratamento primário, conforme já descrito no capítulo de resíduos. O efluente livre das fibras segue o processo para o tratamento biológico. Mas antes passa por um processo de controle de temperatura, através de uma torre de resfriamento. A torre é composta de 10 células de ventilação com objetivo de reduzir a temperatura de entrada do efluente, na média anual de 38°C para uma temperatura de saída de 30°C.

Com a temperatura controlada, o efluente segue para o tratamento aeróbico em 2 estágios do processo biológico. A aeração dos reatores é feita por dez sopradores de ar, sendo dois sopradores de grande porte, acionados por motores de média tensão com a finalidade de absorver picos de falta de oxigênio, e oito sopradores de porte menor acionados por motores de baixa tensão com a finalidade de manter a pressão de oxigenação dos reatores em valores próximos a 1 kgf/cm².

No processo biológico ocorre a extração do lodo, onde este é destinado para uma estação de secagem, denominado secador de lodo. O objetivo é atingir 95% de teor seco neste material, de forma a permitir sua queima na caldeira de biomassa misturada ao combustível principal.

O efluente resultando deste processo já está tratado e em conformidade com os parâmetros legais, com destino à sua origem, o rio Paraíba do Sul.

4.4 Características do Efluente Industrial

A base de dados para o estudo foi coletada no período de maio de 2018 a maio de 2019. Os valores foram gerados através de instrumentos de medição padronizados. Os valores são utilizados no processo para controle do efluente gerado na planta e para o processo de tratamento aeróbico.

Os parâmetros escolhidos são: Q (vazão volumétrica), DQO (demanda química de oxigênio), DBO (demanda biológica oxigênio), So₄ (sulfidez), T (Temperatura), pH e Condutividade, conforme apresentado na Tabela 4.2.

	Q (m ³ /d)	DQO (mg/l)	DBO (mg/l)	So4 (mg/l)	T (°C)	pH	Condutividade (μS)
MAIO	43.200	1.490	508	2,96	24,00	5,21	2.800
JUNHO	68.400	1.770	670	2,96	32,00	7,24	<u>3.030</u>
JULHO	69.600	2.000	960	2,96	31,50	7,00	4.325
AGOSTO	64.800	1.895	840	2,96	29,50	7,20	4.400
SETEMBRO	67.200	2.050	850	2,00	32,50	6,00	3.660
OUTUBRO	67.200	2.150	850	0,00	34,50	4,34	3.800
NOVEMBRO	68.400	1.940	990	0,00	33,20	7,00	4.890
DEZEMBRO	62.400	1.790	670	0,00	32,00	7,10	3.580
JANEIRO	63.600	1.720	620	0,00	31,40	6,85	3.830
FEVEREIRO	66.000	1.620	665	0,00	34,40	7,20	3.210
MARÇO	52.800	2.350	720	0,00	33,90	8,40	3.090
ABRIL	63.600	1.570	860	0,00	35,40	6,20	3.700
Média	63.120	1.865	765	1,17	32,00	6,60	3.690
Máximo	81.120	6.975	1.570	2,96	58,00	14,00	14.900

Tabela 4.2: Parâmetros Físico-Químicos do efluente industrial
 Fonte: (Elaboração própria a partir de dados do processo)

A vazão volumétrica é medida em metros cúbicos por hora, mas para efeitos de cálculos foi considerada a vazão diária. Desta forma tem-se uma vazão média de 63.120 m³/dia e uma vazão máxima de 81.120 m³/dia. Os valores foram coletados na entrada do estágio da equipartição. Como é possível observar, a DQO é relativamente baixa em relação a alta vazão de efluente, com uma razão de 0,001865 kg/m³ DQO.

Para fins práticos, será necessária a análise de biodegradabilidade do efluente para validar sua capacidade de ser digerido anaerobicamente. Este teste não é comum e se encontra em prospecção de empresas parceiras para execução.

4.5 Potencial Energético do Efluente Industrial

O efluente gerado no processo é direcionado a estação de tratamento, onde de forma anaeróbica é processado a padrões estipulados em legislação para retorno à fonte de origem, o volume em média é de 2.630 m³/hora.

Esse resíduo tem potencial para geração do biogás antes de passar pelo processo de tratamento aeróbico existente, sendo uma opção destina-lo para um processo anaeróbico. O aproveitamento terá relação direta com variação da carga orgânica e o volume, mas vale ressaltar que as possíveis toxidades serão um desafio a ser mensurado, uma vez que a produção do biogás depende do processo de biodegradabilidade da matéria orgânica através de bactérias.

Para avaliar esse potencial foram coletados dados do processo, onde foi possível prosseguir com os cálculos teóricos da produção do biogás. Uma forma de estimar a vazão do biogás a ser gerada no reator pode ser descrita na Equação 1 (Fabricante Paques):

$$Q \text{ biogás} = CO \times E \times f \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

- CO = carga orgânica total do produto (kgDQO/dia), neste caso utilizou-se a DQO em função da vazão, conforme apresentado na Equação 2.
- E = eficiência de remoção da carga orgânica no reator anaeróbico (para este estudo considerou-se o valor de 80% com base em valores do modelo Biopac IC ⁶ (anexo II).
- f = fator de conversão da DQO/biogás (para este estudo considerou-se como valor prático para este reator o valor de 0,45 Nm³ biogás/kg DQO removida segundo fabricante, Paques). Em valores teóricos são utilizados de 0,25 a 0,5 Nm³, considerando a densidade do metano em 0,72.

⁶ O BIOPAQ IC é um reator de Circulação interna anaeróbico projetado para tratamento de águas residuais de indústria e produção de biogás.

$$CO = Q \times DQO \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

- Q = vazão volumétrica do efluente (m^3/dia) – neste caso utilizou-se o valor médio do efluente de $63.120 \text{ m}^3/\text{dia}$, conforme apresentado na Tabela 5.
- DQO = Demanda Química de Oxigênio do efluente (mg/l) – neste caso utilizou-se o valor médio de DQO de $1,865 \text{ kg/m}^3$ (equivalente a 1.865 mg/l), conforme apresentado na Tabela 6.

Aplicando-se a equação 2, tem-se a carga orgânica total do produto:

$$CO = 63.120 \times 1,865 = 117.720 \text{ kg DQO/dia}$$

Aplicando-se o valor de CO na Equação 1, tem-se:

$$Q \text{ biogás} = 117.720 \times 0,8 \times 0,45 = 42.380 \text{ Nm}^3/\text{dia}$$

$$Q \text{ biogás} = 1.766 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

Considerou-se a composição estimada do biogás de 75% de metano (CH_4), 24 à 45% de gás carbônico (CO_2), 0 à 1% de outros gases (H_2S , etc.), saturado com água e poder calorífico inferior (PCI) estimado entre 5.500 à 6.000 kcal/Nm^3 . Uma forma de estimar a vazão do biometano a ser gerada após purificação do biogás pode ser descrita na Equação 3 (PECE):

$$V_{\text{biometano}} = (V_{\text{biogás}} \times \text{Con.CH}_4) / \eta_{\text{pur}} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde;

$V_{\text{biometano}}$ = volume de biometano (Nm^3/h)

$V_{\text{biogás}}$ = volume de biogás captado (Nm^3/h)

Con.CH_4 = concentração de metano presente no biogás – neste caso utilizou-se o valor de 75% conforme citado anteriormente

η_{pur} = eficiência de purificação do biogás – neste caso utilizou-se o valor de 97% incluindo as perdas e impurezas e atendendo a Resolução ANP 685/2017 sobre a qualidade do biometano como substituto ao gás natural

$$V_{biometano} = (1.766 * 0,75) / 0,97$$

$$Q_{biometano} = 1.365 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

A Tabela 4.3 apresenta os valores obtidos na geração do biogás e biometano com concentração de 75% de metano e equivalência para aplicação como substituto ao gás natural.

	Q (m ³ /d)	DQO (mg/l)	DBO (mg/l)	Biogás (Nm ³ /h)	Biometano (Nm ³ /h)
MAIO	43.200	1.490	508	966	747
JUNHO	68.400	1.770	670	1.816	1.404
JULHO	69.600	2.000	960	2.088	1.614
AGOSTO	64.800	1.895	840	1.842	1.424
SETEMBRO	67.200	2.050	850	2.066	1.598
OUTUBRO	67.200	2.150	850	2.167	1.676
NOVEMBRO	68.400	1.940	990	1.990	1.539
DEZEMBRO	62.400	1.790	670	1.675	1.295
JANEIRO	63.600	1.720	620	1.641	1.269
FEVEREIRO	66.000	1.620	665	1.604	1.240
MARÇO	52.800	2.350	720	1.861	1.439
ABRIL	63.600	1.570	860	1.498	1.158
Média Acumulado Anual	63.120	1.865	765	1.766	1.365
				15.468.250	11.959.987

Tabela 4.3: Valores Potenciais de Biogás, Biometano e Gás Natural
Fonte: Elaboração própria a partir de equações acadêmicas

4.6 Potencial de aplicação do biogás

Entre as tecnologias analisadas, o biometano aplicado a um ciclo combinado tem a melhor resposta em produção final de energia elétrica projetada para cogeração. A tecnologia aplicada no ciclo Otto é a comercialmente mais aceita, uma vez que a maioria dos projetos não dispõe de um sistema para implementação do ciclo combinado e o custo associado a um projeto com ciclo Otto gerando de forma descentralizada é menor.

Porém, a planta deste estudo de caso dispõe de uma turbina a gás do fabricante Siemens, modelo RB211, operando integrada a uma caldeira de recuperação de calor e interligada a um ciclo rankine. Um ciclo combinado pronto a receber o biometano em substituição ao gás natural, com ajustes nas taxas de combustão para encontrar a melhor relação em comparação ao gás natural hoje utilizado.

A Tabela 4.4 apresenta o comparativo entre as cogerações, no ciclo Otto foi adotado o rendimento de 28% na conversão de energia, ciclo brayton rendimento de 30% e o ciclo combinado com rendimento de 55% considerando uso do biometano purificado com valores de metano ($\geq 75\%$) e com equivalência ao gás natural.

	Ciclo Otto ($\eta=28\%$) Base Biogás	Ciclo Brayton ($\eta=30\%$) Base Biometano	Ciclo Combinado ($\eta=55\%$) Base Biometano
	Potência (MW)	Potência (MW)	Potência (MW)
MAI	1,89	1,56	2,86
JUN	3,55	3,80	5,39
JUL	4,08	4,37	6,19
AGO	3,60	3,86	5,46
SET	4,04	4,33	6,13
OUT	4,23	4,54	6,43
NOV	3,89	4,17	5,91
DEZ	3,27	3,51	4,97
JAN	3,21	3,43	4,87
FEV	3,13	3,36	4,76
MAR	3,64	3,90	5,52
ABR	2,93	3,13	4,44
Média Acumul. Anual	3,45	3,70	5,24
	30.217	32.375	45.893

Tabela 4.4: Comparativo entre cogerações
Fonte: Elaboração própria a partir de equações acadêmicas

4.7. Resultados, análise e discussões

Os valores pressupostos de geração do biogás se mostram atrativos na geração de energia elétrica e principalmente em sua utilização na substituição do gás natural. Para substituição do gás natural se faz necessária além do reator anaeróbico, a inclusão de um purificador para limpeza do biogás.

O mesmo fabricante do reator IC possui em seu portfólio um purificador de H₂S (gás sulfídrico), denominado de THIOPAQ. A tecnologia promete alta remoção de H₂S (< 25 ppm), remoção de grandes cargas de enxofre, baixo consumo de soda cáustica e produz enxofre no processo, este pode ser destinado ao uso como fertilizante e ou fungicida.

A relação da demanda química de oxigênio com a vazão de efluente não demonstrou ser atrativa, uma vez que a vazão é elevada para uma demanda baixa. Desta forma, podemos determinar a taxa de aplicação volumétrica da carga presente no efluente e os possíveis arranjos de reatores;

$$\text{Taxa de aplicação (kg DQO / m}^3 \cdot \text{d)} \quad (\text{Equação 4})$$

$$Q \text{ Efluente (médio)} = 2.630 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{DQO (médio)} = 1.865 \text{ mg/l}$$

$$\text{DQO (médio)} = 0,001865 \text{ kg/l}$$

$$\text{DQO (médio)} = 1,865 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Taxa de aplicação} = 117,718 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{r} \cdot \text{d}$$

Para esse valor de taxa de aplicação estima-se a necessidade de três reatores para atender ao tratamento do efluente de forma anaeróbica com tempo de retenção estimado em 2 a 3 horas para reatores IC segundo o próprio fabricante. No caso de três reatores, cada um processará 39,57 kg/m³r.d e deverá ser feito um controle de distribuição de vazão para cada reator.

$$\text{Taxa de aplicação para cada reator} = 39,239 \text{ kg/m}^3 \text{ reator} \cdot \text{d}$$

Na tabela abaixo pode-se observar parâmetros para seleção do modelo de reator a ser utilizado, neste caso como descrito anteriormente, para uma taxa de aplicação de 39 kg/m³reator.d, o reator IC é o indicado. Porém, a quantidade de reatores pode ser estendida não somente pelo fato de enquadramento da taxa de aplicação, mas pelas suas limitações construtivas, como altura e capacidade de detenção do fluido em relação elevada vazão do efluente deste estudo.

Parâmetros	UASB	IC
Lodo anaeróbico	ativo, concentrado	granulado
Separador S / L / G	alta retenção, biomassa	2 estágios
Altura do Reator (m)	4,5 à 6,5	16,0 à 25,0
Atividade do lodo (Kg.DQO/Kg SSV.d)	0,5	1
Taxa de aplicação (Kg.DQO/m ³ .d)	06 à 12	20 à 40
Tempo de detenção Hidráulico (h)	6 à 10	2 à 3
Velocidade do líquido (m/h)	05, à 1	5 à 10
Velocidade do biogás (m/h)	0,5 à 0,9	7 à 10
Eficiência remoção DQO sol. (%)	80	80
Eficiência remoção DQO sol. (%)	90	90

Tabela 4.5: Seleção de Reator a partir da Taxa de Aplicação.
Fonte: (Paulo de Lamo e Nivaldo Dias, 2014)

Sobre a geração de energia elétrica, os valores obtidos de 1365m³ de biometano aplicados ao ciclo combinado existente na planta podem atingir o valor de 5,24 MW de potência. Na Figura 4.7 pode-se observar o arranjo existente de ciclo combinado para aplicação do biogás e na equação 5 o demonstrativo dos valores de potência obtidos nos cálculos;

$$\text{Potencia} = \text{PCI (biogás)} * \text{Q biometano} * \eta_{\text{ciclo combinado}} / 860 \quad \text{Equação 5}$$

$$\text{Potencia} = 6000 \text{ kcal} * 1365 * 0,55 / 860$$

$$\text{Potencia} = 5.237 \text{ kW}$$

$$\text{Potencia} = 5,24 \text{ MW}$$

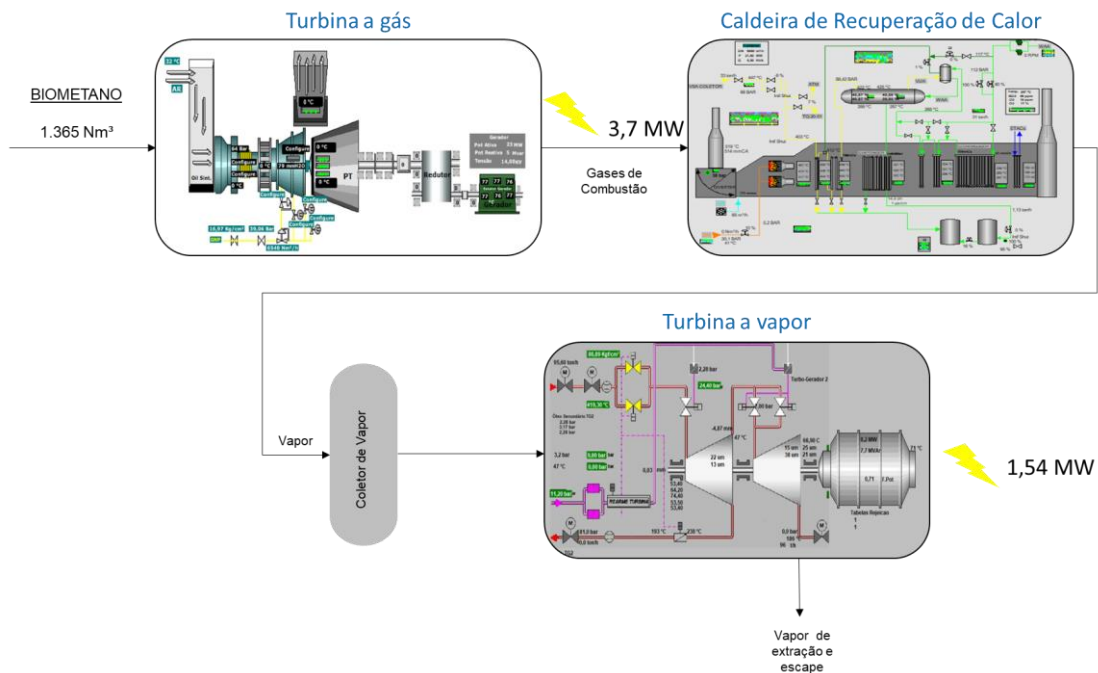


Figura 4.7: Arranjo de Cogeração Ciclo Combinado
 Fonte: Elaboração própria a partir de informações do estudo de caso

O gás natural não utilizado para geração destes 5,24 MW pode ser contabilizado, considerando um custo de R\$ 1,574932 / Nm³ com base na tabela da Comgás, é possível estimar um valor de R\$ 2.150,25 para essa potência gerada.

A estimativa monetária alcançou valores satisfatórios, com redução avaliada em 20% do consumo de gás natural anual, com valor aproximado de 18 milhões de reais de economia. Com este valor de retorno, o investimento para estudo do projeto, planejamento, implantação, startup e manutenção deverá estar na faixa dos R\$ 50MM a 80MM para enquadramento dentro de um *payback* de 3 a 5 anos, período médio atrativo para aprovação de projetos em grandes empresas.

	Ciclo Combinado ($\eta=55\%$) Base Biometano	Retorno a partir de geração de energia elétrica	Retorno a partir de substituição do gás natural
	Potência (MW)	Energia (R\$/mês)	GN (R\$/mês)
MAI	2,86	581.631,47	846.535,37
JUN	5,39	1.093.974,63	1.592.225,08
JUL	6,19	1.257.816,01	1.830.687,97
AGO	5,46	1.109.588,90	1.614.950,86
SET	6,13	1.244.804,12	1.811.749,82
OUT	6,43	1.305.526,27	1.900.127,86
NOV	5,91	1.199.045,64	1.745.150,65
DEZ	4,97	1.009.288,91	1.468.969,28
JAN	4,87	988.469,89	1.438.668,23
FEV	4,76	966.132,81	1.406.157,74
MAR	5,52	1.121.191,16	1.631.837,38
ABR	4,44	902.266,12	1.313.202,98
Média Acumul. Anual	5,24	1.063.711,14	1.548.178,09
	45.893	12.779.735,92	18.600.263,21

Tabela 4.6: Estimativa de ganho Financeiro
Fonte: (Autor, 2019)

Os valores apresentados na Tabela 4.6 são estimativas baseadas em valores comerciais, para o ganho a partir da geração de energia foi considerado o PLD (preço da liquidação das diferenças) médio de 2018 no valor de R\$ 282,00 MWh. Já o ganho em relação a substituição do gás natural, utilizou-se o valor de R\$ 1,574932/Nm³ fornecido pela distribuidora Comgás. Os dois cenários utilizaram como base a cogeração de ciclo combinado com rendimento de 55%.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

O tratamento anaeróbico de efluentes industriais para processos de conversão da madeira de eucalipto em celulose e posterior papel pareceu ser atraente do ponto de vista econômico e técnico. No ponto de vista econômico a estimativa é de um retorno anual de R\$ 12 milhões em relação a geração de energia elétrica e R\$ 18 milhões na substituição do gás natural com aplicação do biometano.

A aplicação do biogás a ser gerado nos reatores mostra potencial para substituição do gás natural e ou para geração direta de energia. A escolha por qual utilização da energia é particular de cada processo, neste case em estudo, a aplicação do biogás purificado como gás natural é a mais atrativa, de modo a se aproveitar o ativo existente (turbina a gás, queimadores a gás e outros).

Para fábricas de celulose em operação, a aplicação da tecnologia de reatores anaeróbicos se torna mais complexa, onde a avaliação setorial dos tratamentos pode ser um caminho a ser seguido. Devido ao elevado volume de efluentes industrial e a relação baixa de DOQ na entrada da estação de tratamento de efluentes, é factível viabilizar tratamentos setoriais com vazões menores e relações maiores de DQO. Porém, para projetos novos, se torna interessante o estudo de aplicação do tratamento de efluentes total.

O setor ainda é visto como potencial a ser explorado pelos fabricantes de tecnologias de reatores anaeróbicos, porem o incentivo ou conhecimento desta aplicação no setor ainda é discreto, de forma a ser complexa a introdução do tema. Parcerias de universidades, fabricantes e empresas pode ser um caminho para estreitar laços e colocar projetos em prática no setor.

5.2 Recomendações

Para trabalhos futuros recomenda-se a análise de biodegradabilidade do efluente de modo a confirmar sua viabilidade de tratamento através do método anaeróbico. O teste laboratorial deve abranger amostras de diferentes etapas do processo industrial de fabricação da celulose e papel no caso de plantas integradas, de modo a avaliar qual ou quais setores tem maior potencial energético.

Por último, uma análise financeira e técnica junto a fornecedores que se disponham a externar seus dados para validação deste projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, G. S. da. **Avaliação Experimental da Duração de Combustão para Diferentes Combustíveis**, em um Motor Padrão Ciclo Otto ASTM-CFR. 2007. 132p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

EPE, **Empresa de Pesquisa Energética**. Disponível em:
<<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>> Acesso em 20 set. 2019.

SANT'ANNA JUNIOR, G. L. **Tratamento biológico de efluentes: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

APPLES, L; BAEYENS, J; DEGRÈVE, J; DEWIL, R. **Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge**. *Progress in Energy and Combustion Science*. v. 34, p. 755–781, 2008.

AQUINO, S. F., STUCKEY, D. C., **Integrated model of the production of soluble microbial products (SMP) and extracellular polymeric substances (EPS) in anaerobic chemostats during transient conditions**. *Biochemical Engineering Journal*. v. 38, p.138-146, 2008.

FLOTATS, X. **New trends on anaerobic digestion for renewable energy production**. In Vinyamata, E. (Ed), *Energy and Environment: Management, Technology and Conflicts in a Warming World*. Editorial UOC, Anais... Barcelona,. 2013. p, 20-24. Disponível em: .Acesso em: 17 fev.2017

AZEVEDO, J. L. T. **Apontamentos sobre cogeração**. Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2001.

BENINCASA et al., (1990).

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Definição de Biogás.** Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/biogas/Biog%C3%A1s/17-Defini%C3%A7%C3%A3o>> Acesso em 07 jul 2019.

Tecnologia da Digestão Anaeróbia da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável, et al, Claudio Piazza, 1999.

National Confederation of Industry Brazil (CNI), 2016. **Facts and Figures.** Brazil at a Glance: <<http://www.portaldaindustria.com.br/cni/en/facts-and-figures/brazil-glance/>> Acesso em 21 jul 2019.

COELHO, S. T. **Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto utilizando um grupo gerador** de 18 kW. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 2006, Brasília. Anais. Brasília: UnB, 12p.

Tecnologias de Produção e uso de Biogás e Biometano, et al, Suani Teixeira Coelho, 2018.

Wereko-Brobby & Hagen (2000).

COLOTTA, G. S.; LOARTE, J. P.; ATUNCAR, C. Q. **Ahorro del gas de Camisea por uso de un ciclo de potencia combinado de gas y vapor en la generacion eléctrica.** *Industrial data*, v. 13, n. 1, p. 94-98, 2010.

LEO, T. J.; GRANDE, I. P.; NOTARIO, P. P. **Gas turbine turbocharged by a steam turbine: a gas turbine solution increasing combined power plant efficiency and power.** *Applied Thermal Engineering*, v. 23, n. 15, p. 1913-1929, 2003.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, B. R.; SANTOS, B. C. **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada.** In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 2002, Campinas. Anais. Campinas: UNICAMP, 5p

Driessen, W.J.B.M., Tielbaard, M.H., Vereijken, T.L.F.M. (1994). **Anaerobic treatment of distillery effluente with the UASB process**. Technology, v.30, n. 12, p. 193-201.

FEAM. FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Guia Técnico Ambiental de Biogás na Agroindústria**. Belo Horizonte, 2015.

FIGUEIREDO, F. L.; FERNANDES, F.; PETRUCCI, A. L.; FILHO, R. F.; MARSURA, M. **Análise do desempenho de um grupo gerador de 50 kVA com motor MWM adaptado a ciclo Otto, alimentado com gás natural**. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, v. 34, n. 2, p. 145-154, 2013.

GEDF-CD/FIEP (2016) a partir dos dados da FAO (2016), <[http://www.fiepr.org.br/para-sindicatos/estudos-economicos/uploadAddress/papel_digital\[75083\].pdf](http://www.fiepr.org.br/para-sindicatos/estudos-economicos/uploadAddress/papel_digital[75083].pdf)> Acesso em 09 agost 2019.

IPEA – **INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA**. Brasil 2035: cenários para o desenvolvimento. Brasília, 2017.

IANNICELLI, L. A. **Reaproveitamento Energético do Biogás de uma Indústria Cervejeira**. 2008. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Taubaté. São Paulo, 2008.

Li T, Di Z, Islam E, Jiang H, Yang X (2011) Rhizosphere characteristics of zinc hyperaccumulator *Sedum alfredii* involved in zinc accumulation.

LORA, E. E.S., VENTURINI, O. J. **Bicombustíveis**. 1.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2012. 1200 p.

McCORMICK, K.; KAUTTO, N. The **Bioeconomy in Europe**: an overview. Sustainability, v. 5, n. 6, p. 2.589-2.608, 2013.

MORRISON, B.; GOLDEN, J. S. **An empirical analysis of the industrial bioeconomy: implications** for renewable resources and the environment. *Bioresources*, v. 10, n. 3, p. 4.411-4.440, 2015.

NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão – A alternativa energética**. São Paulo: Nobel, 1986. 93p.

Paques, (2019) **Leading in biological wastewater and gas treatment**.<
<https://br.paques.nl/>> Acesso em 14 set 2019

How to cite this report: Parisi, C. and Ronzon, T.; (2016). A global view of bio-based industries: **benchmarking and monitoring their economic importance and future developments**; EUR 28376 EN; doi:10.2788/153649

COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; SILVA, O. C.; VARKULYA JR. A.; PECORA, V. **Programa de Uso Racional de Energia e Fontes Alternativas (PURE-FA)**. Trabalho apresentado no Congresso Instituto de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável (ICTR). São Paulo, 2003.

ORTOLANI, A. F.; BENNICASA, M.; LUCAS JUNIOR, J. **Biodigestores Rurais**. Boletim Técnico FUNEP Jaboticabal 1991.

PERLINGEIRO, C. A. G. **Biocombustíveis no Brasil fundamentos aplicações e perspectivas**. Rio de Janeiro: Synergia, 2014.

Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto / Probiogás ; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) ; autores, Bruno Silveira ... [et al.]. – Brasília, DF : Ministério das Cidades, 2015. 183 p. : il. – (Aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto ; 1)

SCARLAT, N. et al. **The role of biomass and bioenergy in a future bioeconomy: policies and facts**. *Environmental Development*, v. 15, p. 3-34, jul. (2015).

PIRES, A. F. F. E. Contribuição para o estudo de **avaliação do desempenho de um sistema de estabilização anaeróbia e utilização do gás produzido**. 2009. 123p. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2009.

TABATABAEIA, M. B.; RAHIM, R. A.; ABDULLAH, N.; WRIGHT, A. D. **Importance of the methanogenicarchaea populations in anaerobic wastewater treatments**. ProcessBiochemistry.v.45, p-1214-1225. 2010.DOI: 10.1016/j.procbio.2010.05.017

Tecnologias de Produção e uso de Biogás e Biometano, et al, Suani Teixeira Coelho, 2018.

ISA, Z., GRUSENMEYER, S., VERSTRAETE, W., Sulphate **reduction relative to methane production in high-rate anaerobic digestion**: technical aspects. Applied Environment Microbiology. 51, 572–579.1986.

Balço Energético Nacional <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018_Int.pdf> Acesso em 16 out 2019

Matriz energética e elétrica <<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica/BEN2018>> Acesso em 23 jun 2019

Atlas de Biomassa brasileiro <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa\(2\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf)> Acesso em 12 set 2019.

Geração de resíduos industriais e controle ambiental <https://www.researchgate.net/profile/Jose_Almir_Pereira/publication/228719448_Geracao_de_residuos_industriais_e_controle_ambiental/> Acesso em 19 set 2019.

Sistemas de tratamento de esgoto <https://www.saaeara.com.br/arquivos/outros/Tratamento_de_Esgoto.pdf> Acesso em 23 set 2019.

Tarifas de gás natural para cogeração


<<https://www.comgas.com.br/tarifas/cogeracao>> Acesso em 03 out 2019.

ANEXO

Anexo I – SISTEMAS DE REFERÊNCIA NO MUNDO INTEIRO

		REFERENCE SYSTEMS WORLDWIDE				
PULP REFERENCES (65)						
Company	City	Country	Industry	Product	Load (kg/d or m ³ /h)	Year
Dezhou Taiding New material Technology	Dezhou	China	PULP & PAPER	BIOPAQ ICX	29250	2017
Jinfenghuang Paper	Xiaogan	China	PULP & PAPER	BIOPAQ ICX	115000	2017
Sappi Lanaken Mill	Lanaken	Belgium	PULP & PAPER	BIOPAQ ICX	72000	2017
Yutian Shunfa Co.,Ltd	Yutian	China	PULP & PAPER	BIOPAQ ICX	25000	2017
Zhengzhou Kanghua Paper Co Ltd	Xinmi	China	PULP & PAPER	BIOPAQ ICX	35750	2017
China Haisum Engineering Co.,Ltd	Binh Duong	Vietnam	PULP & PAPER	BIOPAQ UASBplus	90000	2016
Dongguan Jintian Paper	Dongguan	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	140000	2016
Norsk Skog Saugbrugs	Halden	Norway	PULP & PAPER	BIOPAQ ICC	43000	2016
Norske Skog Golbey	Golbey	France	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	30.000	2016
K R Pulp & Paper	Shahjahanpur	India	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	41500	2015
KR Pulp & Papers Limited	Shahjahanpur, UP	India	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	41500	2015
Tianhe Paper	Ningyang	China	PULP & PAPER	BIOPAQ UASBplus	208	2015
Jilin Chenming Paper Group	Jilin	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	100100	2012
Dezhou Taiding New material Technology	Dezhou	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	31000	2011
AVCell NB	Atholville	Canada	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	42300	2010
Chenzhou Yunong Paper	Chenzhou	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	102000	2010
Hengxian Guangui Sucrose II	Hengxian	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	51120	2010
Jinsheng Paper	Tianjin	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	90000	2010
Mingguan Paper	Tianjin	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	75000	2010
Shandong Zhongmao Shengyuan Pulp	Dezhou	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	37800	2010
Shouguang Meiliu Paper (III)	Shouguang	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	75000	2010
Tembec	Matane	Canada	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	94350	2010
Zhanjiang Jicheng Paper	Zhanjiang	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	21000	2010
Shenghe Wastewater Treatment	Binzhou	China	PULP & PAPER	BIOPAQ UASBplus	66000	2009
Cartiera del Tolmezzo II	Tolmezzo	Italy	PULP & PAPER	BIOPAQ UASB	2400	2007
Guangxi Lalbin Dongtang Paper	Lalbin	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	38400	2007
Hengxian Guangui Sucrose I	Hengxian	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	51100	2007
Nanning Jinlang Pulp	Nanning	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	64500	2007
Shanxi Shenglong Paper	Qishan	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	98700	2007
Yanbian Chenming Paper	Yanbian	China	PULP & PAPER	BIOPAQ UASBplus	40660	2007
Guangxi Lalbin East Sugar Paper	Lalbin	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	53600	2006
Jincheng Paper	Dalian	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	22500	2006
Wuyang Yingge Paper	Luohe	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	50000	2006
Cambará	Cambará do Sul	Brazil	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	25920	2005
Guangxi East Asia Paper	Chongzuo	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	53600	2005
Shangdong Fengyuan Zhongke Ecology T	Zaozhuang	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	48000	2005
Henan Puyang Longfeng Paper	Puyang	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	52800	2004
Jiaozuo Ruifeng Paper	Jiaozuo	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	67500	2004
Nippon Paper	Iwakuni	Japan	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	26400	2004
Shandong Bohui Paper	Zibo	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	85800	2004
Shandong Guilhe Xianxing Paper	Zibo	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	220000	2004
Stora Enso Hagen-Kabel	Hagen-Kabel	Germany	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	22060	2004
Artivincó	Santa Rosa de Viterb	Brazil	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	60000	2003

Anexo II – SISTEMAS DE REFERÊNCIA NO MUNDO INTEIRO

		REFERENCE SYSTEMS WORLDWIDE				
PULP REFERENCES (65)						
Company	City	Country	Industry	Product	Load (kg/d or m ³ /h)	Year
Jiangxi Chenming Paper	Nanchang	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	83000	2003
Shandong Chenming Paper I	Shouguang	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	33000	2003
Tembec	Temiscaming	Canada	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	183600	2003
Tralin Paper	Gaotang	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	28000	2002
Yueyang Paper	Yueyang	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	65800	2002
Nanping Paper	Nanping	China	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	46315	2000
Nippon Paper	Gotsu	Japan	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	40000	1999
Boise Cascade	Jackson, AL	U.S.A.	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	18140	1998
M-Real	Hallein	Austria	PULP & PAPER	BIOPAQ IC	24500	1998
APR	Kamalapuram	India	PULP & PAPER	BIOPAQ UASB	40000	1996
Cartiera del Tolmezzo I	Tolmezzo	Italy	PULP & PAPER	BIOPAQ UASB	7200	1994
Satia Papermill	Muktasar	India	PULP & PAPER	BIOPAQ UASB	53600	1994
Harihar Polyfibres	Harihar	India	PULP & PAPER	BIOPAQ UASB	51200	1993
Bassa Friulana	Torviscosa	Italy	PULP & PAPER	BIOPAQ UASB	37440	1992
Norsk Skog Saugbrugs	Halden	Norway	PULP & PAPER	BIOPAQ UASB	28000	1992
Warana S.S.K.	Warnanagar	India	PULP & PAPER	BIOPAQ UASB	17700	1992
Cascades La Rochette	La Rochette	France	PULP & PAPER	BIOPAQ UASB	6300	1991
Drvenjaca	Fuzine	Yugoslavia	PULP & PAPER	BIOPAQ UASB	7570	1991
Kimberley Clark	Orizaba	Mexico	PULP & PAPER	BIOPAQ UASB	20150	1991
StoraEnso	Kotka	Finland	PULP & PAPER	BIOPAQ UASB	18000	1989
Lake Utopia Paper	St. John	Canada	PULP & PAPER	BIOPAQ UASB	60000	1988
Quesnel River Pulp	Quesnel	Canada	PULP & PAPER	BIOPAQ UASB	60000	1988

Anexo III – Reator Biopaq IC

BIOPAQ® IC

Características do BIOPAQ® IC

- Adequado para ambientes urbanos
- Atende a condições rigorosas
- Tanque vertical, ampla variedade de tamanhos de reator
- Confiável, sistema auto regulável de circulação interna
- Concepção de separação de 2 estágios
- Custos minimizados de neutralização
- Efluentes com qualidade consistente
- Reator compacto
- Sistema robusto
- Suporta altas variações de carga
- Partida rápida e acelerada

BIOPAQ® IC, como funciona

- 1 As águas residuais industriais entram no reator e são misturadas com a biomassa anaeróbia granular no sistema de distribuição
- 2 Os componentes orgânicos convertidos em metano (biogás)
- 3 O biogás é coletado no separador de fase inferior, gerando um "gas lift"
- 4 A água é forçada para cima e elevada pela tubulação ("riser")
- 5 O gás sai do reator no separador de líquido / gás
- 6 A água retorna através do "downer" no sistema de distribuição.
- Daí o nome: Circulação Interna
- 7 O efluente é polido no compartimento superior
- 8 O biogás do segundo compartimento é coletado no separador de fase superior
- 9 O efluente sai do reator

