

ANDRÉ LUIZ BASTOS PETITINGA FILHO

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS DE BIOMASSA
PROVENIENTES DE VEGETAÇÃO RETIRADA PARA OBRA DE
BARRAGEM**

São Paulo
2020

André Luiz Bastos Petitinga Filho

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS DE BIOMASSA PROVENIENTES DE VEGETAÇÃO RETIRADA PARA OBRA DE BARRAGEM

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como requisito básico para conclusão do Curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Área de Concentração:
Uso de Biomassa, Biodigestores e Biogás

Orientadora:
Suanie Teixeira Coelho

São Paulo
2020

RESUMO

Obras de barragem geram grande volume de biomassa proveniente de supressão vegetal. De forma geral, a correta e sustentável destinação dessa biomassa se torna um problema para os construtores, considerando que muitas vezes as espécies encontradas no local não apresentam qualquer tipo de padrão que agregue valor à indústria madeireira. Nesse contexto e, considerando que durante a fase de construção da barragem é usual serem utilizados geradores movidos a diesel, esse trabalho visa estudar a possibilidade de utilização da biomassa proveniente de supressão vegetal em obra de barragem no interior de São Paulo, para substituição parcial do óleo diesel em motores estacionários para geração de energia elétrica. Através de estudos de quantificação da madeira existente na área de supressão, foi avaliada a possibilidade de utilização da gaseificação dessa biomassa em dois geradores utilizados durante a fase de obra. De acordo com o porte dos geradores, são selecionados os tipos de leito dos gaseificadores e, baseado nos resultados demonstrados na literatura existente, será estimado o percentual de substituição do óleo diesel dos geradores. Foi avaliada, com isso, a possibilidade de se reduzir consideravelmente o impacto ambiental causado na construção da barragem tanto do lado da destinação adequada da biomassa, quanto do lado da redução de consumo de combustível fóssil.

Palavras-chave: Biomassa, Energia elétrica, Gaseificação, Supressão vegetal

ABSTRACT

Dam constructions may produce big amount of biomass from deforestation. Generally, the right and sustenaible disposal of the biomass becomes a problem for construction companies, considering most cases the local species are not comercial valuable for the wood industry. In this context and considering that during the dam construction, eletrcic generators are common equipments, this paper aims to study the usage of the deforestation biomass in a dam construction located in São Paulo state, Brazil, for diesel partial replacement in stationary motors for eletric energy generation. Using the results of studies for wood quantification in the deforestation area, the gasification of this biomass in two eletric generators was evaluated. The gasifiers beds was selected according with the size of the generators and based on the existing results in the literature, the replacement of the diesel will be calculated. The environmental impact reduction related to the dam construction was then evaluated, on both the right disposal of the biomass and the fuel consumption reduction side.

Palavras-chave: Biomass, Electric Energy, Gasification, Deforestation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Matriz energética brasileira - 2019	11
Figura 1.2 - Matriz elétrica brasileira - 2019	12
Figura 2.1 - Custo de transporte e distância entre floresta e local de destino da madeira.....	17
Figura 2.2 - Sistema Tri-trem para transporte de madeira.....	17
Figura 5.1 - Produtividade e rotação média das florestas de eucalipto e pinus no Brasil versus outros importantes players mundiais	22
Figura 5.2 - Evolução da produtividade do eucalipto e pinus de 2012 a 2018 no Brasil.....	23
Figura 5.3 - Composição da área de árvores plantadas por tipo de proprietários, 2018	25
Figura 5.4 - Histórico de balanço energético do setor de florestas plantadas.....	25
Figura 5.5 - Balanço energético do setor de florestas plantadas.....	25
Figura 5.6 - Fontes de energia utilizadas pelo setor de florestas plantadas.....	26
Figura 5.7 - Estrutura da planta cana-de-açúcar e a biomassa residual produzida. .	30
Figura 5.8 - Geração de bioeletricidade sucroenergética em GWh – 2010 a 2019... .	31
Figura 5.9 - Potência outorgada, fonte biomassa – em operação comercial (MW) ...	31
Figura 5.10 - Participação da biomassa na matriz energética mundial e contribuições da bioenergia moderna por setor (2018).....	36
Figura 5.11 - Geração de bioeletricidade no mundo por região, 2009 a 2019.	36
Figura 5.12 - Participação de renováveis na matriz energética brasileira.....	37
Figura 5.13 - Matriz energética brasileira – outras renováveis (excluindo bagaço de cana, hidráulica e lenha e carvão vegetal.....	37
Figura 5.14 - Matriz energética brasileira – consumo residencial de energia.....	38
Figura 6.1 - Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa.....	39
Figura 6.2 - Exemplo de pellets (esquerda) e briquetes (direita).....	40
Figura 6.3 - Tipos de gaseificadores por faixa de potência	46
Figura 6.4 - Descrição do processo de gaseificação em reator de leito fixo: a) <i>updraft; b) downdraft</i>	46
Figura 6.5 - Descrição do processo de gaseificação em reator de leito fluidizado	47

Figura 6.6 - Diagrama esquemático da planta GoBIGas, representando os principais processos	50
Figura 6.7 - Gaseificador FICFB em Guessing - Áustria.....	51
Figura 7.1 - Localização da Barragem Pedreira.....	55
Figura 7.2 - Projeção da Barragem Pedreira.....	56
Figura 7.3 - Projeção da área inundada pela Barragem Pedreira em sua cota máxima	58
Figura 7.4 - Logística de abastecimento de gerador na obra desde o distribuidor de combustível	59
Figura 7.5 - Logística de destinação final da biomassa gerada na obra	60
Figura 7.6 - Evidências de rachaduras radiais e tangenciais, diâmetros diversos e elevado encurvamento da biomassa gerada na Barragem Pedreira	62
Figura 7.7 - Características do sistema de combustível do gerador Caterpillar Olympian GEP44-9.....	63
Figura 7.8 - Consumo de combustível do gerador Cummins C170D6	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Consumo de madeira proveniente de florestas plantadas para uso industrial no ano de 2018	24
Tabela 5.2 - Consumo de madeira proveniente de extrativismo ($10^3\ m^3/\text{ano}$): 2013 - 2018	26
Tabela 5.3 - Área plantada de soja em mil hectares no Brasil – 2013 a 2019	28
Tabela 5.4 – Produção de soja em mil toneladas no Brasil – 2013 a 2019	28
Tabela 5.5 – Área plantada de milho em mil hectares no Brasil – 2013 a 2019	28
Tabela 5.6 – Produção de milho em mil toneladas no Brasil – 2013 a 2019.....	29
Tabela 5.7 – Área colhida de cana de açúcar em mil hectares no Brasil – 2014 a 2019	30
Tabela 5.8 – Produção de cana de açúcar em mil toneladas no Brasil – 2014 a 2019	30
Tabela 5.9 – Área colhida de coco baía em hectares no Brasil – 2013 a 2018	32
Tabela 5.10 – Produção de coco baía em mil frutos no Brasil – 2013 a 2018	32
Tabela 5.11 – Área plantada de arroz em mil hectares no Brasil – 2013 a 2018	32
Tabela 5.12 – Produção de arroz em mil toneladas no Brasil – 2013 a 2018	32
Tabela 5.13 – Geração elétrica no Brasil por fonte em GWh– 2019.....	38
Tabela 6.1 – Comparação entre gaseificador de leito fixo fluidizado	48
Tabela 6.2 – Dados básicos da planta de Guessing.....	50
Tabela 6.3 – Importantes projetos de gaseificação pelo mundo.....	52
Tabela 7.1 - Espécies a serem suprimidas para construção da Barragem Pedreira	57
Tabela 7.2 – Volumes estimados de biomassa em cada fase da obra	61
Tabela 7.3 – Espécies encontradas na região da Barragem Pedreira e suas densidades.....	61
Tabela 7.4 – Volume e peso de biomassa a ser gerada durante as fases da obra da Barragem Pedreira.....	62
Tabela 7.5 – Horas trabalhadas pelo gerador Caterpillar Olympian modelo GEP44-9 na Barragem Pedreira de jan/20 a jul/20	64
Tabela 7.6 – Horas trabalhadas pelo gerador Cummins modelo C170D6 na Barragem Pedreira de nov/19 a ago/20	64

Tabela 7.7 – Consumo de biomassa previsto para produção de energia obtida nos gerados instalados na obra	66
Tabela 7.9 - Projeção de consumo de biomassa até dezembro de 2021	67
Tabela 7.9 – Estimativa de custo de aquisição do gaseificador.	68
Tabela 7.10 – Projeção de consumo de diesel nos geradores até dezembro de 2021 e eventual redução caso fosse adotada a gaseificação da biomassa.	69

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	JUSTIFICATIVA.....	16
3	OBJETIVOS	18
3.1	GERAIS	18
3.2	ESPECÍFICOS	18
4	METODOLOGIA DA PESQUISA	19
4.1	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	19
4.2	ESTUDO DE CASO.....	19
5	ESTADO DA ARTE DO USO DA BIOMASSA	20
5.1	BIOMASSA ENERGÉTICA FLORESTAL	21
5.1.1	Florestas plantadas	21
5.1.2	Lixívia e resíduos de madeira	24
5.1.3	Extrativismo vegetal.....	26
5.2	BIOMASSA ENERGÉTICA AGRÍCOLA.....	27
5.2.1	Resíduos da soja – palha e casca	28
5.2.2	Resíduos de milho	28
5.2.3	Resíduos da cana de açúcar	29
5.2.4	Resíduos do coco	31
5.2.5	Casca de arroz	32
5.3	BIOMASSA ENERGÉTICA DE RESÍDUOS URBANOS E INDUSTRIAS	33
5.3.1	Resíduos gerados na poda urbana	33
5.3.2	Resíduos gerados na indústria madeireira.....	33
5.3.3	Resíduos gerados na indústria da construção civil	34
5.4	PARTICIPAÇÃO DA BIOMASSA NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA E MUNDIAL	34
5.4.1	BIOMASSA NA MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL	35
5.4.2	BIOMASSA NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA	37

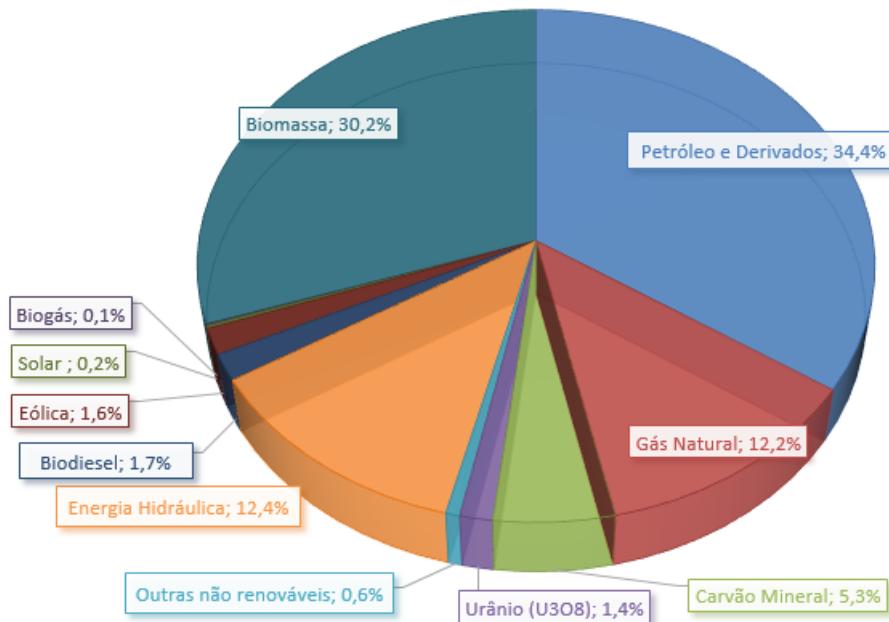
6	PROCESSOS PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DA BIOMASSA	39
6.1	PRÉ TRATAMENTO	39
6.2	COMBUSTÃO DIRETA.....	41
6.3	OUTRAS FORMAS DE CONVERSÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA .	42
6.4	GASEIFICAÇÃO	42
6.4.1	Breve histórico da gaseificação.....	43
6.4.2	Principais reações do processo de gaseificação	43
6.4.3	Principais tipos de gaseificadores.....	45
6.4.4	Planta de gaseificação GoBiGas – Gotemburgo (Suécia)	48
6.4.5	Gaseificador a vapor TUV's – Viena (Áustria)	50
6.4.6	Outros projetos de gaseificação.....	51
6.5	TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO TERMELÉTRICA.....	53
6.5.1	Conversão termelétrica através de combustão da biomassa	53
6.5.2	Conversão termelétrica através de gaseificação da biomassa.....	54
7	ESTUDO DE CASO	55
7.1	A BARRAGEM PEDREIRA	55
7.2	UTILIZAÇÃO DA BIOMASSA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA.....	58
7.3	CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DA BIOMASSA GERADA....	60
7.4	CARACTERIZAÇÃO DOS GERADORES	62
7.4.1	Gerador Caterpillar Olympian GEP44-9	63
7.4.2	Gerador Cummins C170D6	64
7.5	VIABILIDADE TÉCNICA DE UTILIZAÇÃO	64
7.6	ESTIMATIVA DE CUSTO DE IMPLANTAÇÃO	67
7.7	REDUÇÃO DE DIESEL ESTIMADA.....	69
7.8	POSSÍVEIS RESTRIÇÕES À IMPLANTAÇÃO	70
8	CONCLUSÃO.....	72
10	REFERÊNCIAS	74
	ANEXO A – AUTORIZAÇÃO DE SUPRESSÃO VEGETAL - CETESB	78

ANEXO B – PARECER TÉCNICO - CETESB	79
ANEXO C – MATERIAL LENHOSO ORIUNDO DA SUPRESSÃO DA BARRAGEM PEDREIRA.....	80

1 INTRODUÇÃO

O uso da biomassa como fonte primária de energia data dos primórdios da humanidade, quando o homem primitivo queimava lenha para se aquecer e cozinhar alimentos. Ainda hoje, essa fonte energética é muito utilizada no Brasil como pode ser visto na Figura 1.1.

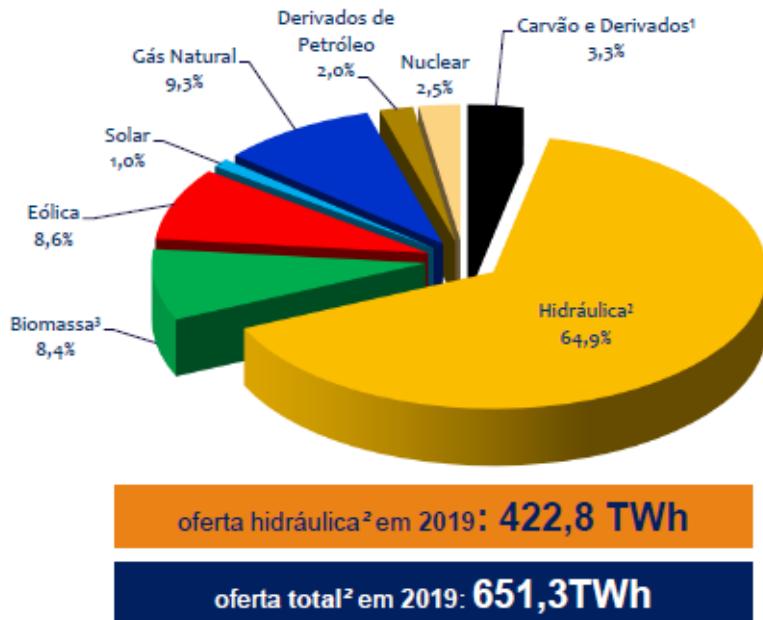
Figura 1.1 - Matriz energética brasileira - 2019



Fonte: Do próprio autor, retirado de BEN (2020)

Apesar de ser a quarta maior fonte geradora de energia elétrica para o Brasil conforme pode ser visto na Figura 1.2, o uso da biomassa para geração de energia elétrica é pouco difundido na indústria da construção de forma geral. Alguns dos fatores que justificam essa ineficiência podem incluir viés altamente conservador e inibidor de mudança para novas tecnologias ou produtos no setor da construção; mercados de crédito pouco direcionados a iniciativas de utilização de biomassa ou outras fontes alternativas em canteiros de obras; falta de políticas voltadas à eficiência energética e utilização de fontes renováveis em canteiros de obras.

**Figura 1.2 - Matriz elétrica brasileira - 2019
BRASIL (2019)**



¹ Inclui gás de coqueria, gás de alto forno, gás de aciaria e alcatrão

² Inclui importação

³ Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia, biodiesel e outras fontes primárias.

Fonte: BEN (2020)

É sabido que as tecnologias para geração de eletricidade a partir da biomassa dependem basicamente do tipo de biomassa e da escala da unidade, isto é, da quantidade de biomassa disponível e da potência a ser instalada. De forma geral, pode-se dividir essas tecnologias em dois grandes grupos de potência (COELHO, et al, 2018):

- Abaixo de 200 kW: sistemas de gaseificação de pequeno porte;
- Acima de 200 kW: ciclos a vapor.

O limite de 200 kW combina com a maior gama de potências existentes nos geradores espalhados pelos canteiros de obras de barragem, o que indica ser essa uma tecnologia adequada ao caso em questão.

A grande vantagem da biomassa como fonte renovável de energia, está relacionada com a mitigação das emissões do CO₂. Neste sentido, é dado que todo o CO₂ emitido na utilização energética da biomassa tenha sido previamente fixado no crescimento da matéria vegetal. Como principais desvantagens estão sua baixa densidade e seu considerável conteúdo de umidade que influem nos

custos associados ao seu transporte para o seu aproveitamento energético (FIGUEIREDO, 2012).

O Brasil faz parte da Convenção das Nações Unidas para Combate às Mudanças Climáticas. Na 21^a Conferência das Partes em Paris (COP21), o país informou sua Contribuição Nacional Pretendida, cuja meta geral é reduzir as emissões de GEE até o ano 2030 em 38% em relação ao nível do ano 2005. Para isso, se prevê desenvolver um conjunto de ações, políticas e normativas visando aumentar a parcela de bioenergéticos na matriz energética, incrementar a participação de biomassa, energia solar e eólica no setor elétrico, reduzir o desmatamento e minimizar as emissões do setor agropecuário (MMA, 2018).

Para todos estes fins, o uso de biomassa para energia é uma das alternativas mais promissoras no curto prazo, visto que (MMA,2018):

- A biomassa é uma fonte de energia renovável, que já está disponível e que pode substituir combustíveis fósseis, gerando emissões muito baixas, em aplicações que requerem alta temperatura (geração de eletricidade, sinterização, fusão, calcinação, etc.);
- A biomassa é biodegradável e não gera resíduos contaminantes de alto risco;
- A biomassa está disponível em quase todos os lugares, minimizando a distância de transporte e reduzindo o custo monetário, o gasto de energia e as emissões por logística;

A construção de barragens causa perda de vegetação devido à inundação da área alagada. Durante a fase de construção das mesmas existe a etapa de supressão vegetal, onde são indicados os métodos para remoção da vegetação existente, bem como o destino que deve ser dado a esse material extraído.

Durante a etapa de planejamento da Barragem de Pedreira no estado São Paulo, que é objeto deste estudo, foi elaborado o Plano Básico Ambiental pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) da Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos do Governo do Estado. Nesse plano, datado de abril de 2018, foi previsto Programa de Supressão de Vegetação que continha o Subprograma de Destinação da Biomassa.

As orientações do DAEE para elaboração do Subprograma de Destinação da Biomassa foram as seguintes (DAEE, 2018):

- Elaboração de um Estudo de Utilização do Material Lenhoso, proveniente da supressão de vegetação, como mourões a serem utilizados na fase de obras do empreendimento, especialmente para a implantação de cercas de isolamento das áreas a serem reflorestadas pelo Programa de Revegetação e Enriquecimento Florestal. Este estudo deve considerar os possíveis usos do material vegetal gerado pela atividade supressão com base nas características do material e na demanda do empreendimento;
- Os ramos mais finos, assim como folhas (e material reprodutivo, quando houver) serão picados e destinados à compostagem para a produção de adubo a ser utilizado no viveiro para produção de mudas, como adubo orgânico nas áreas a serem reflorestadas e para doação para entidades parceiras, como viveiros de produção de mudas florestais ou prefeituras da região;
- Poderá ser realizado convênio com fundações como a FUNDAG – Fundação de Apoio à Pesquisa Agrícola para viabilizar a doação do material lenhoso para uso ou realização de leilão;
- As operações de transporte e armazenamento de produtos florestais de origem nativa, deverão obrigatoriamente obter junto ao IBAMA o Documento de Origem Florestal (DOF), instituído pela Portaria nº 253, de 18 de agosto de 2006, conforme Instrução Normativa IBAMA nº112/2006 – Trata do Documento de Origem Florestal – DOF.

Nota-se que o documento elaborado pelo DAEE não previa orientação para utilização da biomassa para geração de energia elétrica dentro ou fora do empreendimento.

A possibilidade de utilização da biomassa proveniente da supressão vegetal em obras de barragens viria a resolver dois pontos cruciais: destinação da biomassa resultante da supressão e redução do consumo de diesel nos geradores de energia elétrica utilizados na fase de construção. No capítulo 2 são apresentados os principais pontos que justificam a realização deste estudo.

No terceiro capítulo são demonstrados os objetivos gerais e específicos deste trabalho.

No quarto capítulo, como metodologia da pesquisa, é demonstrada como será desenvolvida a pesquisa bibliográfica do tema além de serem apresentadas as bases para o estudo de caso.

No capítulo do estado da arte são apresentadas as principais fontes de geração de biomassa bem como seus aproveitamentos. Além disso, é demonstrado também a participação da biomassa na matriz energética mundial e brasileira.

Ainda no capítulo do estado da arte são discutidos os principais processos para aproveitamento energético da biomassa dando-se mais ênfase à gaseificação. Finalizando o capítulo, são apresentadas as principais tecnologias de conversão da energia contida na biomassa em eletricidade.

No capítulo seis, o estudo de caso, são apresentados os principais dados construtivos da barragem, sua localização e quantidade de biomassa gerada na fase de supressão vegetal. Nesse capítulo é apresentado o estudo de viabilidade técnica de utilização de gaseificadores para aproveitamento da biomassa e um estudo sucinto de viabilidade econômica.

Por fim, a partir das análises apresentadas nos capítulos anteriores são apresentadas as principais conclusões e propostas de estudos e ações para maior aproveitamento da biomassa gerada em canteiros de obras.

2 JUSTIFICATIVA

Apesar de estar no topo das matrizes energéticas e elétricas do Brasil, o aproveitamento da biomassa como fonte de energia elétrica não é considerado nas fases de construção de barragens.

A despeito de dispor de grande volume de matéria prima proveniente da supressão de vegetação necessária para limpeza do local a ser inundado e do impacto causado pela utilização de óleo diesel em geradores (tanto do ponto de vista ambiental, quanto do ponto de vista logístico e de custo), nenhum estudo foi encontrado tratando do tema principal desse trabalho que é o de aproveitar toda essa biomassa para gerar eletricidade nos canteiros de obras.

O aproveitamento da biomassa para geração de energia nas fases de construção de barragem pode se tornar uma alternativa ainda mais interessante quando for comparado todo o ciclo de destinação da biomassa com o ciclo de produção de energia nos geradores.

A operação de geradores em obras de barragens abrange questões logísticas muitas vezes complexas que englobam transporte de grandes volumes de combustível até o canteiro de obras, armazenamento deste combustível em tanques instalados no local da construção da barragem e a logística interna de abastecimento desses equipamentos.

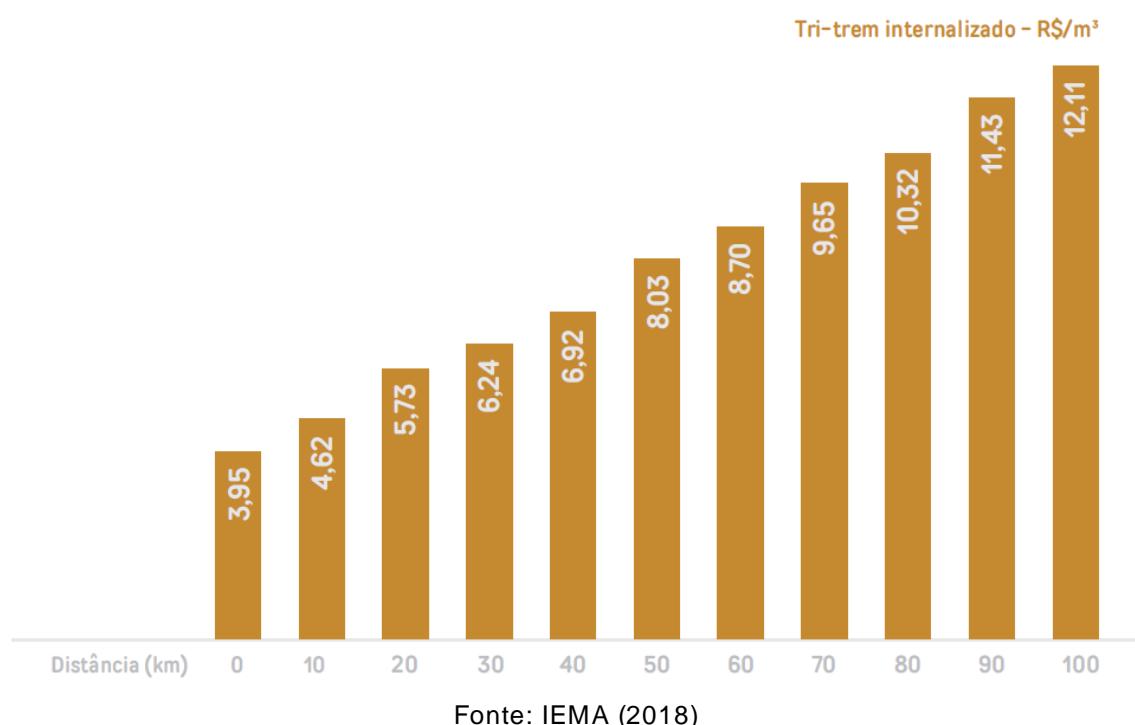
Na outra ponta, se não aproveitada dentro da própria obra, a destinação da biomassa envolve operações de carregamento em caminhões adequados e transporte a longas distâncias. Pelo volume de material gerado na supressão vegetal em obras desse porte, o número de carregamentos e viagens tende a ser elevado. Para se ter uma ideia do impacto causado pelo custo de transporte da biomassa, a Figura 2.1 demonstra o custo de transporte e distância entre floresta e local de destino da madeira, considerando transporte realizado por Trem (Figura 2.2). À época deste estudo, o valor do óleo diesel era em média R\$3,00 por litro segundo dados da Agência Nacional do Petróleo, valor menor do que o praticado atualmente. Caso fossem aplicados os valores atuais para o óleo diesel, item que representa parte considerável do custo de transporte, os valores por m³ transportados seriam ainda maiores.

Há de se destacar ainda, que através da sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) perante o Acordo de Paris firmado durante a 21^a

Conferência das Partes (COP21), o Brasil assumiu o compromisso de reduzir a emissão de gases de efeito estufa (GEE) para 37% abaixo dos níveis de 2005 até 2025, com intenção de redução para 43% até 2030, considerando todos os setores da economia (IEMA, 2018).

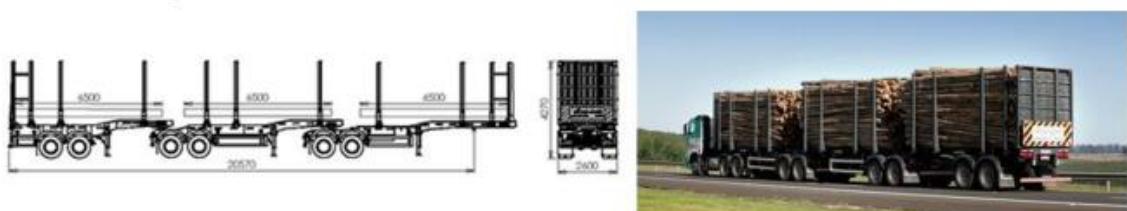
Nesse sentido é importante que toda a sociedade contribua para que a meta assumida pelo Brasil no Acordo de Paris seja cumprida.

Figura 2.1 - Custo de transporte e distância entre floresta e local de destino da madeira



Fonte: IEMA (2018)

Figura 2.2 - Sistema Tri-trem para transporte de madeira



Fonte: IEMA (2017)

3 OBJETIVOS

3.1 GERAIS

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a possibilidade da utilização de biomassa proveniente da supressão de vegetação na obra da Barragem Pedreira no interior de São Paulo como fonte alternativa para substituição parcial de óleo diesel em geradores, com a finalidade de suprir a demanda de energia elétrica nos canteiros de obra e também dar destino adequado à biomassa gerada.

A biomassa será proveniente basicamente de floresta nativa, com algumas áreas de reflorestamento. A etapa de supressão vegetal faz parte da construção da barragem e só é permitida após licenciamento e autorização da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), conforme pode ser visto nos ANEXOS A e B.

3.2 ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desse projeto são:

- Desenvolver uma revisão bibliográfica das principais formas de utilização da biomassa para geração de energia elétrica;
- Desenvolver uma análise técnica e econômica básica com o intuito de demonstrar a possibilidade de utilização da biomassa como combustível nos geradores.
- Apresentar estudo baseado nas quantidades de biomassa provenientes de supressão de vegetação das áreas a serem alagadas na Barragem Pedreira e, com base em estudos existentes na área de utilização de biomassa em geradores, avaliar a possibilidade de substituição parcial do óleo diesel em dois geradores utilizados na fase de construção da barragem.

4 METODOLOGIA DA PESQUISA

4.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Para alcançar os objetivos específicos deste trabalho será realizada uma revisão bibliográfica relativa aos processos de utilização de biomassa para geração de energia elétrica. Com essa pesquisa pretende-se compreender qual a forma mais adequada para utilização da biomassa nos geradores selecionados na obra. A pesquisa será realizada em artigos, livros, normas e sites técnicos especializados,

4.2 ESTUDO DE CASO

Com base em relatórios quantitativos e qualitativos da biomassa proveniente da supressão da vegetação da área da Barragem Pedreira, será avaliada a possibilidade de substituição do óleo diesel nos geradores por esse material. A forma como essa biomassa será utilizada para se realizar essa substituição bem como o consumo médio estimado serão determinados a partir de revisão da bibliografia disponível.

Ao final do trabalho ainda será indicada a quantidade de combustível economizado apenas na substituição do diesel nos geradores (desconsiderando todo o combustível gasto na logística de chegada do combustível à obra e desconsiderando a destinação da biomassa para fora da obra). Esse valor poderá servir de base para um futuro trabalho acerca da viabilidade econômica de um projeto deste tipo.

5 ESTADO DA ARTE DO USO DA BIOMASSA

O uso de biomassa tem diversas finalidades tanto do ponto de vista energético como do ponto de vista não energético. Do ponto de vista energético pode-se destacar o seu vasto uso como fonte primária de calor e também a possibilidade de geração de energia elétrica. Do ponto de vista não energético, podem-se ser destacadas as indústrias moveleiras, de construção e serrarias. Como o objetivo deste trabalho é discorrer sobre o uso da biomassa para fins energéticos, o uso primário da biomassa para fins não energéticos não será foco de discussão, com exceção dos casos de resíduos gerados por essas atividades e que possam ser aproveitados para geração de energia.

A bioenergia corresponde à energia gerada derivada da biomassa. O termo biomassa inclui toda matéria de origem vegetal existente na natureza ou gerada pelo homem e/ou animais: resíduos urbanos, rurais (agrícolas e de pecuária), agroindustriais, óleos vegetais, bem como combustíveis produzidos a partir de culturas agrícolas ou resíduos (COELHO, et.al, 2018).

De acordo com o Ministério de Minas e Energia em seu Plano Nacional de Energia 2030, a biomassa é classificada como recurso energético nas categorias de biomassa energética florestal, seu produtos e subprodutos ou resíduos; biomassa energética agrícola, as culturas agroenergéticas e os resíduos e subprodutos das atividades agrícolas, agroindustriais e da produção animal; e rejeitos urbanos (MME, 2007).

Em termos de produção de biomassa, o Brasil aparece como destaque mundial no mercado de produtos agrícolas, agroindustriais e silviculturas. Fatores como grande extensão territorial, clima favorável, exuberância de biodiversidade, desenvolvimento científico e tecnológico do setor agrícola, juntamente com agroindústria madura e bem consolidada demonstram a capacidade de o país firmar papel de destaque no uso da biomassa para fins energéticos. Há vários estudos sobre o potencial de aproveitamento energético de biomassa, como o atlas de biomassa do brasil 2009,2012 e atualmente os resultados de dois projetos – mapa de potencial de biogás e biometano em São Paulo e atlas de bioenergia de São Paulo (pede a vanessa as referencias)

O setor sucroalcooleiro aparece como grande destaque na produção de energia a partir de biomassa no país. Além do seu principal fim que é produzir

álcool, essa indústria vem se aprimorando ano após ano, para gerar também eletricidade através do aproveitamento dos resíduos oriundos da sua atividade principal. Outro grande setor que vem aprimorando o aproveitamento da biomassa é o de papel e celulose. Os resíduos de madeira e o licor negro oriundos do processo de obtenção da celulose já são muito utilizados na geração de energia nas plantas industriais e, em muitos casos, há exportação de excedente para a rede nacional de energia elétrica. Além desses dois principais setores existem iniciativas menores para aproveitamento de biomassa para geração de energia elétrica, como a utilização de capim elefante, geração de biogás em aterros e na pecuária e aproveitamento de resíduos sólidos urbanos.

A seguir, serão discutidas as principais fontes de produção da biomassa com fins de geração de eletricidade.

5.1 BIOMASSA ENERGÉTICA FLORESTAL

A produção de biomassa para fins energéticos proveniente de florestas pode ser dividida em três grandes grupos. O primeiro deles, como o produto direto de florestas plantadas para fins energéticos que tem como principal objetivo a obtenção de lenha e carvão muito utilizados como fonte primária de calor para cocção de alimentos em regiões menos desenvolvidas e geração de calor nas indústrias. O segundo grande grupo de biomassa florestal, se caracteriza por ser obtido através do processamento da madeira pela indústria de papel e celulose, gerando licor negro e resíduos de madeira. O terceiro grande grupo de biomassa florestal se caracteriza por ser aquele obtido diretamente da atividade extrativista vegetal, onde os produtos são coletados em vegetações nativas espontâneas e podem ser produtos madeireiros (madeira em tora, carvão, etc.) e não-madeireiros (borracha, frutos, etc.).

5.1.1 Florestas plantadas

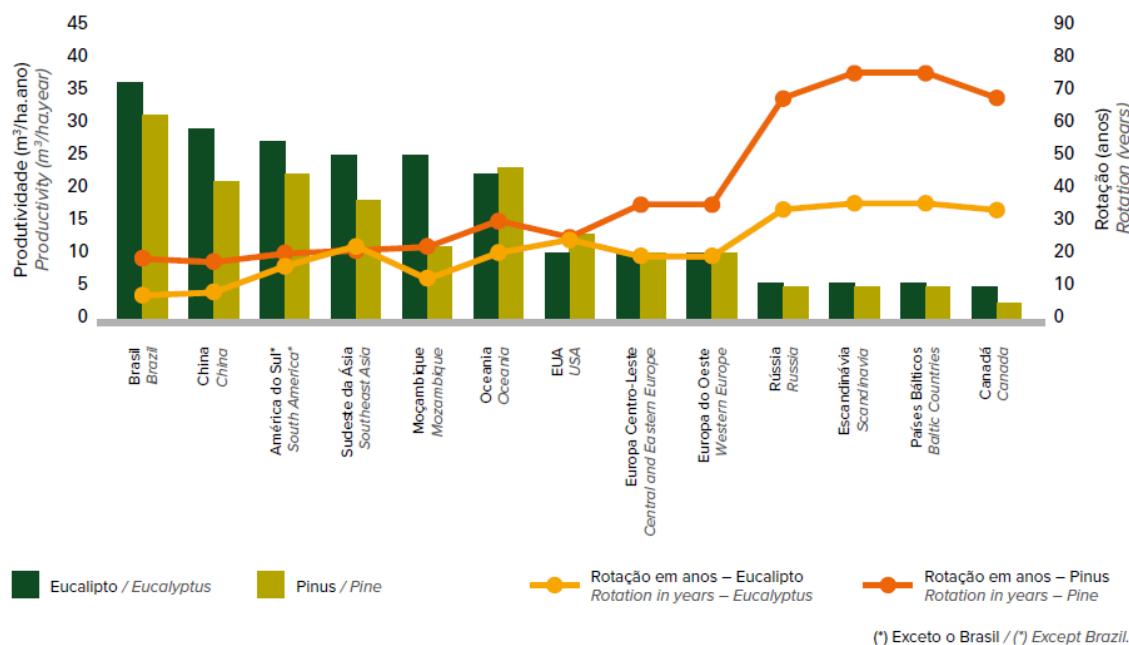
Desde a metade do século XX, o Brasil vem passando por um forte programa de reflorestamento, o que fez florescer uma indústria florestal brasileira, impulsionada principalmente pela região sul do país com base nas florestas de Araucárias.

O sucesso dos programas de reflorestamento pode ser atribuído à relativa alta produtividade das florestas plantadas, baixo custo da mão-de-obra e baixo preço da terra. Altas produtividades têm sido alcançadas ao se dar preferência

pelo plantio de espécies exóticas de rápido crescimento do gênero Eucalyptus e Pinus (MME, 2007).

Referência mundial pela tecnologia florestal, o setor brasileiro tem a maior produtividade, considerando volume de madeira produzido por área ao ano, e uma das rotações mais curtas, considerando o tempo decorrido entre o plantio e a colheita das árvores do mundo (Figura 5.1). Em 2018, o Brasil apresentou uma produtividade média de 36,0 m³/ha.ano para os plantios de eucalipto, enquanto a dos plantios de pinus foi de 30,1 m³/ha.ano (IBÁ e PÖRY, 2019).

Figura 5.1 - Produtividade e rotação média das florestas de eucalipto e pinus no Brasil versus outros importantes players mundiais



Fonte: IBÁ e PÖRY (2019)

A despeito das crises hídricas e climáticas enfrentadas no Brasil nos últimos anos em diversas regiões, as florestas plantadas têm mantido sua produtividade alta, muito em função do grande e contínuo investimento em pesquisa e desenvolvimento, fazendo com que o manejo florestal seja cada vez melhor. Como pode ser visto na Figura 5.2, de 2012 a 2018 houve incremento de produtividade médio de 0,5% a.a. no cultivo de eucalipto. Já no cultivo de pinus, houve decréscimo médio de produtividade de 0,8% a.a. em decorrência da substituição da cultura de pinus por eucalipto por grandes empresas do setor, naturalmente conhecidas por terem altos índices de produtividade, segundo a Indústria Brasileira de Árvores.

Figura 5.2 - Evolução da produtividade do eucalipto e pinus de 2012 a 2018 no Brasil.



Fonte: IBÁ e PÖYRY (2019)

Segundo dados da Indústria Brasileira de Árvores, a área total de árvores plantadas no Brasil totalizou 7,83 milhões de hectares em 2018, sendo que 5,7 milhões desse total foram ocupados pelo plantio de eucalipto enquanto as áreas com pinus somam 1,6 milhões de hectares. Importante para garantir a sustentabilidade do setor de florestas plantadas, a certificação atingiu em 2018 o patamar de 45% de área certificada em manejo florestal.

Apesar de todo o potencial que as florestas plantadas apresentam, apenas 35% do total de madeira consumido para uso industrial foi direcionado para fins energéticos, como pode ser visto na Tabela 5.1. Além disso, essa quantidade foi utilizada basicamente para produção de lenha industrial e carvão, cuja finalidade principal é a utilização como matéria-prima na indústria siderúrgica.

Considerando apenas o potencial excedente de exploração das florestas plantadas, ou seja, desconsiderando todas as utilizações explicitadas na Tabela 5.1, percebe-se que há enorme potencial de aproveitamento dessa biomassa para produção de energia, quer seja por processos de combustão direta, quer seja por processos de gaseificação.

Tabela 5.1 - Consumo de madeira proveniente de florestas plantadas para uso industrial no ano de 2018.

Segmento / Segment	Milhões m ³ / Million m ³			
	Eucalipto / Eucalyptus	Pinus / Pine	Outras / Others	Total
Celulose e Papel / Pulp and Paper	79,9	10,3	0,1	90,3
Painéis Reconstituídos / Panels	6,6	7,4	0,4	14,4
Indústria Madeireira / Lumber	6,0	27,9	0,4	34,3
Carvão / Charcoal	23,4	-	-	23,4
Lenha Industrial / Industrial Firewood	47,1	4,0	4,4	55,5
Madeira Tratada / Treated Wood	1,4	-	-	1,4
Outros / Others	1,6	0,1	-	1,7
Total	166,0	49,7	5,3	221,0

Fonte: IBÁ e PÖYRY (2019)

5.1.2 Lixívia e resíduos de madeira

Na produção da pasta celulósica para a indústria de papel, a madeira é a matéria-prima utilizada, digerida através de um processo de cozimento chamado processo Kraft (MME, 2007). Esse processo gera uma lixívia escura, também chamada de licor negro, que é queimada em caldeiras de recuperação liberando calor e sais orgânicos. O calor gerado nas caldeiras é suficiente para suprir a demanda térmica das plantas e boa parte da demanda elétrica também.

Além do licor negro, o setor de papel e celulose gera resíduos de madeira no processo de colheita constituídos basicamente por sobras de madeira, galhos, casca e raízes dentre outros. Estima-se que em plantios de Pinus, 28% do peso total da árvore virem resíduos, enquanto que em plantios de eucalipto, 22% do peso da árvore se transformem em resíduos.

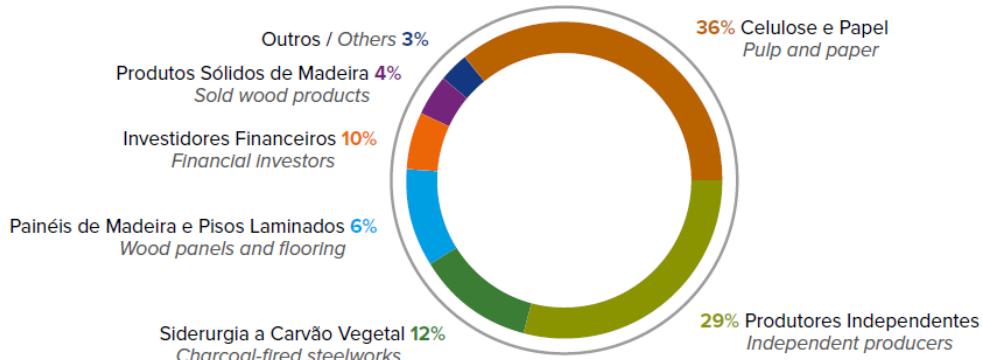
A indústria do papel e celulose é a principal fomentadora das florestas plantadas. No ano de 2018, 36% das áreas plantadas pertenciam a essa indústria (Figura 5.3), que basicamente são compostas por pinus, por sua característica resistente a variações climáticas e eucalipto, por ter baixa rotação e alta produtividade.

O país mantém posição de destaque na produção mundial de papel e celulose, sendo que nesse último produto o Brasil encerrou o ano de 2018 na segunda posição mundial.

Do ponto de vista energético, a indústria de árvores plantadas foi capaz de produzir 73% do consumo próprio total de energia elétrica do ano de 2018 (Figura 5.4). Muitas das modernas fábricas são autossuficientes, o que proporcionou exportação de 18,3 milhões de GJ excedentes para a rede pública,

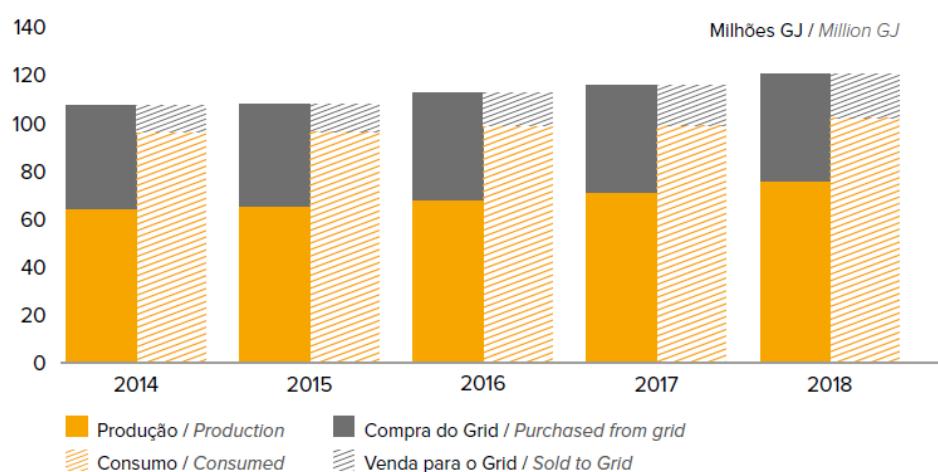
de acordo com a IBÁ (Figura 5.5). O licor negro e a biomassa florestal representam 64,3% e 18,1%, respectivamente, de toda a energia produzida pelo setor (Figura 5.6).

Figura 5.3 - Composição da área de árvores plantadas por tipo de proprietários, 2018



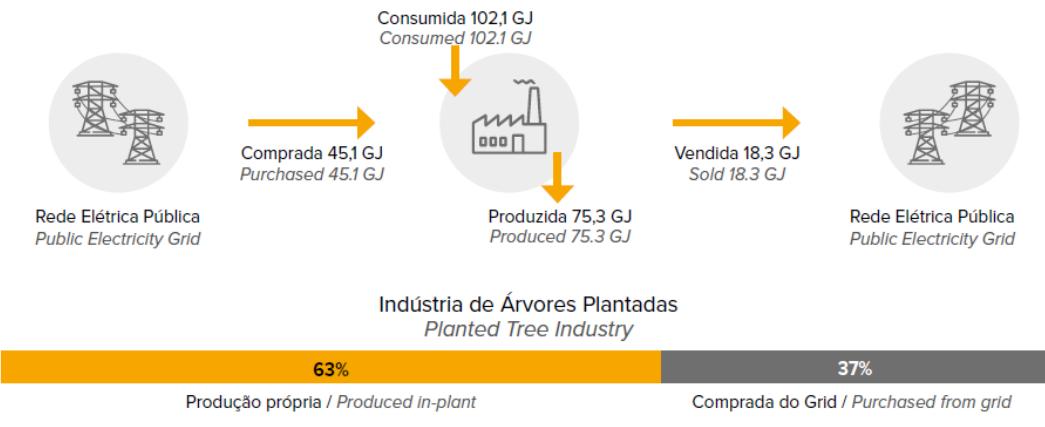
Fonte - IBÁ e PÖYRY (2019)

Figura 5.4 - Histórico de balanço energético do setor de florestas plantadas.



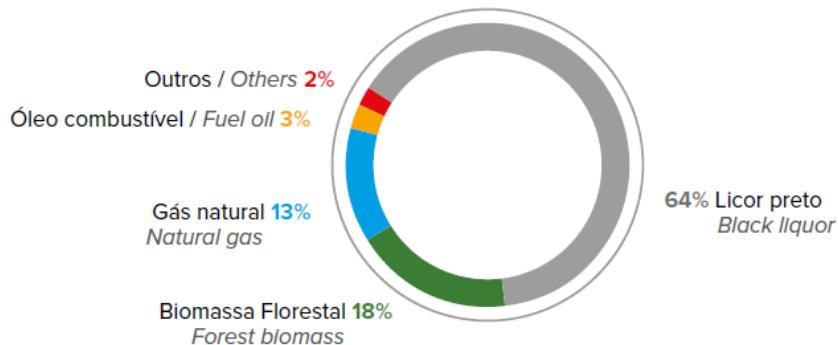
Fonte - IBÁ e PÖYRY (2019)

Figura 5.5 - Balanço energético do setor de florestas plantadas.



Fonte - IBÁ e PÖYRY (2019)

Figura 5.6 - Fontes de energia utilizadas pelo setor de florestas plantadas.



Fonte - IBÁ e PÖYRY (2019)

5.1.3 Extrativismo vegetal

Processo de exploração dos recursos vegetais nativos, que compreende a coleta ou apanha de produtos, como madeiras, látex, sementes, fibras, frutos e raízes, entre outros, de forma racional, permitindo a obtenção de produções sustentadas ao longo do tempo, ou de modo primitivo e itinerante, possibilitando, geralmente, apenas uma única produção (IBGE, 2018).

Dentro desse conceito, pode-se dividir o extrativismo vegetal em dois grandes grupos: madeireiros que envolve madeiras em tora, folhas, casca e outros e não madeireiros que envolve produtos alimentícios, ceras, oleaginosas e outros.

Observa-se nos últimos anos decréscimo acentuado na extração de produtos madeireiros (Tabela 5.2), fruto, em grande parte, do crescimento da produção de madeira com origem em florestas cultivadas. Vale destacar ainda que o maior controle na exploração de madeiras nativas também propiciou a redução desse número nos últimos anos.

Tabela 5.2 - Consumo de madeira proveniente de extrativismo (10³ m³/ano): 2013 - 2018

Brasil	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Extração vegetal	52.860	50.135	45.911	41.190	37.290	34.522
Carvão vegetal	8.385	8.509	6.642	4.530	3.594	2.819
Lenha	30.955	28.907	26.960	25.163	21.476	20.087
Madeira em tora	13.519	12.719	12.309	11.497	12.219	11.616

Fonte: IBGE (2018)

Como poder ser observado na Tabela 5.2, a lenha representa a maior parcela do consumo de madeira proveniente de extrativismo vegetal. Apesar de ter o seu consumo reduzido de 2013 a 2018, a lenha ainda é muito utilizada para cocção no setor residencial, além de ser usada em menor escala para

aquecimento e proteção contra mosquitos e animais. A região nordeste do Brasil se mostra como a mais dependente desse tipo de biomassa.

Do outro lado, o setor industrial praticamente não utiliza mais madeira proveniente de extrativismo, fruto principalmente da evolução da indústria das florestas plantadas.

5.2 BIOMASSA ENERGÉTICA AGRÍCOLA

A produção de biomassa para fins energéticos proveniente de atividades agrícolas pode ser dividida em dois grandes grupos. O primeiro grupo está diretamente relacionado com os resíduos gerados nas atividades de colheita dos produtos agrícolas, destacando-se aqui o enorme potencial verificado nas culturas de soja, milho, cana de açúcar, e coco. O segundo grupo está diretamente relacionado ao resíduo gerado pelo processamento desses produtos agrícolas pelas indústrias, destacando-se aqui o bagaço de cana de açúcar e casca de arroz.

A análise do potencial de utilização do grupo proveniente dos resíduos gerados na colheita deve ser feita com cautela, pois em muitos casos os resíduos que permanecem na zona de plantio exercem importante função do ponto de vista agrícola, contribuindo para reposição de nutrientes do solo, retendo a umidade e evitando erosão.

No tocante ao aproveitamento desses dois grupos, pode-se dizer que há três formas principais de aproveitamento da biomassa para fins energéticos: queima desse material para combustão direta ou em caldeiras, gaseificação para produção de gás de síntese ou processamento desses resíduos para produção de etanol de segunda geração.

Estudos do GBio – Grupo de Pesquisa em Bioenergia localizado na Universidade de São Paulo, demonstram a disponibilidade de biomassa no país através do Atlas de Bioenergia do Brasil lançado em 2009 e revisado em 2012 (COELHO et. al., 2012). Há também projeto em elaboração voltado a avaliação do potencial de aproveitamento energético de resíduos, inclusive resíduos agrícolas para o estado de São Paulo, que será o Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (COELHO, et. al., 2020).

5.2.1 Resíduos da soja – palha e casca

Originária da China, a soja é uma leguminosa muito rica em proteínas. Atualmente o Brasil é um dos maiores produtores de soja do mundo, com uma produção de aproximadamente 120 milhões de toneladas no ano de 2018, cobrindo uma área plantada de pais de 35 milhões de hectares.

A área plantada e a produção desse grão aumentam ano após ano, conforme pode ser visto nas Tabelas 5.3 e 5.4. Segundo Nogueira *et.al* (2000) *apud* Vieira (2012), estima-se que para cada hectare de soja seja produzido de 3,0 a 4,0 toneladas de resíduos, demonstrando o enorme potencial em termos de quantidade de resíduos dessa cultura.

Tabela 5.3 - Área plantada de soja em mil hectares no Brasil – 2013 a 2019

PRODUTO	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19
SOJA	30.173	32.093	33.252	33.909	35.149	35.874

Fonte: CONAB (2020)

Tabela 5.4 – Produção de soja em mil toneladas no Brasil – 2013 a 2019

PRODUTO	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19
SOJA	86.173	97.094	95.698	115.027	123.259	119.718

Fonte: CONAB (2020)

5.2.2 Resíduos de milho

Milho é um dos grãos mais produzidos no Brasil, servindo tanto para a nutrição humana como animal. A produtividade dessa cultura varia muito com relação à fertilidade do solo e gestão da colheita, apresentando no Brasil 3 safras anuais. As áreas plantadas e quantidades produzidas são mostradas nas Tabelas 5.5 e 5.6.

Em termos de resíduos, o milho tem como rejeito durante sua colheita e processamento o sabugo, colmo, folhas e palha e apresenta alto potencial de geração de biomassa. Conforme Koopmans e Koppejan (1997) *apud* MME (2007), a produção de resíduos de milho para cada tonelada colhida é de 2,3 toneladas.

Uma particularidade do aproveitamento do milho para fins energéticos é que a sua palha e sabugo só podem ser considerados quando forem provenientes das indústrias de processamento de milho verde ou para produção de sementes.

Tabela 5.5 – Área plantada de milho em mil hectares no Brasil – 2013 a 2019

PRODUTO	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19
MILHO	15.829	15.693	15.923	17.592	16.616	17.493

Fonte: CONAB (2020)

Tabela 5.6 – Produção de milho em mil toneladas no Brasil – 2013 a 2019

PRODUTO	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19
MILHO	80.052	84.672	66.531	97.843	80.710	100.043

Fonte: CONAB (2020)

5.2.3 Resíduos da cana de açúcar

A produção de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é uma das atividades agrícolas mais importantes e tradicionais da agricultura em diversos países tropicais. Trata-se de uma planta herbácea, cespitosa e perene, da família das gramíneas, que necessita de solo profundo e fértil, uma precipitação pluviométrica mínima bem-distribuída que varia de 1.200 a 1.300 mm/ano e temperaturas entre 20 e 24°C, e não tolera geadas. É conveniente colhê-la apenas durante certos períodos do ano por causa de seu índice máximo do açúcar (MME, 2007).

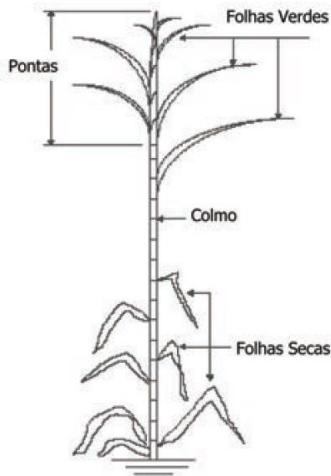
O Brasil apresenta papel de destaque mundial na produção de cana de açúcar, sendo o maior produtor do mundo. Por ter boa parte do território em região tropical, a cana de açúcar pode ser produzida em boa parte da extensão do país.

A biomassa resultante da colheita da cana de açúcar são as folhas e ponteiros, conforme representado na Figura 5.7. Fatores como modo de colheita, clima da região, solo, tipo de fertirrigação e outros exercem influência direta na quantidade de resíduos gerados. De acordo com HASSUNAI *et al.* (2005) *apud* (MME, 2007), a cada tonelada de cana colhida são produzidos, em média, 140kg de matéria seca de folhas e ponteiros da planta, comumente classificados como palha da cana.

Os avanços tecnológicos do setor no que tange a melhoramento genético das mudas e aprimoramento dos processos de colheita justificam o fato de mesmo tendo uma redução da área colhida, houve aumento de produção nos últimos anos, como pode ser notado nas Tabelas 5.7 e 5.8.

Após o processamento da cana de açúcar, o bagaço é a principal biomassa gerada. Ele é obtido pelo processo de moagem do colmo da cana, realizado para a extração do caldo. Nesse processo há a separação da parcela fibrosa do colmo que dá origem ao bagaço.

Figura 5.7 - Estrutura da planta cana-de-açúcar e a biomassa residual produzida.



Fonte: MME (2007)

Tabela 5.7 – Área colhida de cana de açúcar em mil hectares no Brasil – 2014 a 2019

PRODUTO	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20
CANA DE AÇÚCAR	9.004	8.655	9.049	8.729	8.589	8.442

Fonte: CONAB (2020)

Tabela 5.8 – Produção de cana de açúcar em mil toneladas no Brasil – 2014 a 2019

PRODUTO	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20
CANA DE AÇÚCAR	634.767	665.586	657.184	633.262	620.435	642.718

Fonte: CONAB (2020)

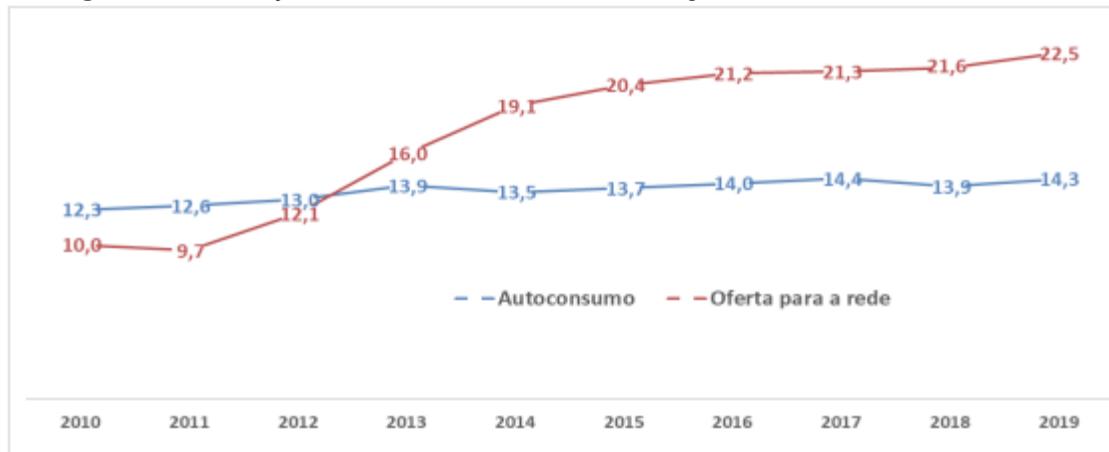
De acordo com COPERSUCAR 03 (1998) *apud* MME (2007) o bagaço de cana de açúcar corresponde, em base seca, a 12,5% e 15,0% do peso da produção bruta de colmos, ou seja, pode-se considerar que a cada tonelada de colmo produzida, 135 kg de bagaço em base seca é produzido.

O bagaço de cana de açúcar representa a principal fonte de biomassa para fins energéticos no Brasil. Além de tornar o setor sucroalcooleiro autossuficiente em termos de energia elétrica, o setor exporta para rede quantidade maior de energia do que a necessária para o próprio uso.

Dados da ÚNICA comprovam que em 2019 o setor sucroenergético gerou 14.318 GWh para consumo próprio e exportou para a rede 22.509 GWh. A evolução das quantidades de energia utilizadas para autoconsumo e ofertadas para a rede podem ser observadas na Figura 5.8. Consta-se também um significativo ganho de eficiência na geração dessa energia elétrica. Ainda de acordo com a ÚNICA, na safra de 2010/2011, cada tonelada de cana de açúcar processada resultou em um total de 36 kWh na média do país. Já na safra de 2019/20, cada tonelada de cana de açúcar processada resultou em um total de 57,3 kWh na média.

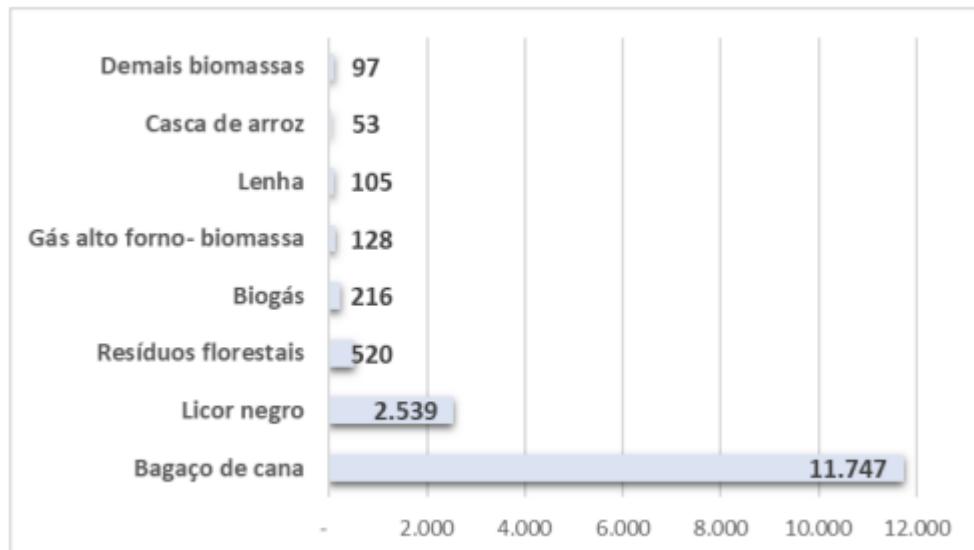
Em termos de capacidade instalada, o setor sucroenergético possui 406 usinas termelétricas (UTEs) em operação comercial, detendo 11.747 MW. Em comparação com toda a matriz energética à base de biomassa, o bagaço de cana representa 76% do total de potência outorgada, conforme Figura 5.9 (UNICA, 2020).

Figura 5.8 - Geração de bioeletricidade sucroenergética em GWh – 2010 a 2019



Fonte: UNICA (2020)

Figura 5.9 - Potência outorgada, fonte biomassa – em operação comercial (MW)



Fonte: UNICA (2020)

5.2.4 Resíduos do coco

O coqueiro (*Cocos nucifera L.*) é uma palmeira perene, originária do sudeste asiático, que foi introduzida no Brasil por volta de 1553, no estado da Bahia, trazida pelos portugueses. Por ser uma cultura de clima tropical, encontrou condições propícias para seu desenvolvimento no país e se espalhou

pelas regiões Norte, Nordeste e Sudeste (Pereira, 2012; Purseglove, 1975 *apud* Rocha *et. al.*, 2012).

A casca do coco verde representa um grande problema nos centros urbanos, principalmente no litoral do Brasil. Segundo dados da Embrapa, nos grandes centros urbanos do litoral brasileiro, estima-se que 70% do lixo gerado seja composto por cascas de coco verde. Apesar disso, esse produto apresenta grande potencial de exploração da sua fibra para fins artesanais e para utilização com fins energéticos.

Segundo dados do IBGE, o Brasil encerrou o ano de 2018 com aproximadamente 200.000 hectares de área colhida contando com uma produção de 1,5 bilhões de frutos. Estima-se que para cada tonelada de coco produzida sejam gerados 850 kg de casca. A evolução da produção pode ser vista nas Tabelas 5.9 e 5.10.

Tabela 5.9 – Área colhida de coco baía em hectares no Brasil – 2013 a 2018

PRODUTO	2013	2014	2015	2016	2017	2018
COCO DA BAÍA	259.015	252.366	243.971	234.781	210.612	199.624

Fonte: IBGE (2020)

Tabela 5.10 – Produção de coco baía em mil frutos no Brasil – 2013 a 2018

PRODUTO	2013	2014	2015	2016	2017	2018
COCO DA BAÍA	1.926.857	1.946.073	1.786.145	1.756.264	1.473.426	1.564.500

Fonte: IBGE (2020)

5.2.5 Casca de arroz

Durante o processo de beneficiamento do arroz ocorre a retirada da casca. De acordo com NOGUEIRA e LORA (2002) *apud* MME (2007), considera-se que para cada tonelada de arroz sejam gerados 180 kg de resíduos em forma de casca. Considerando a grande produção desse grão no Brasil (Tabelas 5.11 e 5.12), percebe-se o potencial de produção da biomassa casca de arroz.

Tabela 5.11 – Área plantada de arroz em mil hectares no Brasil – 2013 a 2018

PRODUTO	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19
ARROZ	2.373	2.295	2.008	1.981	1.972	1.703

Fonte: CONAB (2020)

Tabela 5.12 – Produção de arroz em mil toneladas no Brasil – 2013 a 2018

PRODUTO	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19
ARROZ	12.122	12.445	10.603	12.328	12.064	10.484

Fonte: CONAB (2020)

5.3 BIOMASSA ENERGÉTICA DE RESÍDUOS URBANOS E INDUSTRIAS

A biomassa energética proveniente de resíduos urbanos pode ser dividida em dois grandes grupos.

O primeiro grupo se refere aos resíduos sólidos e é comumente chamado de lixo. É composto por uma mistura heterogênea de plásticos, metais, vidros, madeiras, papéis e matérias orgânicas. Tem como destinação os aterros sanitários, que são um grande problema nos grandes centros urbanos. Nesse trabalho, será discorrido apenas sobre o resíduo sólido proveniente das podas das árvores presentes nas cidades.

O segundo grupo se refere aos resíduos líquidos e é proveniente dos efluentes líquidos domésticos e comerciais que são encaminhadas às redes de tratamento de esgoto municipais. Após tratamento desses efluentes, a parte tratada é destinada a rios, lagos e reservatórios e a massa orgânica produzida (lodo) é encaminhada para descarte. O lodo tem potencial para produção de biogás e vários estudos estão sendo desenvolvidos no sentido de viabilizar esse aproveitamento.

Para efeitos de aproveitamento de biomassa, os resíduos industriais podem ser divididos em três grupos: indústria madeireira, indústria da construção civil e demais setores da indústria, que envolvem, por exemplo, a indústria de produção de carne com alto potencial de produção de biogás. A seguir serão tratados apenas os potenciais da indústria madeireira e da construção civil.

5.3.1 Resíduos gerados na poda urbana

As árvores existentes nos centros urbanos geram enorme quantidade de resíduos de biomassa provenientes das atividades de manutenção das áreas verdes e da rede de energia elétrica presente nas cidades.

Existem incertezas quanto às quantidades de biomassa geradas nessas atividades por não se haver gestão adequada desses resíduos. Estima-se que no estado de São Paulo, 70 mil toneladas de poda urbana são geradas por ano, com descarte predominantemente sendo realizado em aterros (ANATER, 2020).

5.3.2 Resíduos gerados na indústria madeireira

Os resíduos industriais de madeira se classificam em serragem, cepilho, sólidos de madeira, cascas e outros e são gerados desde o transporte da

madeira em torno à indústria, até seu manuseio e processamento, finalizando no produto acabado (WIECHETECK, 2009).

Estima-se que essa indústria gere até 50% de resíduos no processo de transformação das madeiras em formas de toras para os produtos desejados. Há empresas que simplesmente não dão importância a esse resíduo gerado e o descartam de forma inadequada (HARTMANN, 2017).

5.3.3 Resíduos gerados na indústria da construção civil

No segmento da construção civil no país é comum não haver a segregação da madeira dos outros resíduos sólidos e seu destino final é via de regra o aterro sanitário. Em alguns aterros, principalmente nas regiões Sul e Sudeste, há pequena reciclagem de resíduos da construção civil, mas a madeira não é recuperada nestas usinas e permanece como dejeto nos aterros (WIECHETECK, 2009).

Quando ocorre a segregação da madeira no local da obra, estes resíduos são enquadrados na categoria dos resíduos destinados preferencialmente à reutilização, reciclagem ou armazenagem temporária (WIECHETECK, 2009).

O fator limitante para a reciclagem da madeira utilizada na construção civil é o fato desta estar geralmente “contaminada” com outros materiais como concreto/argamassa, metais (pregos, arames, grampos, parafusos, dobradiças, etc.) e ainda agentes desmoldantes (WIECHETECK, 2009).

5.4 PARTICIPAÇÃO DA BIOMASSA NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA E MUNDIAL

A biomassa é usada para fins energéticos através de uma variada gama de opções e tecnologias, que vão desde a tradicional queima de calor para aquecimento de ambientes ou cozimento de alimentos até formas modernas de geração combinada de calor e energia elétrica.

Como existe disponibilidade de diferentes tipos de biomassa no mundo, praticamente todos os países conseguem usufruir dessa forma de geração de energia. A seguir será explicitada a participação da biomassa na matriz energética mundial e depois no âmbito brasileiro.

5.4.1 BIOMASSA NA MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL

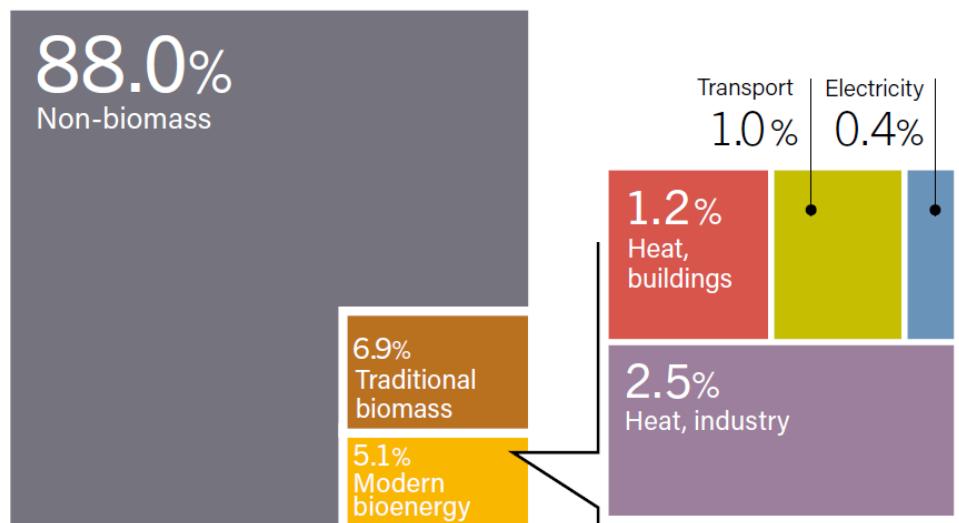
De todas as fontes de energia renovável existentes a biomassa continua a ser a fonte com maior participação na matriz mundial. Incluindo o uso tradicional da biomassa, muito utilizada em países em desenvolvimento, a bioenergia representou aproximadamente 12% de toda a matriz energética mundial, ou 45,2 exajoules (EJ) em 2018. A bioenergia moderna representou 5,1% da demanda total por energia mundial no mesmo ano, com um total estimado em 19,3 EJ (Figura 14) (REN21, 2020).

Especificamente falando da bioenergia moderna, dos 19,3 EJ, 13,9 EJ foram fornecidos para geração de calor na indústria, 3,7 EJ foram fornecidos à indústria de transportes e 1,7 EJ foram fornecidos em forma de eletricidade no ano de 2018 (Figura 5.10). Nesse último ponto, há de se destacar que no período de 2013 a 2018, o uso de bioenergia para geração de eletricidade cresceu em média 6,7% por ano, globalmente falando (REN21, 2020).

O uso da biomassa na forma tradicional, quando é queimada em fogueiras ou até mesmo fornos simples e ineficientes, ainda representa grande parte do uso da biomassa no mundo. De 2010 a 2018, observou-se uma redução de aproximadamente 5% na quantidade de biomassa utilizada dessa forma, o que ainda representa um ritmo lento de decréscimo. Apesar disso, pode-se dizer que essa pequena melhora é fruto de esforços de melhorar o acesso das comunidades mais pobres do mundo à combustíveis mais limpos, visto que a queima da biomassa tem impactos negativos na qualidade do ar local, ocasionando sérios problemas de saúde nas pessoas dessas regiões. Além disso, o suprimento de biomassa nessas situações normalmente se dá de forma extrativista e não sustentável.

A capacidade instalada de bioeletricidade chegou a 139 gigawatts (GW) em 2019 com a China contendo mais de 16% de participação no total. Em termos de produção de energia, em 2019 foram gerados aproximadamente 591 terawatt-hora (TWh), com a China novamente liderando o ranking, com quase 19% de toda a produção mundial. Em termos comparativos de 2018 para 2019, a capacidade instalada aumentou em 6% e produção anual aumentou 9%, o que demonstra como a biomassa vem sendo explorada para geração de eletricidade em escala global (REN21, 2020).

Figura 5.10 - Participação da biomassa na matriz energética mundial e contribuições da bioenergia moderna por setor (2018)

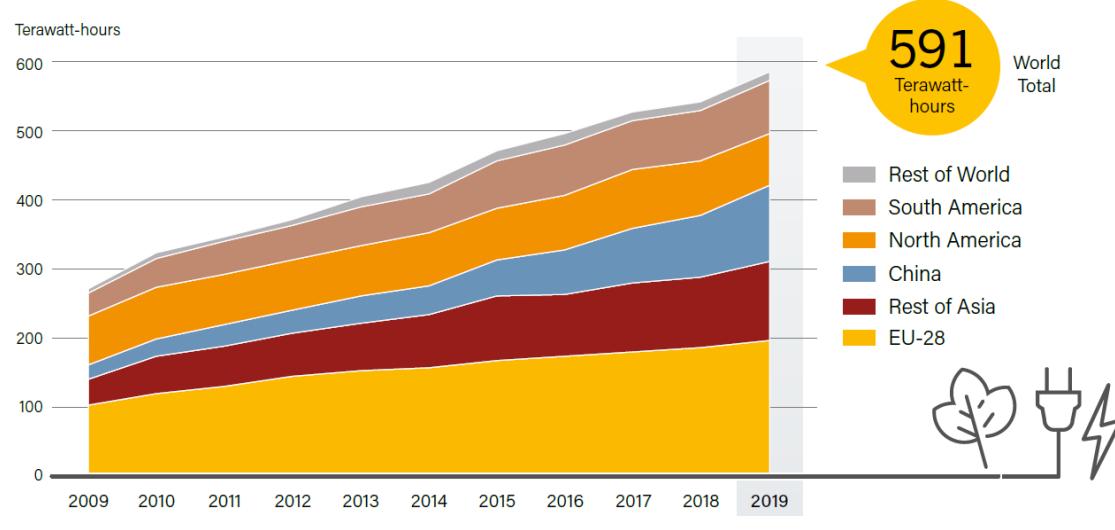


Fonte: REN21 (2020)

Para citar algumas experiências mundiais, a capacidade de geração na China teve seu aumento baseado no uso de biomassa sólida e resíduo sólido urbano para geração combinada de calor e eletricidade. No Japão e na Coréia do Sul, estimulados por esquemas de tarifas incentivadas, o crescimento do uso de biomassa foi baseado na importação de pellets de madeira para queima combinada com carvão e instalações modernas. Na União Européia, ainda há uso intenso do biogás, muito utilizado na Alemanha, mas o uso de peletes de madeira também vem crescendo, principalmente no Reino Unido.

O aumento na geração de bioenergia por região do mundo pode ser visto na Figura 5.11.

Figura 5.11 - Geração de bioeletricidade no mundo por região, 2009 a 2019.

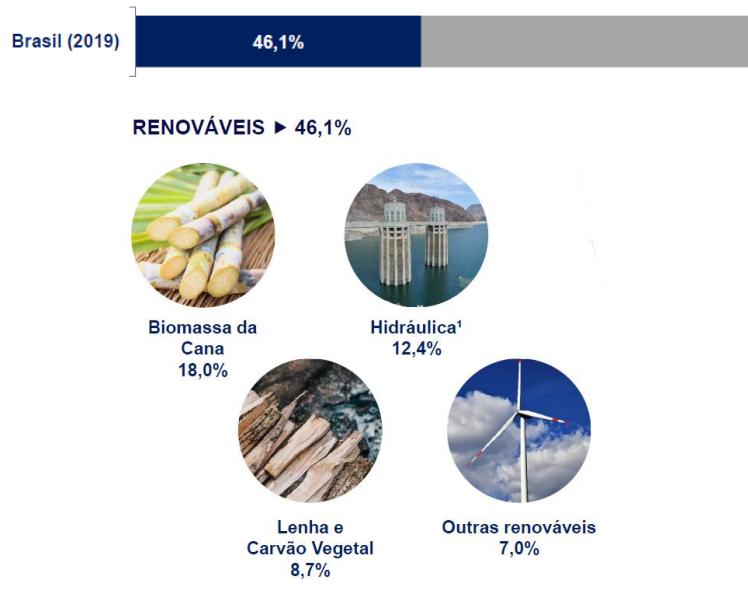


Fonte: REN21 (2020)

5.4.2 BIOMASSA NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Em 2019, a oferta interna de energia atingiu 294 Mtep. Desse total, 46,1% foram provenientes de fontes renováveis, com destaque para participação do bagaço de cana de açúcar, com cerca de 18% de participação na matriz (Figura 5.12).

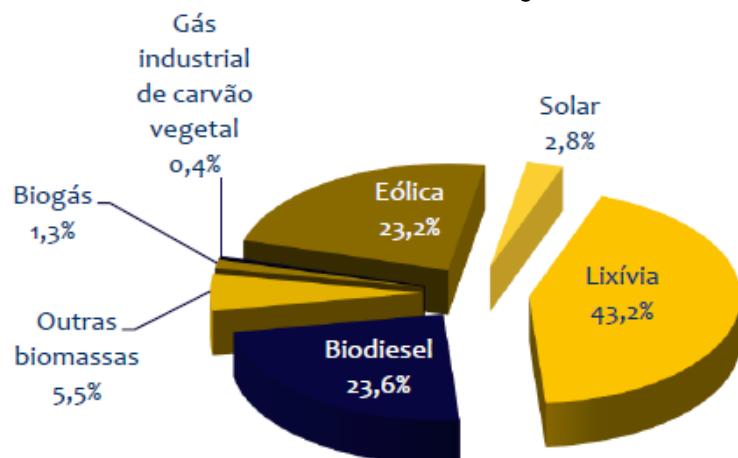
Figura 5.12 - Participação de renováveis na matriz energética brasileira



Fonte: EPE (2020)

Há de se destacar o grande uso de lenha e carvão vegetal na matriz energética, muito em parte por conta da indústria siderúrgica e a relevância da lixívia com relação às outras fontes renováveis, conforme pode ser visto na Figura 5.13.

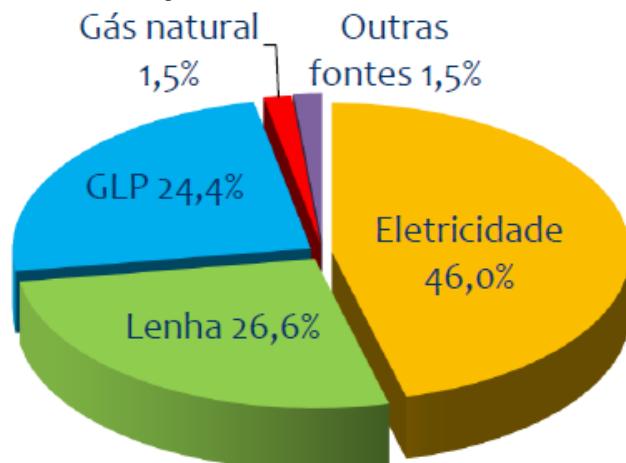
Figura 5.13 - Matriz energética brasileira – outras renováveis (excluindo bagaço de cana, hidráulica e lenha e carvão vegetal)



Fonte: EPE (2020)

Apesar de contar com diversas tecnologias modernas para uso da biomassa, a matriz energética residencial brasileira ainda apresenta grande percentual de utilização de lenha (Figura 5.14). A despeito disso, é de se destacar que esse consumo vem caindo e, somente de 2018 para 2019 houve redução de 2,3% no consumo residencial de lenha.

Figura 5.14 - Matriz energética brasileira – consumo residencial de energia



Fonte: EPE (2020)

Do ponto de vista de bioeletricidade, o Brasil é terceiro maior produtor mundial, com aproximadamente 52,5 TWh gerados no ano de 2019. Em termos de geração, é a 4^a maior fonte, ficando atrás da hidrelétrica, do gás natural e da geração eólica, conforme pode ser visto na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Geração elétrica no Brasil por fonte em GWh– 2019

Fonte	2019	Participação
Hidrelétrica	397.877	63,3%
Gás Natural	60.448	9,6%
Eólica	55.986	8,9%
Biomassa	52.543	8,4%
Nuclear	16.129	2,6%
Carvão Vapor	15.327	2,4%
Derivados do Petróleo	6.926	1,1%
Solar Fotovoltaica	6.655	1,1%
Outras	14.438	2,3%
Geração total	628.348	

Fonte: Do próprio autor, retirado de EPE (2020)

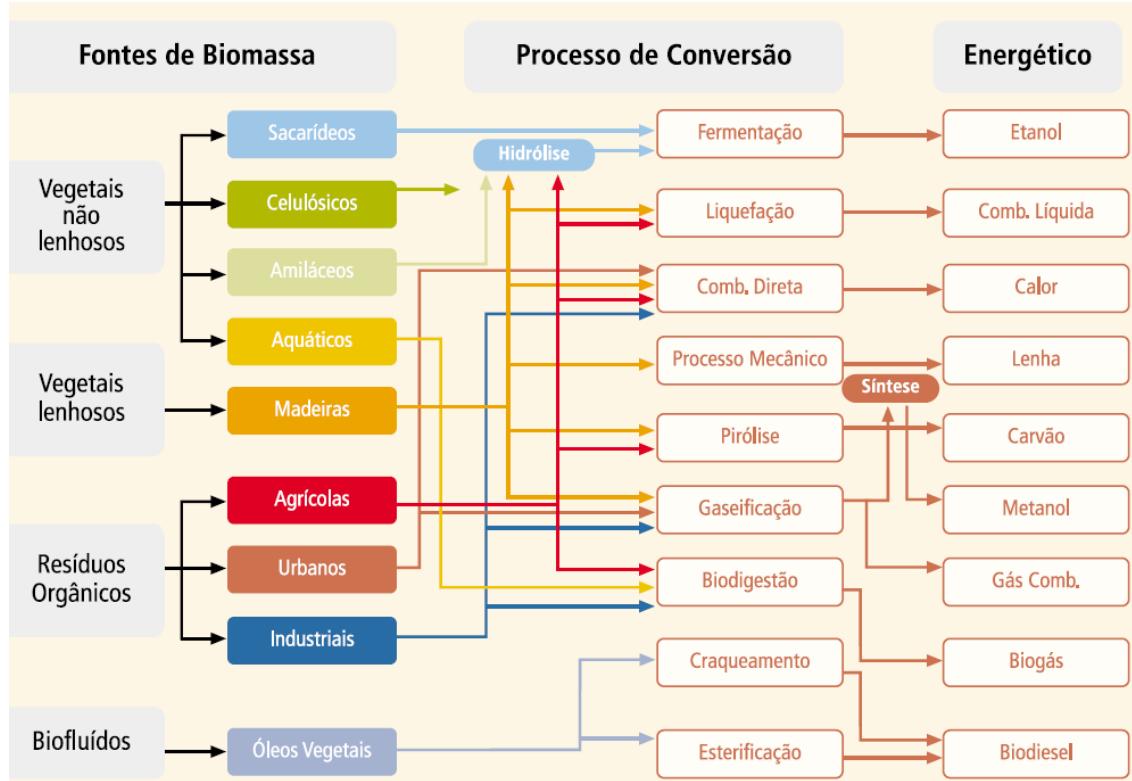
6 PROCESSOS PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DA BIOMASSA

O aproveitamento da biomassa para fins energéticos pode se dar através de processos de combustão tradicionais ineficientes que incluem processos para cozimento e aquecimento até os processos mais modernos de geração de calor e eletricidade através de processos eficientes de combustão, queima conjunta com carvão e gaseificação.

Em termos de pré-tratamento da biomassa, os processos mais comuns são os de secagem, peletização e briquetização, torrefação e pirólise. Esses processos visam aumentar a eficiência do uso de biomassa nos processos de aproveitamento desse combustível na geração de energia.

A Figura 6.1 demonstra os processos de conversão energética da biomassa, alguns dos quais serão detalhados adiante.

Figura 6.1 - Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa



Fonte: ANEEL (2005)

6.1 PRÉ TRATAMENTO

A utilização da biomassa crua, conforme retirada da natureza, faz com que a eficiência dos processos de geração de energia seja muito ineficiente, devido à baixa densidade energética, alto índice de umidade e heterogeneidade da

matéria-prima. Nesse sentido, algumas formas de pré-tratamento foram desenvolvidas com o intuito de melhorar a qualidade da biomassa para propiciar processos de conversão energética mais eficientes.

A secagem é muito utilizada como pré-tratamento para que se reduza a umidade do produto e em alguns casos para reduzir custos de transporte. Pode ser feita tanto ao ar livre de forma natural ou através de estufas ou secadores.

De forma geral a secagem ao ar livre é mais simples e econômica, enquanto que a secagem através de estufas ou secadores é capaz de reduzir o tempo de secagem além de conferir maior controle sobre os defeitos de secagem. Nos processos de gaseificação, a secagem é muito importante para que se obtenha biomassas com poderes caloríficos mais elevados.

A peletização e a briquetização são duas formas de compactação da biomassa, normalmente conseguidas após Trituração e posterior compactação da matéria-prima. Conferem maior densidade energética ao produto e, consequentemente possibilitam aumento da eficiência geral do processo de geração elétrica (Figura 6.2).

Figura 6.2 - Exemplo de pellets (esquerda) e briquetes (direita)



Fonte: ANATER (2020)

Normalmente, os projetos de bioenergia que utilizam matéria-prima sólida, normalmente são abastecidos localmente por resíduos agrícolas ou florestais. No entanto, a briquetização e, em maior escala, a peletização vêm ganhando espaço no mercado da biomassa, o que permite que os produtos sejam transportados aos locais onde os mercados são mais atraentes.

A torrefação é utilizada para biomassa da madeira. Nesse processo, que pode ser definido como um pré-carbonização, a biomassa é aquecida a temperaturas entre 200 e 300°C. O material obtido é um material intermediário

entre a biomassa e o carvão e o objetivo principal do processo é concentrar a energia da biomassa em um produto formado em curto tempo, baixas taxas de aquecimento e temperaturas moderadas (RENDEIRO *et al.*, 2008).

A biomassa torrificada pode ser utilizada em pizzarias e nas indústrias produtoras de cerâmicas. Quando combinada à briquetização, a torrefação eleva o potencial calorífico da biomassa, se comparada àquela sem qualquer tratamento.

A pirólise é um pré tratamento termoquímico no qual a biomassa é aquecida a temperaturas entre 400 e 600°C, com muito pouco oxigênio e tem como resultado o óleo de pirólise, carvão e gás. A densidade energética desse óleo chega a ser até duas vezes maior do que pellet de madeira e a obtenção desse subproduto permite que seja transportado a longas distâncias.

6.2 COMBUSTÃO DIRETA

A combustão é uma forma termoquímica de conversão da energia da biomassa. Nesse processo, a energia química presente na biomassa é transformada em calor por meio de reações com oxigênio.

Na combustão direta, o oxigênio é fornecido na razão estequiométrica ideal para que haja todo o processamento do combustível, gerando alta temperatura e tendo como produtos o dióxido de carbono (CO_2), água (H_2O) e nitrogênio (N_2).

A combustão direta é utilizada desde os mais ineficientes processos como fogões a lenha e lareiras, passando por processos combinados de queima de carvão com biomassa em siderúrgicas e caldeiras, até a queima somente da biomassa em caldeiras.

Como exemplo de aplicações, tem-se a queima da biomassa em fornalhas para secagem de grãos e também a combustão de pellets em caldeiras para aquecimento de água em hotéis.

Como grande destaque dessa forma de utilização da biomassa está a queima do bagaço e da palha da cana-de-açúcar em plantas de cogeração para alimentação de vapor para o processo de beneficiamento da cana bem como para produção de energia elétrica, como mencionado no item 5.2.3.

6.3 OUTRAS FORMAS DE CONVERSÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA

Como outras formas de conversão energética da biomassa pode-se citar as conversões bioquímicas e as conversões físico-químicas, além da gaseificação.

A conversão bioquímica envolve os processos de digestão anaeróbica que tem como principal produto o biogás e os de fermentação / destilação ou hidrólise, que têm como principal objetivo a obtenção de combustível líquido como o etanol.

Já a conversão físico-química da biomassa utiliza técnicas de compressão e extração de óleos da matéria-prima para posterior modificação através de esterificação. O produto mais conhecido desse tipo de conversão é o biodiesel.

A seguir será dada ênfase à gaseificação por ter sido o processo escolhido para o estudo de caso proposto nesse trabalho. Esse processo foi escolhido por se aplicar a sistemas de pequeno porte, pela abundância da biomassa disponível na área da construção da barragem e também pelo fato de ser uma técnica com fácil adaptação aos motores de combustão acoplados aos geradores já utilizados na obra.

6.4 GASEIFICAÇÃO

A gaseificação também é um processo termoquímico de conversão de energia da biomassa em que o combustível sólido é transformado em gasoso através de reações envolvendo vapor quente e ar ou oxigênio em quantidades inferiores à estequiométrica, não sendo suficientes para se obter a combustão completa da carga de combustível.

O produto principal da gaseificação é uma mistura rica de gases contendo principalmente monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂) e metano (CH₄). Esses gases são obtidos através de duas etapas: pirólise do material e a gaseificação propriamente dita.

A gaseificação é utilizada para fornecimento de energia elétrica em comunidades isoladas com sistemas de pequeno porte e também para aproveitamento de resíduos sólidos urbanos para geração de energia. A seção 5.6 do presente trabalho apresentará maiores detalhes do processo de gaseificação.

6.4.1 Breve histórico da gaseificação

Os processos de gaseificação já são utilizados desde o século XIX, mas tiveram seu desenvolvimento dividido em basicamente 3 momentos.

Durante a Segunda Guerra Mundial, houve diminuição na oferta mundial de petróleo o que fez com que alguns países, principalmente a Alemanha, tivessem que buscar alternativas para prover energia para suas atividades. Nesse período, o principal objetivo era se obter alguma espécie de combustível que abastecessem os veículos. Foi nesse sentido que diversos gasogênios foram desenvolvidos.

Na crise do petróleo do final dos anos 70, novamente a gaseificação de biomassa ganhou relevância e, mais uma vez, a principal finalidade era desenvolver uma forma de substituir o petróleo nos veículos.

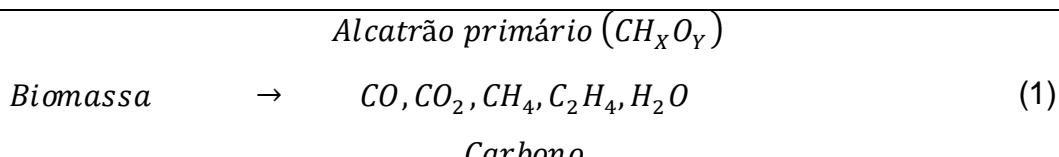
Já a partir dos anos 90, impulsionados pelos acordos globais de redução de poluentes, os países começaram a desenvolver linhas de gaseificação de biomassa que possibilitassem a geração de calor e energia elétrica.

Esse último momento de desenvolvimento da gaseificação da biomassa já trouxe diversas inovações tecnológicas e, considerando todas as metas de redução de consumo de combustíveis fósseis estabelecidas por acordos internacionais, tende a se tornar uma alternativa cada vez mais utilizada.

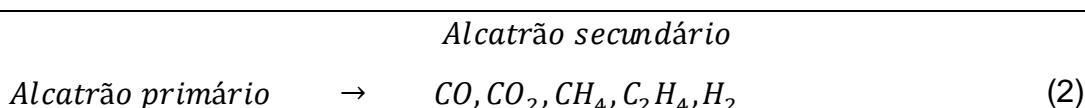
6.4.2 Principais reações do processo de gaseificação

O processo de gaseificação da biomassa acontece na seguinte ordem: secagem, pirólise, redução e combustão. A depender do processo de gaseificação adotado, essas etapas podem ocorrer de forma simultânea em todo o volume do gaseificador ou em partes diferentes do mesmo. As principais reações químicas dessas etapas são mostradas a seguir (IEA, 2014).

Desvolatilização primária



Craqueamento e reforma do alcatrão



<u>Reações homogêneas (gás – gás)</u>		ΔH
<i>Alcatrões secundários</i>	\rightarrow	C, CO, H_2 (3)
$H_2 + 0,5 O_2$	\rightarrow	H_2O -242 kJ/mol (4)
$CO + 0,5 O_2$	\rightarrow	CO_2 -283 kJ/mol (5)
$CH_4 + 0,5 O_2$	\rightarrow	$CO + 2 H_2$ -110 kJ/mol (6)
$CH_4 + CO_2$	\rightarrow	$2 CO + 2 H_2$ $+247 \text{ kJ/mol}$ (7)
$CH_4 + H_2O$	\rightarrow	$CO + 3 H_2$ $+206 \text{ kJ/mol}$ (8)
$CO + H_2O$	\rightarrow	$CO_2 + H_2$ $-40,9 \text{ kJ/mol}$ (9)

As equações 4, 5 e 6 representam as reações de combustão (oxidação) do hidrogênio (H_2), do monóxido de carbono (CO) e do metano (CH_4), respectivamente. A equação 7 representa a reação de reforma seca, a equação 8 representa a reação de formação de metano por reforma a vapor e a equação 9 representa a reação de “deslocamento” gás-água.

<u>Reações heterogêneas (gás – sólido)</u>		ΔH
$C + O_2$	\rightarrow	CO_2 $-393,5 \text{ kJ/mol}$ (10)
$C + 0,5 O_2$	\rightarrow	CO $-123,1 \text{ kJ/mol}$ (11)
$C + CO_2$	\rightarrow	$2 CO$ $+159,9 \text{ kJ/mol}$ (12)
$C + H_2O$	\rightarrow	$CO + H_2$ $+118,5 \text{ kJ/mol}$ (13)
$C + 2 H_2$	\rightarrow	CH_4 $-87,5 \text{ kJ/mol}$ (14)

A equação 10 representa a oxidação do carbono, enquanto que a equação 11 representa uma reação de oxidação parcial. A equação 12 representa a reação de equilíbrio de Boudoard, que dá o equilíbrio do carbono com suas fases gasosas (CO e CO_2). A equação 13 representa a reação gás-água (reforma a vapor) e a equação 14 representa a reação de produção do metano.

A partir das equações acima, que não representam a totalidade das equações envolvidas no processo de gaseificação, podem ser tiradas algumas conclusões:

- As reações de oxidação do carbono são altamente exotérmicas;
- As reações de Boudoard e gás-agua são endotérmicas

- As equações de 10 a 14 representam as equações de transformação do carbono sólido em carbono gasoso. Como o subproduto menos desejável da gaseificação é o CO₂, os redutores principais para o processo são o CO₂ e o H₂O e não o O₂.

Vale ressaltar que, com relação à quantidade de oxigênio para as reações, o processo de gaseificação é altamente dependente desse componente. Existe uma faixa de oxigênio ótima para que haja a conversão do carbono sólido em gás. Abaixo dessa faixa, ocorre basicamente a pirólise e acima dessa faixa ocorre a combustão da biomassa, porém se tratara sempre de um processo com falta de O₂ para permitir a gaseificação e não a combustão.

Há de se destacar que a temperatura e a pressão do processo de gaseificação influenciam diretamente a composição dos gases gerados e têm impacto no poder calorífico do produto.

6.4.3 Principais tipos de gaseificadores

O tipo de gaseificador a ser utilizado em determinado projeto vai depender da escala de produção desse projeto, das propriedades da matéria-prima disponível e também da aplicação final. Os fatores que diferenciam uma tecnologia de gaseificador da outra são: contato do combustível com o agente gaseificador, temperatura, pressão escala e suprimento de calor.

Dentre os diversos tipos de gaseificadores, pode-se destacar os de leito fixo (*Fixed Bed*), os de leito fluidizado (*Fluidized Bed*) os de fluxo arrastado, sendo os dois primeiros os mais difundidos.

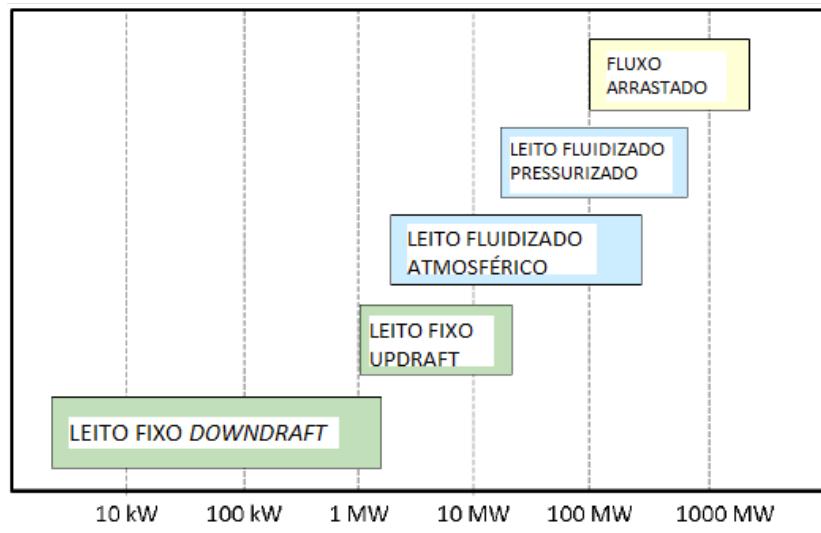
De forma simplista, pode-se dizer que a capacidade de produção da planta está diretamente relacionada à escolha do tipo de gaseificador, como pode ser visto na Figura 6.3.

Gaseificadores de leito fixo

Nos gaseificadores de leito fixo, a biomassa se move por ação da gravidade e repousa sobre uma grelha. É muito adequada para potências até 1000 kW e pequenas quantidades de biomassa, porém esse tipo de gaseificador tem sido mais empregado na alimentação de motores de combustão interna para sistemas com capacidades até 200 kW (COELHO *et al.*, 2018) por terem funcionamento melhor nessa faixa de potência.

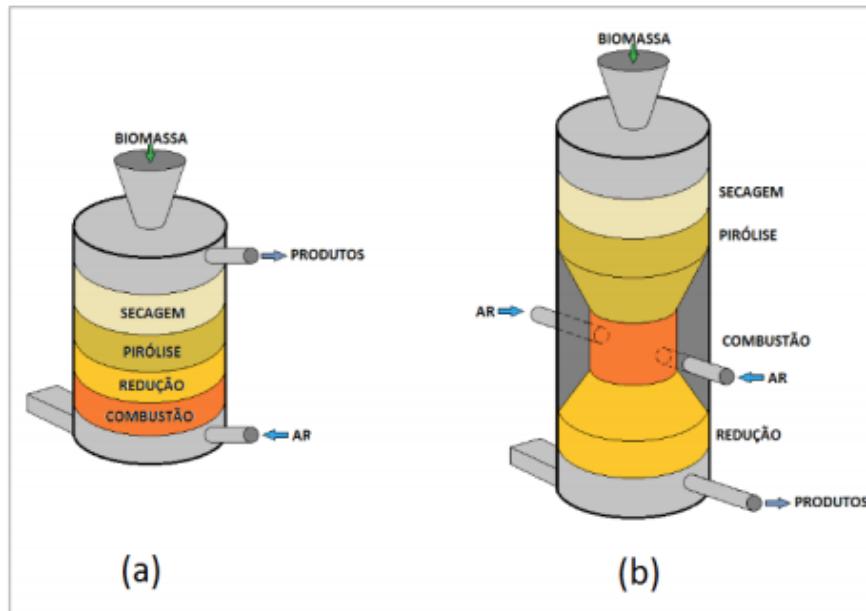
São os gaseificadores mais difundidos e podem ser destacados quatro principais tipos de arranjo: com extração de gases por cima da biomassa (updraft), por baixo da biomassa (downdraft), transversal à biomassa (cross draft) e multi-estágios (RENDEIRO *et al.*, 2008). Na Figura 6.4 são representados os gaseificadores *downdraft* e *updraft*.

Figura 6.3 - Tipos de gaseificadores por faixa de potência



Fonte: IEA (2014)

Figura 6.4 - Descrição do processo de gaseificação em reator de leito fixo: a) *updraft*; b) *downdraft*



Fonte: Ardila *apud* Oliveira (2015)

O gaseificador do tipo *downdraft* apresenta um gás de síntese com menor quantidade de alcatrão, porém com mais material particulado e menor poder calorífico se comparado com o *updraft*.

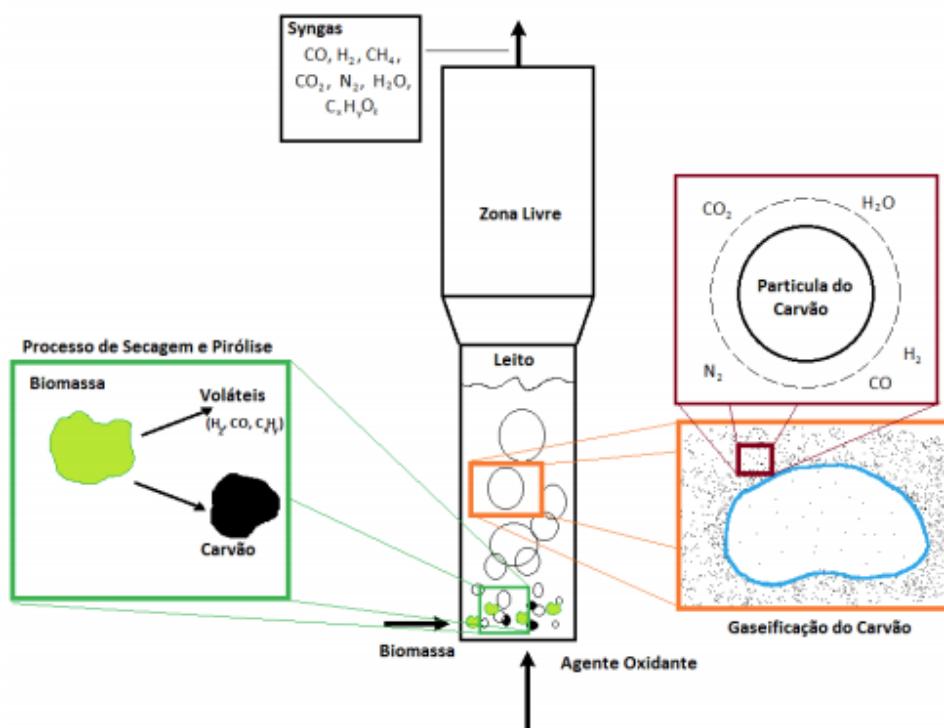
Gaseificadores de leito fluidizado

Mais utilizados para projetos de média a grande escala, os gaseificadores de leito fluidizado são caracterizados por se utilizar um leito de material particulado inerte, normalmente a areia, que fica em constante movimento por meio da passagem de gás, que normalmente é o ar. Esses gaseificadores podem ter leito fluidizado ou borbulhante, a depender da velocidade do material que atravessa o leito.

Por apresentarem maior complexidade, esses leitos são mais adequados para projetos maiores e com maiores capacidades de geração de energia. Além disso, apresentam maior flexibilidade com relação ao combustível alimentado, aceitando mais facilmente biomassas com índices de umidade elevados, por exemplo.

Os gaseificadores de leito fluidizado podem ser atmosféricos ou trabalharem pressurizados, embora dificuldades na alimentação da biomassa e no sistema de limpeza do gás a alta pressão, tornem esses últimos difíceis de operar. Um modelo desse gaseificador é apresentado na Figura 6.5.

Figura 6.5 - Descrição do processo de gaseificação em reator de leito fluidizado



Fonte: Ardila (2015)

A tabela 6.1 apresenta comparativo entre os gaseificadores de leito fixo e os de leito fluidizado.

Tabela 6.1 – Comparação entre gaseificador de leito fixo fluidizado

	Gaseificador de leito fixo	Gaseificador de leito fluidizado
Porte	Pequeno porte (de 1 kW a 1MW)	Grande porte (a partir de 1MW)
Alcatrão contido no gás gerado	100 g/Nm ³ no leito fixo contracorrente e 1g/Nm ³ no leito fixo co-corrente	10 g/Nm ³
Biomassa	Baixa umidade (menor que 20%) e granulometria uniforme (no máximo 6 cm)	Alta umidade (até 65%) e granulometria uniforme (5 a 10 cm)
Uso do gás gerado	Motores de linha (combustão interna e ciclo Otto).	Turbinas a gás

Fonte: SANTOS, apud USHIMA e COELHO (2006)

Experiências recentes indicam que os gaseificadores de leito fixo se aplicam para potências até 200kW e que os sistemas de turbinas a gás ainda não se viabilizaram pelas dificuldades de limpeza adequada do gás de síntese para injeção na câmara de combustão das mesmas. Além disso, já existem sistemas de leito fluidizado partindo de potências de 200kW. (SCoelho, notas de aula, 2020)

A seguir serão apresentados alguns dos principais projetos de gaseificação do mundo com a finalidade de demonstrar as principais formas de aproveitamento da biomassa e suas características principais.

6.4.4 Planta de gaseificação GoBiGas – Gotemburgo (Suécia)

Construída na região portuária de Gotemburgo, Suécia, essa planta foi desenvolvida pela empresa de energia municipal de Gotemburgo, a Göteborg Energi, e foi resultado direto dos esforços da União Européia do Governo da Suécia para substituir combustíveis fósseis na região. Após passar por vários estudos desde 2005, a planta teve seu comissionamento iniciado em 2013 e a inauguração foi realizada em março de 2014.

O projeto previa duas etapas. A primeira envolveu a construção de uma planta de demonstração com capacidade instalada de 20 MW de biometano obtido a partir do gás de síntese proveniente da gaseificação de resíduos

florestais e a segunda fase envolvia a construção de uma planta comercial com capacidade de 100 MW. Devido a condições de mercado desfavoráveis, o município de GotembURGO decidiu não prosseguir com a construção da segunda fase desse projeto.

O principal objetivo do projeto GoBiGas era produzir o gás natural substituto (SNG em inglês) ou gás natural renovável (RNG em inglês) e injetar esse gás produzido na rede nacional de gás natural, para ser utilizado predominantemente no setor de transporte. Considerando o viés técnico, o projeto demonstrou que através da gaseificação, limpeza e purificação (processo em que se separa o metano do dióxido de carbono e outros gases do biogás) é possível obter o SNG, obtendo todas as vantagens do gás natural, aplicando na indústria, transporte e residências.

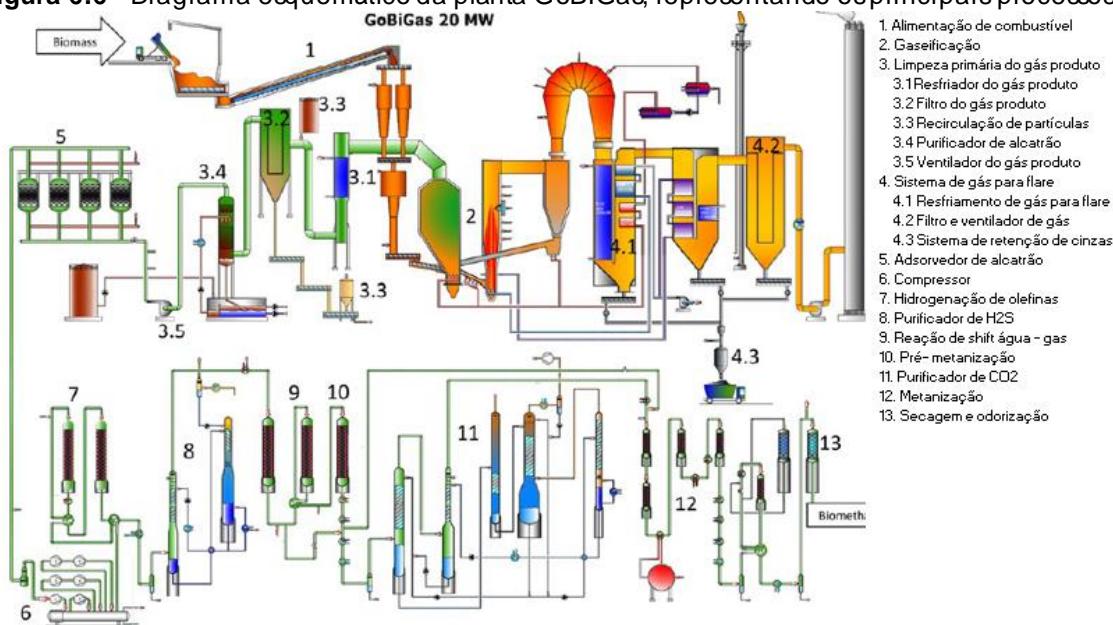
A planta GoBiGas possui duas etapas distintas: a seção de gaseificação em duplo leito fluidizado e a seção de produção de metano. Essa última foi desenvolvida nos mesmos moldes de redundância e segurança que as plantas da indústria petroquímica possuem, possibilitando uma operação contínua por quatro anos sem maiores revisões. Os principais processos da planta são demonstrados na Figura 6.6 (Thunman et al., 2018). De forma resumida, o gás de síntese gerado através da gaseificação e ainda pobre em metano, passa por um extenso processo de limpeza e purificação até chegar ao processo de “metanização”, onde ocorre nova síntese do gás em reatores específicos para elevação da quantidade metano.

Como o objetivo da planta era produzir metano em escala comercial, a planta de demonstração deveria atingir os seguintes objetivos (Thunman et al., 2018):

- Eficiência de 65% na conversão biomassa para biometano, baseado no poder calorífico inferior e combustível seco sem cinzas;
- Eficiência global da planta de 90%, considerando a energia da biomassa que entra no sistema e a saída de energia nas diferentes formas (biometano, elétrica e térmica);
- Produção de 8.000 horas por ano;
- Fornecimento de SNG para a rede nacional de gás com composição de: metano > 94%_{vol}; hidrogênio < 2%_{vol}; dióxido de carbono < 2,5%_{vol} ;

nitrogênio < 3,5%vol; monóxido de carbono < 0,1%vol; amônia < 20ppm_{VOL}; ponto de orvalho < -8°C a 70 bar.

Figura 6.6 - Diagrama esquemático da planta GoBiGas, representando os principais processos



Fonte: Adaptado de Thunmann *et al* (2018)

6.4.5 Gaseificador a vapor TUV's – Viena (Austrália)

Em 1991, o distrito de Guessing na Áustria estipulou que toda a sua demanda de energia seria suprida por fontes renováveis. Com isso, em uma década o distrito teve todo o seu suprimento de energia baseado em renováveis.

Nesse contexto, a Universidade de Tecnologia de Viena (TUV's) desenvolveu uma planta demonstrativa de gaseificação a vapor de biomassa em leito fluidizado com circulação interna rápida (FICFB). A planta, que conta com 8 MW_{th}, conta com um reator fluidizado de leito duplo que resulta num gás usado para produção conjunta de calor e energia elétrica. Os dados básicos da planta são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Dados básicos da planta de Guessing

Partida do gaseificador	Novembro de 2001
Partida do motor a gás	Abril de 2002
Combustível	Lascas de madeira
Energia do combustível	8.000 kW
Geração de energia elétrica	2.000 kW
Geração de energia térmica	4.500 kW

Fonte: IEA (2019)

A ideia conceitual desenvolvida pela TUV's foi dividir o leito fluidizado em duas zonas, ocorrendo a gaseificação com vapor em um e a combustão com ar

no outro. Entre as duas zonas havia compartilhamento de material do leito, porém os gases não se misturavam. O gás produzido na gaseificação era praticamente livre de nitrogênio. Esse conceito possibilitou a produção de gás de alta pureza sem a necessidade de utilização de oxigênio puro (IEA, 2019)

Apesar de ter tido sucesso no seu propósito, a planta de Guessing encerrou suas operações em outubro de 2016, após 100.000 horas de operação, devido a razões econômicas. Na Áustria, a produção de energia elétrica através de fontes renováveis a biomassa é incentivada através de tarifas subsidiadas por 13 anos. Quando o incentivo da tarifa deixou de valer, a planta tornou-se inviável economicamente e os donos decidiram encerrar a operação. A Figura 6.7 mostra uma foto da planta (IEA, 2019).

Figura 6.7 - Gaseificador FICFB em Guessing - Áustria



Fonte: IEA (2019)

6.4.6 Outros projetos de gaseificação

Alguns outros grandes projetos de SNG e também outros biocombustíveis baseados em gaseificação estão em desenvolvimento pelo mundo. Ainda há uma busca pela melhor rota tecnológica, sem uma definição de qual caminho parece ser o mais acertado, o que faz com que não seja tão fácil aprender com projetos já estabelecidos. A Tabela 6.3 demonstra alguns desses projetos espalhados pelo mundo.

Tabela 6.3 – Importantes projetos de gaseificação pelo mundo

Nome	Produto	Matéria - prima	Tecnologia	Localização
Gaya	SNG	Biomassa	Gaseificador FICFB - Repotec	Lyon - França
BioTFuel	Fischer-Tropsch	Biomassa torrificada	Gaseificador PRENFLO - Thyssen Krupp	Dunquerque - França
Fulcrum Bioenergy	Fischer-Tropsch	Resíduos	Gaseificador de leito fluidizado indireto - TRI	Nevada - EUA
Red Rock Bio	Fischer-Tropsch	Resíduos florestais	Reforma a vapor - TCG Global	Oregon - EUA
GoGreenGas	SNG	Resíduos	Gaseificador de leito fluidizado e plasma - APP	Swindon - Reino Unido

Fonte: IEA (2019)

O processo Fischer-Tropsch trata-se de um processo químico para obtenção de biocombustíveis líquidos a partir do gás de síntese proveniente da gaseificação.

No Brasil destacam-se iniciativas do IPT e do CENBIO para levar energia a regiões remotas da Amazônia através de gaseificadores associados a geradores de pequeno porte.

Uma dessas iniciativas, o projeto GASEIFAMAZ, que contou ainda com o BUN – *Biomass Users Network do Brasil* e a Universidade do Amazonas, resultou na instalação de um gaseificador a biomassa de 20 kW para operar utilizando um motor diesel acoplado a um gerador de energia elétrica. A biomassa utilizada no sistema foram as cascas de cupuaçu, abundante no local (COELHO, et. al, 2004).

Mais tarde foi desenvolvido o projeto GASEIBRAS, onde foi construído o gaseificador de 20 kW no IPT, desenvolvido com tecnologia completamente nacional, visando demonstrar a viabilidade para a indústria nacional dos gaseificadores de pequeno porte de leito fixo, com facilidade de operação e manutenção, características necessárias à adaptação em comunidades isoladas. (COELHO, et. al, 2006).

Podem ser destacadas também iniciativas mais recentes de gaseificação de resíduos sólidos urbanos como a planta de gaseificação da CARBOGAS e o estudo para implementação de uma planta de gaseificação das empresas WEG – ELB.

Após um período de testes em sua planta em Mauá, a CARBOGAS está desenvolvendo projeto para instalação de gaseificador de combustível derivado de resíduo sólido urbano no município de Boa Esperança, Minas Gerais. O gás produzido através da gaseificação será enviado à uma caldeira de recuperação

de calor, onde gerará vapor d'água que por sua vez alimentará uma turbina acoplada ao gerador. O projeto está dimensionado para tratar 60 t/dia de resíduos, produzindo 37,5 MWh por mês, suficientes para suprir a demanda de energia de 25% dos habitantes da cidade (MALUF, *apud* CARBOGAS, 2019).

Ainda em fase de estudos, a Unidade de Recuperação Energética WEG, em parceria com a fabricante de gaseificadores ELB (Energia Limpa do Brasil), consiste em um reator que combina diferentes condições de pressão, temperatura e velocidade para as etapas de gaseificação, podendo processar o resíduo sólido urbano a uma taxa de 12 t/h, em uma planta de 5,0 MW de potência instalada. O gaseificador da empresa ELB já vem passando por testes no município de MAFRA/SC e tem apresentado bons resultados (MALUF, 2020).

6.5 TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO TERMELÉTRICA

A forma mais comum de conversão da energia contida na biomassa em eletricidade se dá através de transformações termoelétricas em que a energia térmica da biomassa é transformada em energia mecânica e posteriormente em energia elétrica.

Pode-se dividir essa geração em dois grandes grupos: geração através da combustão da biomassa, onde se gera vapor para posterior aproveitamento e geração através da gaseificação, onde se queima o gás de sínteses em motores para geração da energia elétrica.

6.5.1 Conversão termelétrica através de combustão da biomassa

Esse tipo de tecnologia é bastante difundido no mundo todo e, basicamente segue o ciclo termodinâmico Rankine. A biomassa é utilizada como combustível na caldeira para geração de vapor, que será enviado a uma turbina onde ocorre a conversão da energia térmica em energia mecânica.

Esse processo faz sentido se o objetivo da planta for gerar uma combinação de calor e energia elétrica e tem aplicação muito difundida nos ciclos de co-geração da indústria da cana e do papel e celulose.

Se for analisado separadamente, o ciclo Rankine muito utilizado para conversão de energia através da combustão apresenta baixa eficiência e pouca flexibilidade devido principalmente à inércia térmica do vapor. Apesar disso, esse ciclo permite a utilização de inúmeros combustíveis sólidos e líquidos, além de

requerer menos preparo da biomassa antes da reação de combustão. No Brasil encontram-se turbinas a vapor com potências na casa dos 150MW trabalhando com pressões de até 120 bar e também turbinas de menor porte destinadas a projetos de geração distribuída à base de biomassa como as fabricadas pela TGM/WEG, que possui turbinas com capacidade até 2MW e pressão máxima 45bar.

6.5.2 Conversão termelétrica através de gaseificação da biomassa

O gás de síntese produzido através da gaseificação da biomassa predominantemente pode servir de combustível em três ciclos termodinâmicos distintos: ciclo Brayton, ciclo Otto e ciclo diesel.

O ciclo Brayton opera com turbinas a gás e apesar de não apresentar grandes eficiências se comparados aos outros ciclos, apresenta características interessantes, como rapidez nas partidas a frio e a quente, além de possibilidade de operação em carga parcial mantendo o nível de eficiência. São muito adequados para queima do biogás (EPE, 2018). Apesar disso, a grande dificuldade de se obter um gás de síntese livre de impurezas faz com que essa solução não seja mais utilizada.

Nos motores do ciclo Otto, por centelha, o gás de síntese é injetado na câmara de combustão juntamente com o ar e pode substituir integralmente a gasolina com pequenas adaptações nos motores. Como desvantagem, pode-se citar que não é possível se atingir grandes potências ainda, estando esses motores situados na faixa até 30 kW (RENDEIRO *et al.*, 2008).

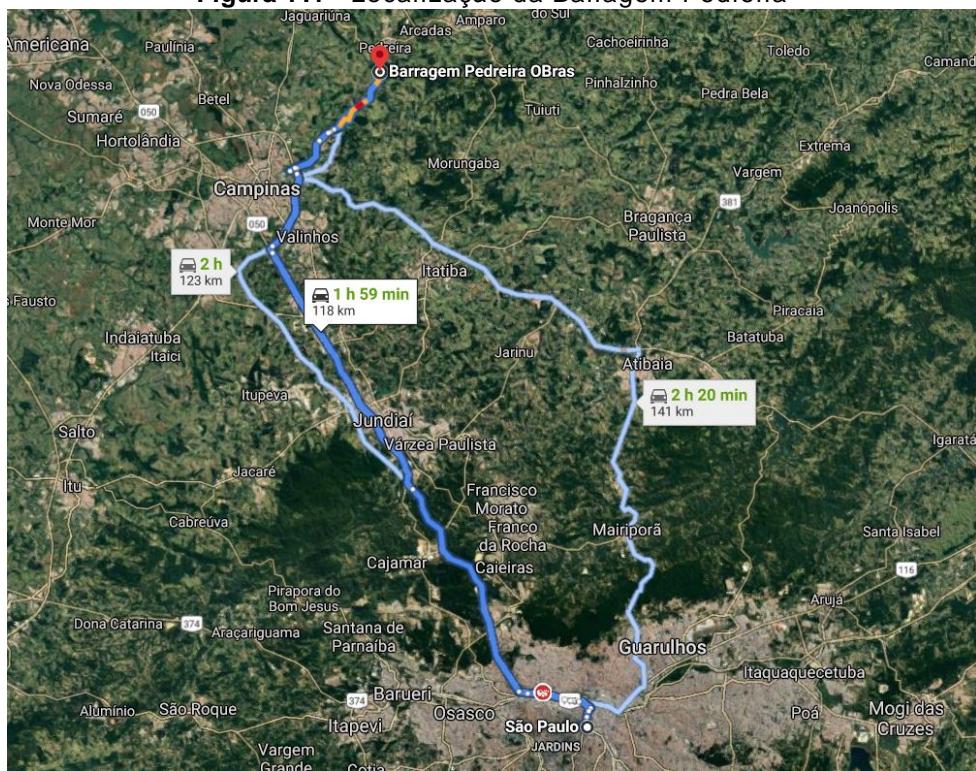
Nos motores do ciclo diesel, o gás de síntese também é injetado na câmara de combustão juntamente com o ar, mas o diesel não é substituído integralmente, pois é ele quem inicia a combustão dentro do cilindro. As experiências obtidas até o momento indicam uma composição de 80% gás de síntese e 20% diesel, a depender da quantidade de biomassa disponível para gaseificação. Esse é o tipo de motor mais utilizado para geração de energia através de gaseificação de biomassa em sistemas isolados.

7 ESTUDO DE CASO

7.1 A BARRAGEM PEDREIRA

A Barragem Pedreira, em implantação no rio Jaguari e situada nos municípios de Pedreira e Campinas em São Paulo (Figura 7.1), faz parte de um conjunto de ações do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo que visam aumentar a disponibilidade hídrica para as regiões das Bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí e, consequentemente, do sistema Cantareira. Essa barragem está contemplada no Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH) produzido pelo Ministério de Desenvolvimento Regional (MDR) e Agência Nacional de Águas (ANA).

Figura 7.1 - Localização da Barragem Pedreira



Fonte: Google (2020)

Com estudos iniciados nos anos 70, a barragem contará com uma área de reservatório de 2,02 km² e uma área de preservação permanente de 2,14 km². O volume útil do reservatório será de 31,9 milhões de m³ e haverá aumento da vazão garantida de 4.800 l/s para 8.500 l/s de água.

Em termos construtivos, a Barragem Pedreira será construída em aterro compactado, com um volume total de 1.200.000 m³. Além disso, serão escavados 3.900.000 m³ de material para realização da obra e serão utilizados

227.000 m³ de concreto para sua construção. A altura máxima da barragem será de 50m. Na Figura 7.2 pode-se ver projeção de como ficará a barragem após concluída.

O arranjo geral consiste de um vertedouro controlado com comportas segmento que mantem o nível normal do reservatório na cota designada em projeto. Localizado no leito do rio, em região onde ocorre o afloramento de rocha, ele tem 116,5m de largura, sendo capaz de veicular a vazão de verificação de 1.542 m³/s com o nível de segurança especificado. Complementam o arranjo geral dois muros mistos de abraço/encosto que, com coroamento na cota 639m, tem 17m de comprimento na margem esquerda e 46m na margem direita. As barragens que complementam o arranjo são do tipo terra/enrocamento, na região de encontro com o vertedouro e de terra nas ombreiras (DAEE, 2019).

A necessidade de se buscar soluções para atendimento da demanda crescente por recursos hídricos, e de evitar crises hídricas como a vivida no ano de 2014 fez com que o Governo do Estado de São Paulo resolvesse licitar a obra em 2017 que conta com recursos do Banco de desenvolvimento da América Latina (CAF-em inglês). As obras iniciaram efetivamente em 2018.

Figura 7.2 - Projeção da Barragem Pedreira



Fonte: DAEE (2019)

As obras da Barragem Pedreira contam com um extenso Programa de Gestão Ambiental das Obras – PGA, que pode ser definido como um conjunto de ações estruturadas, na forma de medidas e procedimentos adequados, que visa à gestão de processos técnicos associados às questões ambientais e

sociais, tendo como consequência a eliminação, mitigação e controle dos impactos ambientais e sociais, provocados pela implantação e operação de empreendimentos (DAEE, 2018).

O PGA faz parte do Plano Básico Ambiental (PBA) que foi apresentado à CETESB com o intuito de obtenção da Licença Ambiental de Instalação. Nesse programa foi detalhado de que forma seriam geridos os outros 26 programas existentes no PBA, dentre eles o Programa de Supressão da Vegetação.

De acordo com o Estudo de Impacto Ambiental da obra, para a implantação da barragem Pedreira será necessária a supressão de 93,0 ha de Floresta Estacional Semidecidual (FES) em estágio inicial do processo de sucessão secundária. Deste total 32,7 ha são de formações ribeirinhas, e 32,1 ha de formações cujo dossel é formado por eucalipto. O restante, 29,2 ha são formações que se desenvolvem nos interflúvios, sem influência direta dos cursos d'água, conforme apresentado na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Espécies a serem suprimidas para construção da Barragem Pedreira

Fitofisionomia	Área (ha)	Área Relativa (%)
Floresta Estacional Inicial	29,2	14,4
Floresta Estacional Inicial Ribeirinha	32,7	16,1
Floresta Estacional Inicial Dossel Eucalipto	31,1	15,3
Vegetação Pioneira	15,5	7,6
Campo Úmido Antropizado	0,6	0,3
Pasto/Pasto Sujo	80,7	39,7
Cultivo	0,1	0,1
Silvicultura	13,3	6,5
Total	203,2	100

Fonte: DAEE (2018)

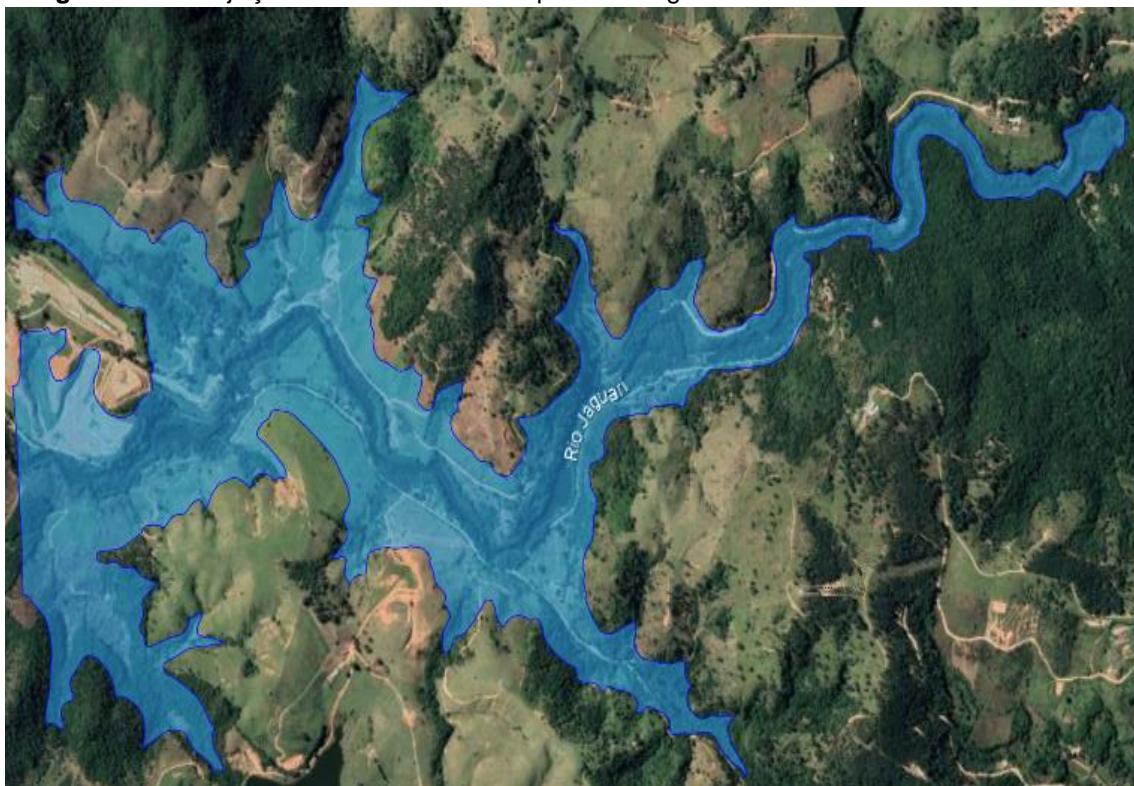
As atividades de supressão vegetal necessárias à construção da barragem foram divididas em 2 fases, sendo a primeira referente à implantação do eixo da barragem e canteiro de obras com uma área estimada de 46 hectares e a segunda fase referente à remoção da vegetação onde se formará o reservatório da Barragem Pedreira, com área calculada de 202 hectares.

Considerando-se que o objetivo principal da barragem é o abastecimento hídrico da região, diversos controles de qualidade da água devem ser seguidos. Nesse sentido, a área de inundada deve ser rigorosamente monitorada para que

não haja contaminação do solo e toda a vegetação dessa área deve ser removida. Com isso, não só a vegetação que interfere na construção será removida, mas também toda aquela que esteja em área inundada e que possa de alguma maneira contaminar a água do reservatório. A Figura 7.3 representa a área inundada da barragem em sua cota máxima.

O Programa de Supressão Vegetal conta com um Subprograma de Destinação da Biomassa que visa dar o melhor destino ao grande volume gerado sem causar novos impactos.

Figura 7.3 - Projeção da área inundada pela Barragem Pedreira em sua cota máxima



Fonte: DAEE (2019)

7.2 UTILIZAÇÃO DA BIOMASSA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

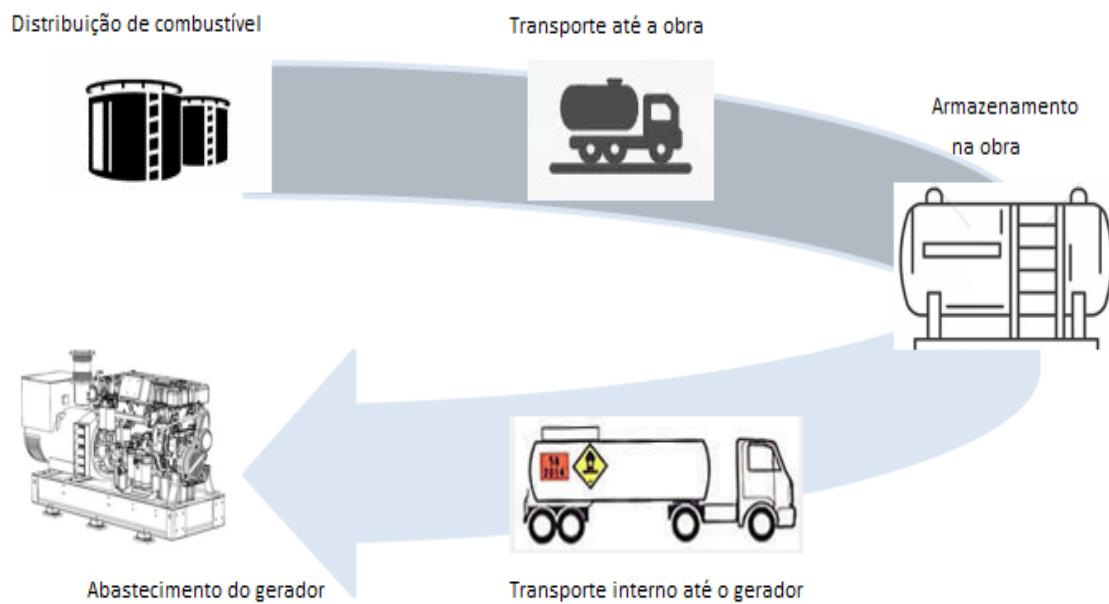
O Subprograma de Destinação da Biomassa elaborado para a obra da Barragem Pedreira previa a utilização da biomassa para aproveitamento interno como cercas e adubo para a área de viveiros. Além disso foi prevista doação para fundações de pesquisa agrícola ou até mesmo leilão do material proveniente da supressão. Não houve previsão de utilização da biomassa para geração de energia. Entretanto esta parece ser uma opção a ser estudada e por este motivo foi analisada neste trabalho.

Por outro lado, durante a fase de construção da barragem são utilizados diversos equipamentos consumidores de óleo diesel como caminhões, escavadeiras, tratores e geradores. Esses últimos são destinados à geração de energia elétrica aos canteiros avançados ou para realização de atividades mais remotas.

A logística de abastecimento dos equipamentos na obra é uma tarefa complexa. Aliada ao próprio consumo do combustível do equipamento, a atividade de abastecer os equipamentos no canteiro de obra representa alto impacto ambiental.

O combustível é transportado em caminhões tanque específicos desde a distribuidora até um tanque de armazenamento localizado na obra. Depois de recebido nesse tanque, o combustível é transferido para caminhões abastecedores que realizam a atividade de abastecer todos os equipamentos da obra, espalhados por todo a área da obra. Numa obra com o porte da obra da Barragem Pedreira, essa rotina se repete praticamente todo dia. Na Figura 7.4 pode ser visto um esquema representando o processo de abastecimento do gerador na obra.

Figura 7.4 - Logística de abastecimento de gerador na obra desde o distribuidor de combustível

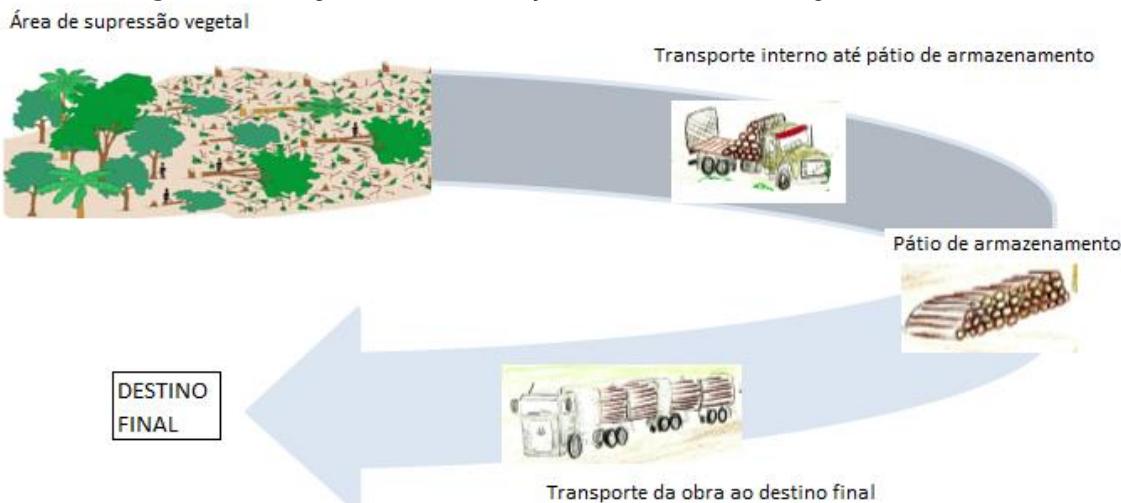


Fonte: Do próprio autor

Por sua vez, a biomassa proveniente da supressão também apresenta uma cadeia logística complexa. Após a retirada da vegetação, as toras são

transportadas aos pátios de estocagem temporários dentro da obra. Nesse pátio, a biomassa é devida empilhada e fica aguardando destinação. Após definida a destinação, a biomassa é então transportada em caminhões específicos até o destino final. A Figura 7.5 representa resumidamente a logística de supressão e destinação da biomassa na obra. Essa logística se aplica desde que a biomassa não seja aproveitada na própria obra.

Figura 7.5 - Logística de destinação final da biomassa gerada na obra



Fonte: Do próprio autor

Ao se estudar a possibilidade de aproveitamento da biomassa suprimida para a geração de energia nos geradores movidos a óleo diesel da obra, além de se reduzir o consumo de combustível fóssil nos geradores e dar destinação adequada à biomassa, também se evitaria boa parte do consumo de combustível fóssil das cadeias apresentadas nas Figuras 7.4 e 7.5.

Nesse sentido, será avaliada a possibilidade de substituição parcial do óleo diesel nos dois geradores principais utilizados na obra, levando-se em consideração a quantidade de biomassa gerada, a potências dos geradores e consumo estimado para cada um com base em dados da literatura.

7.3 CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DA BIOMASSA GERADA

Conforme Anexo C, a região da barragem é ocupada predominantemente por ambiente antrópico com vegetação característica da Mata Atlântica e também de áreas de reflorestamento com eucalipto.

O foco da avaliação proposta por esse trabalho será o material lenhoso proveniente da supressão vegetal, portanto quantidades de pasto, folhas e outras partes não serão consideradas.

No Anexo C, a quantidade de material lenhoso proveniente de supressão vegetal foi dividida em 3 grandes áreas: eixo da barragem, acessos e reservatório. No primeiro momento serão suprimidas as vegetações do eixo e dos acessos. No segundo momento, a grande área do reservatório passará pelo desmatamento. A Tabela 7.2 representa os volumes estimados de biomassa para cada etapa.

Tabela 7.2 – Volumes estimados de biomassa em cada fase da obra

Origem	Volume (m ³) eixo	Volume (m ³) Acesso	Volume (m ³) Reservatório
FES estágio Inicial	1.551,98	106,47	3514,97
FES estágio Médio	886,20	369,51	1897,27
Árvores isoladas	116,74	54,55	80,46
Total	2.554,92	530,53	5.492,70

Fonte: Anexo C (2019)

Para se chegar ao peso total de biomassa gerada na supressão foi preciso se chegar a uma densidade média das espécies encontradas na região da barragem. Essas espécies, suas densidades e a densidade média delas estão explicitadas na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 – Espécies encontradas na região da Barragem Pedreira e suas densidades

Nome Comum	Nome Científico	Densidade g/cm ³
Jacarandá-paulista	<i>Machaerium villosum</i> Vogel	0,85
Guatambu-de-sapo	<i>Chrysophyllum gonocarpum</i> (Mart. & Eichler ex Miq.) Engl.	0,70
Copaíba	<i>Copaifera langsdorffii</i> Desf.	0,70
Jatobá	<i>Hymenaea courbaril</i> L. var. <i>stilbocarpa</i> (Hayne) Y. T. Lee & Langenh.	0,96
Bico-de-pato	<i>Machaerium nyctitans</i> (Vell.) Benth.	0,84
Mutambo	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	0,61
Timburi	<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong	0,54
Guaçatonga	<i>Casearia 4ylvestris</i> Sw.	0,92
Quaresmeira	<i>Tibouchina granulosa</i> (Desr.) Cogn.	0,92
Maria-mole	<i>Dendropanax cuneatus</i> (DC.) Decne. & Planch.	0,55
Jequitibá-rosa	<i>Cariniana legalis</i> (Mart.) Kuntze	0,53
Eucalipto	<i>Eucalyptus</i> sp	0,73
Densidade média		0,74

Fonte: Anexo C (2019)

Utilizando-se o valor de densidade média de 740kg/m³, conforme Tabela 19, chega-se a um total de 6.347,83 toneladas de material lenhoso proveniente de supressão. A separação dessa quantidade total por fase da obra está demonstrada na Tabela 7.4.

Tabela 7.4 – Volume e peso de biomassa a ser gerada durante as fases da obra da Barragem Pedreira

Fase	Volume (m ³)	Peso (t)
Eixo	2.554,92	1.890,64
Acessos	530,53	392,59
Reservatório	5.492,70	4.064,60
Total	8.578,15	6.347,83

Fonte: Do próprio autor

A partir da Tabela 7.3 pode-se perceber que a vegetação presente na área de supressão contém algumas famílias de madeira consideradas nobres, como é o caso do Jatobá e do Jacarandá-Paulista, porém o material proveniente da supressão vegetal da obra não apresenta alto valor comercial por apresentar rachaduras radiais e tangenciais, não ter padronização, possuir alto grau de encurvamento e diâmetros diferentes, conforme pode ser visto na Figura 7.6.

Figura 7.6 - Evidências de rachaduras radiais e tangenciais, diâmetros diversos e elevado encurvamento da biomassa gerada na Barragem Pedreira



Fonte: Anexo C (2019)

7.4 CARACTERIZAÇÃO DOS GERADORES

Em obras do porte da Barragem Pedreira, normalmente se utilizam geradores para alimentação de cargas onde se tem dificuldade de acesso para implantação de rede elétrica. Por serem construídas em regiões remotas, por

mais que sejam próximas aos centros urbanos, a instalação de rede elétrica pela concessionária da região nessas obras pode ser demorada ou considerada inviável em termos de custo.

A análise da possibilidade de utilização da biomassa proveniente da supressão vegetal da Barragem Pedreira será feita utilizando-se como base os dados técnicos e operacionais de dois geradores mobilizados na obra: um Caterpillar Olympian de 45 kVA e um Cummins de 212 kVA.

7.4.1 Gerador Caterpillar Olympian GEP44-9

O gerador GEP44-9 possui potência de 45 kVA ou 36 kW, tensão de 480V a 60 Hz e está sendo utilizado para alimentação de cargas no laboratório de qualidade da obra. Essas cargas compreendem a estufa, as luminárias e os computadores presentes no local, que somam menos de 10 kW de demanda total.

Como explicitado na Figura 7.7, para um funcionamento a 50% da plena carga do gerador, tem-se um consumo de diesel de 6,8 l/h. Embora a carga utilizada no laboratório seja menor do que 50%, será adotado esse valor para as análises deste trabalho.

Figura 7.7 - Características do sistema de combustível do gerador Caterpillar Olympian GEP44-9

Sistema de combustível				
Tipo de filtro de		Elemento Descartável		
Combustível recomendado:		Diesel classe A		
Consumo de combustível: l/h (gal EUA/h)				
110% Carga	100% Carga	75% Carga	50% Carga	
Principal:				
50 Hz	10,2 (2,7)	9,2 (2,4)	7,1 (1,9)	5,3 (1,4)
60 Hz	12,0 (3,2)	10,6 (2,8)	8,2 (2,2)	6,8 (1,8)
Emergência:				
50 Hz	10,2 (2,7)	7,7 (2,0)	5,6 (1,5)	
60 Hz	12,0 (3,2)	8,9 (2,4)	7,0 (1,9)	
(com base em combustível diesel com densidade de 0,84 e em conformidade com BS2869, Classe A2)				

Fonte: Manual do fabricante (2011)

De acordo com informações obtidas na obra, de janeiro a julho de 2020 esse gerador trabalhou 1.128 horas (Tabela 7.5), o que daria pouco mais de 5 horas de trabalho por dia nesse período. Considerando o consumo estipulado pelo fabricante de 6,8 l/h, tem-se um total de 7.670 litros de diesel consumidos no período.

Tabela 7.5 – Horas trabalhadas pelo gerador Caterpillar Olympian modelo GEP44-9 na Barragem Pedreira de jan/20 a jul/20

Gerador Mod GEP44-9	TOTAL	jan-20	fev-20	mar-20	abr-20	mai-20	jun-20	jul-20
Horímetro Inicial	-	8.924	9.103	9.421	9.684	9.818	9.923	10.021
Horímetro Final	-	1.128	9.086	9.406	9.666	9.804	9.914	10.052

Fonte: Do próprio autor

7.4.2 Gerador Cummins C170D6

O gerador C170D6 possui potência de 212 kVA ou 170 kW em modo Standby e 206 kVA ou 165 kW em modo Prime, tensão de 480V a 60 Hz e está sendo utilizado para alimentação de cargas no refeitório, vestiário posto administrativo avançado da obra. Essas cargas compreendem chuveiros, refletores, máquinas de suco, ar condicionado, luminárias e os computadores presentes no local, que somam aproximadamente 55 kW de demanda total.

Como explicitado na Figura 7.8, para um funcionamento a 25% da plena carga do gerador, tem-se um consumo de diesel de 13 l/h. Embora a carga utilizada por esse gerador seja um pouco maior do que 25%, será adotado esse valor para as análises deste trabalho.

Figura 7.8 - Consumo de combustível do gerador Cummins C170D6

Consumo de Combustível

Potência Nominal	Standby				Prime			
	212 kVA		170 kW		206 kVA		165 kW	
Carga Aplicada	Full	3/4	1/2	1/4	Full	3/4	1/2	1/4
Consumo (Litros / Hora)	50	36	25	14	45	33	23	13

Fonte: Manual do fabricante (2011)

De acordo com informações obtidas na obra, de novembro de 2019 a agosto de 2020 esse gerador trabalhou 2.784 horas (Tabela 7.6), o que daria pouco aproximadamente 11 horas de trabalho por dia nesse período. Considerando o consumo estipulado pelo fabricante de 13 l/h, tem-se um total de 36.192 litros de diesel consumidos no período.

Tabela 7.6 – Horas trabalhadas pelo gerador Cummins modelo C170D6 na Barragem Pedreira de nov/19 a ago/20

Gerador Mod C170D6	TOTAL	nov-19	dez-19	jan-20	fev-20	mar-20	abr-20	mai-20	jun-20	jul-20	ago-20
Horímetro inicial	-	40	190	421	589	810	1.241	1.680	2.123	2.353	2.609
Horímetro final	-	2.784	179	392	567	792	1.217	1.659	2.116	2.333	2.580

Fonte: Do próprio autor

7.5 VIABILIDADE TÉCNICA DE UTILIZAÇÃO

Na geração de energia elétrica, gaseificadores de leito fixo têm sido empregados na alimentação de motores de combustão interna, em sistemas de

capacidade entre 1 kW e 200 kW (COELHO *et.al*, 2018). Os dois geradores instalados na obra da Barragem Pedreira se enquadram nessa faixa de potências.

Em sistemas de pequeno porte, o tipo de leito fixo mais apropriado é o de fluxo descendente (*downdraft*). Esse tipo de gaseificador gera um gás de síntese com baixo teor de alcatrão e material particulado, porém apresenta baixo rendimento e dificuldade de mecanização da alimentação, que normalmente é feita de forma manual.

Em testes realizados com um gerador de 36 kW, Figueiredo *et.al* (2012) chegaram a um consumo médio de substrato de 49,6 kg/hora. A partir desse valor, deduz-se que para cada kWh produzido pelo gerador, 1,3 kg de biomassa são consumidos.

O Banco Mundial, através do Programa de monitoramento de gaseificadores de pequena escala para biomassa chegou à conclusão que o consumo específico médio de biomassa dos gaseificadores em operação desde 1983 até 1993 era de 1,1 a 1,4 kg/kWh naqueles que utilizam madeira, 0,9 kg/kWh nos que utilizam carvão vegetal e 2,0 a 3,5 kg/kWh quando o combustível é a casca de arroz (LORA, *et.al apud* STASSEN, 1995).

Extrapolando-se os valores obtidos pela literatura, será considerado o consumo de 1,5 kg/kWh para cálculo da quantidade de biomassa necessária para alimentar os dois geradores da obra. Essa extração permite que a análise tenha margem de segurança no que diz respeito à quantidade fornecida *versus* a quantidade necessária.

O gerador Caterpillar Olympian GEP44-9 produziu 40.608 kWh de energia elétrica de janeiro a julho de 2020. Para essa produção de energia utilizando-se a biomassa, seriam necessários 60.912 kg de biomassa.

O gerador Cummins C170D6 produziu 459.360 kWh de energia elétrica de novembro de 2019 a agosto de 2020. Para essa produção de energia utilizando-se a biomassa, seriam necessários 689.040 kg de biomassa.

A Tabela 7.7 resume essas informações. A quantidade total de biomassa que teria sido consumida para produzir a energia gerada pelos dois geradores movidos a óleo diesel na obra seria de aproximadamente 750 toneladas, ou seja, aproximadamente 12% do total de biomassa que será gerada pela atividade de supressão vegetal da obra.

Tabela 7.7 – Consumo de biomassa previsto para produção de energia obtida nos gerados instalados na obra

	Caterpillar Olympian GEP44-9	Cummins C170D6	Total
Potência (kW)	36	165	
Horas de operação (h)	1.128	2.784	
Energia gerada (kWh)	40.608	459.360	
Consumo específico de biomassa (kg/kWh)	1,5	1,5	
Consumo total de biomassa (kg)	60.912	689.040	749.952

Fonte: Do próprio autor

A potência do sistema gaseificador – motor de combustão interna pode chegar a 50% do valor da potência do motor alimentado somente com óleo diesel. Uma vez que as cargas alimentadas pelos geradores na obra são consideravelmente menores do que suas capacidades, essa redução de potência não apresentaria problema.

Considerando-se que a construção da barragem seja concluída no final de 2021 e adotando a média produzida de energia mensal para cada gerador, a quantidade total de biomassa para geração de energia elétrica nos geradores através de gaseificação seria de aproximadamente 2.000 toneladas (Tabela 7.9), ou seja, pouco mais de 30% de toda a biomassa gerada através de supressão vegetal na obra, indicando que, em termos de suprimento de combustível e de atendimento das cargas hoje acionadas por gerador, a proposta de implantar gaseificadores para geração de energia elétrica juntamente com os geradores é viável.

Tabela 7.8 - Projeção de consumo de biomassa até dezembro de 2021.

	Caterpillar Olympian GEP44-9	Cummins C170D6	Total
Potência (kW)	36	165	
Meses em operação	7	10	
Energia gerada - média mensal (kWh)	5.801	45.936	
Projeção de geração até dez/21	139.227	1.194.336	
Consumo específico de biomassa (kg/kWh)	1,5	1,5	
Consumo total de biomassa (kg) (projeção)	208.841	1.791.504	2.000.345

Fonte: Do próprio autor

Como os requisitos de potência do gaseificador são semelhantes àqueles adotados no projeto GASEIBRAS, seria possível estabelecer parceria entre o IPT e as empresas envolvidas com a construção da barragem para fabricação do equipamento. Dessa forma, considerando-se que o porte dos equipamentos seria similar, poderiam ser aproveitadas as experiências anteriores dos pesquisadores do instituto para melhor aproveitamento da biomassa em questão.

7.6 ESTIMATIVA DE CUSTO DE IMPLANTAÇÃO

O objetivo principal deste trabalho não é fazer uma profunda análise de viabilidade econômica, mas sim avaliar a possibilidade de utilização da biomassa proveniente de supressão vegetal para gerar energia elétrica principalmente do ponto de vista de quantidade de material disponível. Porém, para que esse estudo possa incentivar próximos estudos mais direcionados à tomada de decisão sobre a instalação dos gaseificadores para geração de energia elétrica nos geradores, será feita uma estimativa de custo de implantação para que sirva de ordem de grandeza para outros estudos.

Em estudo apresentado no XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, ALVES *et.al.* (2016) apresentaram análise de viabilidade econômica em que um sistema gaseificador / moto-gerador com capacidade de 36 kWe teve custo de aquisição de R\$102.000,00, sendo R\$62.000,00 correspondentes ao gaseificador.

SANTOS (2006) em seu estudo de sobre o projeto GASEIFAMAZ, informa que o custo de aquisição do sistema gaseificador / moto-gerador com capacidade de 20 kWe foi de R\$150.000,00 já incluindo os impostos de importação. Se for considerado que o gaseificador representa 60% do valor total, como foi apresentado por ALVES *et.al.* (2016), pode-se estimar que o gaseificador deste projeto tenha custado R\$90.000,00. Os impostos de importação não serão excluídos da conta para que o impacto da importação seja levado em consideração na estimativa de custo de aquisição do sistema.

Analizando-se apenas os valores dos gaseificadores apresentados nos dois estudos, chega-se a uma variação de R\$1.722,22 por kWe de capacidade a R\$4.500,00 por kWe de capacidade. Com isso os valores estimados de aquisição para gaseificadores capazes de atender os dois geradores instalados na obra são os apresentados na Tabela 7.9.

Tabela 7.9 – Estimativa de custo de aquisição do gaseificador.

	Caterpillar Olympian GEP44-9	Cummins C170D6
Potência (kW)	36	165
Custo de aquisição do gaseificador considerando R\$1.722,22/kWe	R\$ 61.999,92	R\$ 284.166,30
Custo de aquisição do gaseificador considerando R\$4.500,00/kWe	R\$ 162.000,00	R\$ 742.500,00

Fonte: Do próprio autor

Não existe fabricação em série para gaseificadores de biomassa residual de madeira desse porte, razão pela qual os gaseificadores para esse projeto teriam que ser fabricados a partir de modelos já testados. Nesse contexto, os projetos de gaseificadores utilizados pelo IPT poderiam servir de base para construção dos gaseificadores em questão.

Aos valores apresentados na Tabela 7.9, para se ter um custo de implantação mais completo, deve-se adicionar custos da infraestrutura necessária para armazenamento do gaseificador e custos de adaptação do motor para receber a injeção de gás de síntese do gerador. Além disso, deve-se considerar o custo de implantação de um processo mecanizado para preparação da biomassa, como a Trituração, por exemplo.

7.7 REDUÇÃO DE DIESEL ESTIMADA

Para que não haja problemas no motor do grupo gerador, a substituição máxima de diesel que os sistemas aceitam é de 80% (SANDRA, 2006), ou seja, a operação ocorre com 80% de gás de síntese e 20% de diesel. Considerando esse valor, até o momento já teriam sido economizados 28.954 litros de diesel no gerador Cummins e 6.136 litros de diesel no gerador Caterpillar Olympian, totalizando 35.090 litros de diesel que poderiam ter sido economizados com a utilização dos gaseificadores.

Fazendo a mesma consideração de prazo final da obra em dezembro de 2021, conforme foi feito para o cálculo total de consumo de biomassa, reduziria-se o consumo de diesel em 64.124 litros, sendo 49.221 litros no gerador Cummins e 14.902 no gerador Caterpillar Olympian (Tabela 7.10).

Tabela 7.10 – Projeção de consumo de diesel nos geradores até dezembro de 2021 e eventual redução caso fosse adotada a gaseificação da biomassa.

	Caterpillar Olympian GEP44-9	Cummins C170D6	Total
Potência (kW)	36	165	
Meses em operação	7	10	
Horas trabalhadas (total)	1.128	2.784	
Horas trabalhadas (média mensal)	161,1	278,4	
Consumo médio de diesel (l/h)	6,8	13,0	
Consumo total estimado (l) (dez/21)	18.628	61.526	80.155
Redução do consumo de diesel (80% gás de síntese) (l)	14.902	49.221	64.124

Fonte: Do próprio autor

Considerando o custo médio do diesel na obra de R\$3,50 por litro, a redução do consumo de combustível impactaria numa redução de custo de R\$224.434,00 para os dois geradores. Mesmo considerando-se a faixa mais baixa de custo de aquisição dos gaseificadores mostrada na Tabela 7.9, a redução de custo causada pela redução de consumo de diesel não seria suficiente para pagar a aquisição dos gaseificadores.

7.8 POSSÍVEIS RESTRIÇÕES À IMPLANTAÇÃO

Apesar de apresentar uma solução tecnicamente viável ao problema da destinação da biomassa, a implantação de gaseificadores dificilmente se tornará viável do ponto de vista econômico durante o período da obra. Essa sem dúvida, seria uma restrição muito grande à implantação do sistema de gaseificação.

Para diminuir a distância existente entre a economia de combustível com a implantação de gaseificadores e o custo de aquisição desses equipamentos, algumas alternativas poderiam ser avaliadas como construir uma central termelétrica em que um gaseificador só abastece os dois geradores ou ligar os geradores à concessionária de energia elétrica local e exportar o excedente para a rede.

Outra restrição existente é a resistência natural do setor com a implantação de novas tecnologias além do foco em metas de curto prazo, atreladas ao prazo dos projetos. As alternativas para esses dois tópicos seriam incentivar a compra dos equipamentos pelas empresas construtoras para que façam parte do ativo imobilizado das companhias e garantir vantagem competitiva em licitações para empresas que apresentem soluções tecnológicas que reduzam a emissão de gases de efeito estufa além de apresentarem planos de utilização de energias renováveis durante a obra. Essas duas alternativas teriam que ser fornecidas pelo governo.

A percepção de quem estaria recebendo o real benefício com a implantação dos gaseificadores é outro ponto de possível restrição. Sem contar do ponto de vista ambiental, em que todos estariam sendo beneficiados, caso o projeto fosse totalmente arcado pela empresa construtora, essa teria dificuldade em perceber o benefício, uma vez que o investimento para aquisição dos equipamentos seria dela e a economia de combustível fóssil provavelmente não justificasse esse desembolso, enquanto que o órgão responsável teria o problema da destinação da biomassa resolvido sem ter custo algum para isso. Por outro lado, caso o órgão resolvesse patrocinar a implantação do gaseificador, teria custo para essa implantação enquanto que a empresa construtora se beneficiaria da economia de combustível sem ter de desembolsar qualquer recurso.

A alternativa para essa restrição seria o estabelecimento de uma parceria entre órgão e empresa construtora para que ambos dividissem os custos de implantação e pudessem ter uma percepção de que o negócio acabou sendo interessante para os dois.

Outra alternativa seria a utilização de linhas de financiamento para projeto de pesquisa oferecidas pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), ligada à Secretaria de Desenvolvimento Econômico e que é uma das principais agências de fomento à pesquisa científica e tecnológica do país.

No âmbito da FAPESP, pode-se citar o Programa de Apoio à Pesquisa em Parceria para Inovação Tecnológica (PITE), que conta com subsídios de 20%, 50% ou 70% do valor do projeto, a depender da modalidade. Esse programa tem como objetivo intensificar o relacionamento entre Instituições de Ensino Superior e Pesquisa e empresas, por meio da realização de projetos de pesquisa cooperativos e financiados pelas empresas parceiras. Nessa linha, a parceria entre as empresas envolvidas na construção da barragem e o IPT poderiam pleitear financiamento para pesquisa e construção do gaseificador.

Ainda no âmbito de crédito, poderia se buscar uma alternativa de financiamento com taxas subsidiadas da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.

A FINEP conta com uma linha de crédito a taxas subsidiadas destinada a projetos de desenvolvimento tecnológico de empresas chamada de linha de apoio à inovação, aplicada a empresas de médio e grande porte. Há também a possibilidade de aplicação de recursos não reembolsáveis desde que seja para projetos de cooperação entre algum Instituto de Ciência e Tecnologia e empresas. Ambas as modalidades de apoio fazem parte do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT).

8 CONCLUSÃO

O setor da construção é um setor que apresenta grande impacto ambiental, tanto do ponto de vista dos recursos consumidos (energéticos ou não) quanto do ponto de vista da área degradada. Além disso, apesar de todos os esforços voltados para as compensações que o setor deve apresentar para a obtenção das licenças que permitem o início das obras, do ponto de vista de aproveitamento energético pouco avanço é percebido.

A construção de barragens causa impacto ainda mais perceptível devido às enormes áreas desmatadas para construção das estruturas e também para inundação do reservatório. Além disso, a perda de vegetação pode ocorrer não só devido à inundação direta, mas também como consequência do deslocamento dos residentes retirados das áreas inundadas e de novos negócios desenvolvidos às margens dos reservatórios construídos.

As emissões de gases de efeito estufa também são outro impacto gravíssimo na construção das barragens. Como exemplo, as emissões para a construção da represa de Belo Monte foram estimadas em 0,98 milhões de toneladas de carbono equivalente de CO₂ (FEARNSIDE, 2015).

Nesse sentido, é de fundamental importância que se desenvolvam formas de aproveitamento dos resíduos gerados nos canteiros de obras para geração de energia elétrica.

A alternativa de utilização da gaseificação da biomassa surge como boa opção, uma vez que o desenvolvimento tecnológico do setor energético de biomassa vem crescendo muito nos últimos, impulsionado principalmente pelas indústrias da cana-de açúcar e de papel e celulose.

No âmbito da construção da Barragem Pedreira no Estado de São Paulo, esse trabalho concluiu que há viabilidade técnica para aproveitamento da biomassa proveniente de supressão vegetal através de gaseificação, porém um entrave poderia ser a viabilidade econômica. Como esse último fator normalmente é determinante nas tomadas de decisões, uma análise mais profunda dos custos envolvidos na implantação dos gaseificadores deve ser feito e deve-se buscar alternativas para aproximar a redução dos custos envolvidos na destinação da biomassa gerada na supressão com o investimento necessário para se fazer esse aproveitamento energético.

Outro fator preponderante do ponto de vista ambiental seria a redução das emissões de gases de efeito estufa que a adoção dos gaseificadores poderia gerar se levadas em consideração o consumo de diesel pelos geradores, as cadeias de fornecimento e abastecimento de óleo diesel e a logística necessária para destinação da biomassa para fora do canteiro de obra.

Apesar de necessitar de grande quantidade de biomassa para geração da energia equivalente nos geradores, o excedente de biomassa ainda seria relevante, na ordem de 4.000 toneladas que não seriam aproveitados nos gaseificadores. Esse excedente poderia ser aproveitado ainda em outras etapas da obra, como na geração de calor para cocção dos alimentos ou para aquecer a água dos chuveiros.

Sabendo da grande relevância que o setor de construção representa para o desenvolvimento do país, mas sem esquecer do impacto ambiental causado pelo setor, outras alternativas de geração de energia através de aproveitamento de resíduos poderiam ser estudadas na obra da Barragem Pedreira como o aproveitamento de pneus para geração de energia elétrica através de pirólise, por exemplo.

De forma geral, e de maneira que as fontes renováveis de energia passem a ser mais utilizadas nos canteiros de obras, os processos licitatórios de obras poderiam passar a pontuar positivamente as alternativas de utilização de energias renováveis apresentadas pelas empresas participantes dos certames. Esse incentivo faria com que o setor se beneficiasse de desenvolvimento tecnológico e reduzisse o impacto ambiental gerado nas construções.

10 REFERÊNCIAS

- ANATER, M. J. N. Potencial energético da biomassa florestal. São Paulo: PECE, 2020. 103 p. Apostila para disciplina de pós-graduação em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética, ERG012 - Uso de biomassa, biodigestores e biogás.
- ARDILA, Y. C. Gaseificação da biomassa para a produção de gás de síntese e posterior fermentação para bioetanol: modelagem e simulação do processo. Campinas, SP: UNICAMP, 2015, p. 234.
- BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN). Ministério de Minas e Energia - EPE. Rio de Janeiro, 2020.
- BRASIL. Câmara Brasileira da Indústria da Construção. Energia nas construções: uma contribuição do setor à redução de emissões e de uso de fontes renováveis de energia. Brasília: CBIC, 2017. 130 p.
- BRASIL. Departamento de Águas e Energia Elétrica. Plano Básico Ambiental - Barragem Pedreira. São Paulo: SSRH/DAEE, 2018. 960 p.
- BRASIL. Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ). Relatório 2019. Indústria Brasileira de Árvores elaborado por Pöyry Consultoria em Gestão e Negócios Ltda. São Paulo: IBÁ, 2019, p.80.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2018. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. p.25.
- BRASIL. Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA). Estudo de pré-viabilidade: custo de produção da madeira de eucalipto. São Paulo, 2017. 106 p.
- BRASIL. Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA). Florestas energéticas: potencial da biomassa dedicada no Brasil. São Paulo, 2018. 78 p.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). Plano Nacional de Energia 2030. Ministério de Minas e Energia colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília : MME : EPE, 2007, p.250.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Importância atual e potencial de uso da biomassa para energia em Sergipe [recurso eletrônico] /B22. Acesso em: 26 de set. de 2020.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Projeto PNUD 00/20. Levantamento sobre a geração de resíduos provenientes da atividade madeireira e proposição de diretrizes para políticas, normas e condutas técnicas para promover o seu uso adequado. Curitiba, 2009, p.35.
- CHAVES, L. I. Microgeração de energia elétrica com gás de síntese de um gaseificador concorrente utilizando Mazilaurus Itaúba. Cascavel. 2012. 73 p.

COELHO, S. T. Geração de eletricidade a partir de biomassa no Brasil. Situação Atual, Perspectivas e Barreiras. In: MOREIRA, J. R. S. Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética. 1ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018. Cap. 11. p. 235-255.

Coelho, S. T., Garcilasso, V. P., Santos, M. M., Escobar, J. F., Perecin, D., Souza, D. B. Atlas de Bioenergia de São Paulo. São Paulo, IEE:USP, 2020.

COELHO, S. T. Gaseificação de biomassa. São Paulo: PECE, 2020. 78 p. Apostila para disciplina de pós-graduação em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética, ERG012 - Uso de biomassa, biodigestores e biogás.

COELHO, S.T. et. al. Geração de eletricidade utilizando sistemas de gaseificação de biomassa in natura em comunidades isoladas da região amazônica - projeto GASEIBRAS. CENBIO. São Paulo, 2006. 5 p.

COELHO, S.T. et. al. Sistemas de gaseificação de biomassa na geração de energia elétrica para comunidades isoladas. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5., 2004, Campinas.

Coelho, S.T. et.al. Atlas de Bionergia do Brasil - São Paulo. Projeto de Fortalecimento Institucional do CENBIO, Convênio 721606/2009 - MME.

DAEE. Barragem Pedreira e Duas Pontes, c2019. Pedreira, Projeto e Construção. Disponível em: <<https://www.daeepedreiraeduaspontes.com.br/index.php/barragem-pedreira/projeto-e-construcao>>. Acesso em: 26 de set. de 2020.

DIAS, J. M. C. et. al. Produção de briquetes e pellets a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2012.

FEARNSIDE, P. M. Hidrelétricas na Amazônia: impactos ambientais e sociais na tomada de decisões sobre grandes obras. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. Manaus, AM: INPA, 2015, p.298.

FIGUEIREDO, F. L. et al. Produção de energia elétrica através da biomassa em sistema de gaseificação concorrente e grupo gerador com capacidade de 50 KVA. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 33, n. 2, p. 165-174, jul./dez. 2012

GIODA, A. Características e procedência da lenha usada na cocção no Brasil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018. 18 p.

HARTMANN, A. A. A gestão dos resíduos de madeira: estudo em uma madeireira no município de Salvador das Missões. Cerro Largo, RS: UFFS, 2017, p.68.

IEA BIOENERGY. Annual Report 2019. Disponível em <www.ieabionenergy.com>. Acessado em 21/09/2020.

IEA BIOENERGY. Status report on thermal gasification of biomass and waste 2019 (IEA Bioenergy Task 33 special report). Disponível em <www.task33.ieabionenergy.com>. Acessado em 23/09/2020.

IEA BIOENERGY. The use of forest biomass for climate change mitigation: dispelling some misconceptions. Disponível em: <<http://task45.ieabioenergy.com/>>. Acessado em 12/09/2020.

INFIESTA, L. Gaseificação de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Vale do Paranapanema - Projeto CIVAP. / L. INFIESTA. São Paulo, 2015. 137 p.

IRENA / IEA-ETSAP (2015). Biomass for Heat and Power (Technology Brief). Disponível em <www.irena.org/Publications>. Acessado em 12/09/2020.

LORA, E. E. S., et.al. Geração elétrica em pequena escala a partir da gaseificação de biomassa. Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n5v2/066.pdf>>. Acesso em 30/09/2020.

MALUF, D F. Análise das perspectivas de uma usina de recuperação energética: URE - Heliópolis. São Paulo, 2020. 198 p.

NASCIMENTO, F. S. Desenvolvimento de protótipo de gaseificador de resíduos combustíveis em leito horizontal. São Carlos. 2014. 103 p.

REN21. Renewables 2020 - Global Status Report. Disponível em <www.ren21.net>. Acessado em 18/09/2020.

RENDEIRO, G. et al. Combustão e gasificação de biomassa sólida (Soluções energéticas para a Amazônia). Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008, p. 192.

RIBEIRO, R. S. et al. Gaseificação de Biomassa na Geração de Eletricidade em Pequena Escala. Disponível em <<http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/citenel2007/pdf/it34.pdf>>. Acesso em 20 de agosto de 2020.

ROCHA, M. S. R. et.al. Avaliação do potencial energético de resíduos agroindustriais provenientes de diferentes regiões brasileiras. Revista Engevista, V.19, n.1, p. 217-235, janeiro 2017.

SANTOS, S. M. A. Geração de eletricidade em comunidades isoladas na região amazônica com a utilização de gaseificadores de biomassa. São Paulo. 2006. 185 p.

THUNMAN, H. et.al. Economic assessment of advanced biofuel production via gasification using cost data from de GoBiGas plant. Energy Sci Eng. 7; p. 217-219, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ese3.271>

VIEIRA, A. C. Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas para geração de energia. Cascavel, PR: UNIOESTE, 2012, P.72

WIECHETECK, M. Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos. Ministério do Meio Ambiente, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. Curitiba, PR: MMA, 2009, p.40.

ANEXO A – Autorização de Supressão Vegetal - CETESB

O original desse documento é eletrônico e foi assinado digitalmente por BENEDITA RAMOS MINDOMA. Para verificar a autenticidade desse documento, acesse o site www.tce.mt.gov.br.

ANEXO B – Parecer Técnico - CETESB



PARECER TÉCNICO
COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO
Av. Prof. Frederico Hermann Jr., 345 - CEP 05459-900 - São Paulo - SP
C.N.P.J. nº 43.776.491/0001-70 - Insc.: Est. nº 109.091.375-118 - Insc. Munic.: nº 8.030.313-7
Site: www.cetesb.sp.gov.br

Nº 133/18/I

Data: 20/12/2018

PROCESSO: IMPACTO 212/2018 (017890/2018-37 e-ambiente)
INTERESSADO: Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAAE
ASSUNTO: Autorização de Supressão de Vegetação Nativa, Intervenção em Área de Preservação Permanente - APP e Corte de Árvores Isoladas Nativas para a implantação dos acessos MD01 e MD03 da Barragem Pedreira
MUNICÍPIOS: Pedreira e Campinas

1. INTRODUÇÃO

Trata-se de análise da solicitação de Autorização de Supressão de Vegetação Nativa, Intervenção em Área de Preservação Permanente - APP e Corte de Árvores Isoladas, para a implantação dos acessos MD01 e MD03 necessários para as obras de construção da Barragem Pedreira, sob responsabilidade do Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAAE.

A análise da equipe técnica deste Departamento teve por base as informações e documentos contidos no Processo IMPACTO 212/2018 (017890/2018-37 e-ambiente), dentre os quais se destacam:

- Ofício s/nº, do Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAAE, protocolizado em 03/09/2018, solicitando Autorização para Supressão de Vegetação Nativa, Intervenção em Área de Preservação Permanente - APP e Corte de Árvores Isoladas Nativas para a implantação dos acessos MD01 e MD03 necessários para as obras de construção da Barragem Pedreira;
- Anotação de Responsabilidade Técnica – ART nº 28027230172917602, do engenheiro florestal Fernando Mendonça D'horta CREA 5060444216-SP, referente à elaboração de estudos ambientais realizados na área de influência dos eixos das Barragem Pedreira e Duas Pontes, incluindo Laudo de Caracterização da Vegetação;
- Anotação de Responsabilidade Técnica – ART nº 2018/03958, da bióloga Daniela Chaves Guedes e Silva CRBio 039796/01-D, referente à estudo de vegetação para solicitação de ASV – Acessos – Barragem Pedreira;
- Ofício nº 38/2015 – GP/trml, emitida pela Prefeitura Municipal de Campinas em 11/02/215, que encaminhou Certidão de Uso e Ocupação do Solo emitida pela Prefeitura de Campinas, atestando que o empreendimento proposto se situa em zona rural do município e, portanto, não está sujeito ao ordenamento da Lei de Uso e Ocupação do Solo;
- Exame Técnico Municipal nº 169/2015-II, emitido pela Prefeitura Municipal de Campinas em 01/12/2015, manifestando-se favoravelmente ao empreendimento, desde que cumpridas as condicionantes constantes do mesmo;
- Certidão de Uso e Ocupação do Solo emitida pela Prefeitura de Pedreira em 26/03/2015, segundo a qual o município informa não possuir legislação de uso e ocupação do solo; e remete o licenciamento para o órgão ambiental estadual, por não possuir corpo técnico específico para a análise;
- Informação Técnica nº 39/18/IEOH, que solicitou informações complementares para continuidade da análise da solicitação de Autorização para supressão de vegetação, intervenção em APP e corte de árvores isoladas;
- Ofício s/nº, do Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAAE, encaminhando documentação em atendimento à Informação Técnica nº 39/18/IEOH;
- Ofício 719/2018/SUPES-SP-IBAMA, de 17/12/2018, encaminhando Anuênciam Prévias nº 01/2018/SUPES/SP do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA para Supressão de Vegetação no Bioma Mata Atlântica, com validade de 4 anos;
- Parecer nº 42/2018-NLA-SP/DITEC-SP/SUPES-SP, referente à Anuênciam para Supressão de Vegetação no Bioma Mata Atlântica para a Barragem Pedreira.

ANEXO C – Material lenhoso oriundo da supressão da Barragem Pedreira



MATERIAL LENHOSO ORIUNDO DA SUPRESSÃO DA BARRAGEM PEDREIRA – SETEMBRO/2019

1. INTRODUÇÃO

Este laudo visa a caracterização e quantificação da madeira oriunda da supressão de vegetação florestal, necessária à execução das obras de implantação da Barragem Pedreira, no município de Pedreira, SP, especificamente das áreas do eixo da barragem, bota foras e acessos (MD01 e MD03), além das futuras supressões de vegetação florestal ainda não autorizadas (supressão vegetal na área de enchimento), com base nos inventários florestais elaborados para instruir as solicitações de Autorização de Supressão Vegetal – ASV na área de enchimento. Bem como, da madeira residual das áreas de florestas já suprimidas, estocadas nos pátios de estocagem de madeira.

Ressalta-se que a região é ocupada por ambientes antrópicos e constituída por vegetação secundária pertencente ao bioma Mata Atlântica - Floresta Estacional Semidecidual, nos estágios sucessionais inicial e médio e, por áreas esparsas de reflorestamento com eucalipto.

2. CARACTERIZAÇÃO E VOLUME DE MADEIRA

2.1. Madeira estocada nos pátios

Atualmente (setembro/2019), no canteiro de obras da Barragem Pedreira, estão organizadas no pátio de madeiras 01, cerca de 11 (onze) pilhas de madeira originária de espécies florestais nativas, correspondente a 1.058,6 st – 794 m³ e, 4 (quatro) pilhas de madeira originária de espécies florestais exóticas, correspondente a 696,2 st – 522,1 m³.

No pátio de madeiras 02 foram organizadas 2 (duas) pilhas de madeira originária de espécies florestais nativas, equivalente a 265,3 st – 199 m³ e, apenas 1 (uma) pilha de madeira originária de espécies florestais exóticas, correspondente a 65,72 st – 49,29 m³. Para o cálculo e obtenção do valor em metros cúbicos, foi utilizado o fator de forma 0,75. Os valores são obtidos através da seguinte fórmula de cálculo (SOARES, 2003):

$$V_{st} = C * L * A = St$$

$$V_{m^3} = C * L * A * 0,75 = m^3$$

Onde:
V = Volume
C = Comprimento
L = Largura
A = Altura
St = Metros Estéreos
m³ = Metros Cúbicos

Pátio	Madeira (origem)	Volume (st)	Volume (m³)	Percentual (%)
1 e 2	Espécies Nativas	1323,9	993	63,48
	Especies Exóticas	761,92	571,39	36,52
TOTAL		2085,82	1564,39	100

Quadro 1 – Volume de madeira nos pátios de estocagem, Barragem Pedreira, setembro/2019.

O material lenhoso proveniente da supressão de florestas nativas é originário de espécimes com diâmetro variando de pequeno à médio porte e, por se tratar de madeira procedentes de supressão de florestas nativas em diversos estágios de regeneração, é composto por espécies heterogêneas resultando em toras de diâmetro pequeno, sem parâmetro adequado de conicidade ou achatamento ou, ainda com elevado grau de encurvamento, além de apresentarem rachaduras radiais e tangenciais.

Quanto à madeira originária de espécies exóticas, ou provenientes de plantios abandonados (cultura de eucalipto) nas áreas desapropriadas, as toras, também, apresentam diâmetro reduzido, sem parâmetro adequado de conicidade ou achatamento ou, ainda com elevado grau de encurvamento.

Os registros fotográficos a seguir, apresentam os aspectos gerais da madeira armazenada nos pátios de estocagem.



Foto 1 – As madeiras nativas estocadas apresentam rachaduras tangenciais e radiais (setembro/2019).



Foto 2 – Detalhe para madeira nativa com rachadura (setembro/2019).



Foto 3 – Técnico florestal medindo a altura da pilha. É possível notar que as toras apresentam em sua maioria reduzido pequeno (setembro/2019).



Foto 4 – Detalhe para pilha de madeira de espécies exóticas com diâmetro reduzido (setembro/2019).



Foto 5 – Visada para o estoque de madeira. Em geral as toras apresentam conicidade inadequada, achatamento ou encurvamento (setembro/2019).



Foto 6 – Em detalhe o elevado grau de encurvamento encontrado em tora amostrada na pilha (setembro/2019).

2.2. Madeira originária das futuras supressões

Os inventários florestais elaborados para instruir as solicitações de ASV para supressão da vegetação do eixo da barragem, dos bota-fora, do acesso e, da área de enchimento, caracterizada como floresta estacional semideciduado (FES) secundária em estágios sucessionais inicial e médio, estimam que o volume de madeira será distribuído conforme quadro a seguir.

Origem	Volume (m³) elxo	Volume (m³) Acesso	Volume (m³) Reservatório	Volume (st) elxo	Volume (st) acesso	Volume (st) reservatório
FES estágio Inicial	1.551,98	106,47	3514,97	2.217,12	152,1	5021,39
FES estágio Médio	886,20	369,51	1897,27	1.265,99	527,87	2710,39
Arvores Isoladas	116,74	54,55	80,46	166,77	77,93	114,9429
Total	2.554,92	530,53	5.492,70	3.649,88	757,90	7.846,72

Quadro 2 – Volume de madeira – Inventário Florestal, Barragem Pedreira.

Deste modo, com base nas estimativas expostas no Quadro 2, a supressão deverá gerar 8.578,15 m³.

Considerando que a densidade média da madeira de espécies identificadas ao longo do empreendimento é de 0,74 g/cm³ ou 740 kg/m³, conforme Quadro 3 apresentado abaixo, estima-se que o empreendimento gere 6.347,83 toneladas de biomassa, ou seja:

$$d = \frac{m}{v} \quad d = 740 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad v = 8578,15 \text{ m}^3 \quad \therefore \quad m = 6347,83 \text{ t}$$

Onde:

d = densidade

v = volume

m = massa

Nome Comum	Nome Científico	Densidade g/cm³
Jacarandá-pau-lata	<i>Machaerium villosum</i> Vogel	0,85
Guatambu-de-sapo	<i>Chrysophyllum gonocarpum</i> (Mart. & Elcherex) Miq. Engl.	0,70
Copalba	<i>Copaifera langsdorffii</i> Desf.	0,70
Jatobá	<i>Hymenaea courbaril</i> L. var. <i>sinuocarpa</i> (Raymey) Y. T. Lee & Langenh.	0,90
Bico-de-pato	<i>Machaerium nyctitans</i> (Vell.) Benth.	0,84
Mutambo	<i>Guzuma ulmifolia</i> Lam.	0,61
Timburi	<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong	0,54
Guaçatonga	<i>Casuarina glauca</i> Sw.	0,92
Quaresmeira	<i>Tibouchina granulosa</i> (Desr.) Cogn.	0,92
Maria-mole	<i>Dendropanax cuneatus</i> (DC.) Decne. & Planch.	0,55
Jequitibá-rosa	<i>Cariniana legalis</i> (Mart.) Kuntze	0,53
Eucalipto	<i>Eucalyptus</i> sp	0,73
Densidade média		0,74

Quadro 3 – Densidade da madeira de algumas espécies nativas.

3. CONSIDERAÇÕES

Os produtos florestais estocados, oriundos da supressão no empreendimento, não apresentam padrão que agreguem valor, por se tratar de madeira procedente de supressão em florestas nativas em diversos estágios de regeneração, sendo composta por espécies heterogêneas sem interesses comerciais, com toras de diâmetro pequeno, sem parâmetro adequado de conicidade ou achatamento ou, ainda com elevado grau de encurvamento, além de apresentarem rachaduras radiais e tangenciais.

A qualidade das toras desdobradas influencia tanto o rendimento e a eficiência de uma indústria madeireira, quanto à qualidade da madeira serrada (VITAL, 2008). Desta forma, ao adquirir toras é indispensável avaliar, além do volume, os defeitos que poderão afetar o rendimento ou a eficiência da indústria madeireira (VITAL, 2008). Dentre a qualidade das toras destacam-se os parâmetros de conicidade, achatamento, encurvamento, rachaduras, sapopemas.

A conicidade é uma característica natural de certas espécies, quando os diâmetros médios das duas extremidades apresentam diferença significativa (IBDF, 1984). De acordo com Vital (2008) a conicidade é uma indicação do afinamento da tora como consequência do mecanismo de formação das árvores.

O achatamento é caracterizado pela presença de diâmetros diferentes numa mesma secção da tora (IBDF, 1984). De acordo com Vital (2008) o achatamento é uma medida do desvio da forma circular da tora e quando acentuado dificulta a produção de um bloco central quadrado e diminui o rendimento de madeira serrada e aumenta a produção de resíduos.

Encurvamento é definido como a mudança no eixo longitudinal da tora, ao longo de uma ou mais partes ou mesmo em toda a tora (IBDF, 1984 e VITAL, 2008). Segundo Vital (2008) o encurvamento pode ser ocasionado por fatores genéticos, crescimento em solo e condições climáticas desfavoráveis. Quando toras com presença de encurvamento são destinadas a produção de madeira serrada ocorre limitação do comprimento das tábuas, resultando em menor rendimento em madeira serrada (VITAL, 2008).

As rachaduras referem-se à separação dos elementos constituintes da madeira. Segundo Jankowsky (1990) as rachaduras aparecem como consequência da diferença de retração nas direções radial e tangencial da madeira e de diferenças de umidade entre regiões contíguas de uma peça, durante o processo de secagem. Ainda de acordo com o referido

autor, essas diferenças ocasionam o aparecimento de tensões que, tornando-se superiores à resistência dos tecidos lenhosos, provocam a ruptura da madeira.

Uma forma de obter valor comercial para o material lenhoso estocado na área de implantação do empreendimento, seria através da utilização dessa madeira biomassa energética (lenha, cavaco, briquete, pellet). A biomassa é a forma mais antiga de energia utilizada pelo homem e vêm sendo tradicionalmente usada na combustão direta, processo que é largamente usado em muitas partes pelo mundo (DERMIBAS et al., 2009).

No cenário mundial, os usos da madeira na geração de energia vêm crescendo continuamente ao longo da última década, incentivado principalmente pelas questões ambientais, no sentido de reduzir as emissões de gases nocivos à atmosfera e aumentar o uso de fontes renováveis (MULLER, 2005).

No Brasil as fontes renováveis de energia representam 42,4% da matriz energética. Sendo desses 42,4% de energia renovável, 13,8% correspondem à energia hidráulica e 24,5% à energia de biomassa, sendo que aproximadamente 9,1% são de origem florestal (lenha e carvão vegetal) (BRASIL, 2013).

O cavaco é constituído por pequenos pedaços de madeira oriundos da picagem ou destroçamento, com um comprimento variável entre 5 e 50 mm, obtidos por estilhaçamento na direção da fibra nos picadores a disco ou em corte reto nos picadores a tambor contendo ainda partículas mais longas e uma razoável porcentagem de finos (GRUNKRAUT, 2012).

Segundo Valverde et al. (2012), o insumo florestal, conhecido como cavaco, já é competitivo aos seus concorrentes derivados do petróleo. De acordo com os mesmos autores, o cavaco pode contribuir para uma redução de aproximadamente 50% dos custos de produção de vapor e energia quando comparado com o petróleo, mas tem encontrado dificuldade de se expandir no mercado. Isto acontece em virtude da falta de uma política governamental que estimule a substituição tecnológica dos equipamentos (caldeiras) nas indústrias e a facilidade no manuseio destes combustíveis fósseis (petróleo)

4. EQUIPE TÉCNICA

Nome	Função Exercida	Formação	Registro
Maria Elena Basilio	Coordenadora dos Programas Ambientais	Engenheira Agrônoma	CREA 5061242441
Luis Alberto de Oliveira	Coordenador dos Programas Bioticos	Engenheiro Florestal	CREA 5063209653

Quadro 4 – Equipe Técnica.

5. REVISAO BIBLIOGRAFICA

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional 2013- Ano base 2012: Relatório Síntese. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro: EPE, 2013. 55 p.

DEMIRBAS, M. F.; BALAT, M.; BALAT, H. Potential contribution to the sustainable energy development. *Energy Conversion and Management*. Oxford, v. 50, p. 1746-1760, 2009.

GRUNKRAUT, M. Cavacos: Coopermiti, 2012. Disponível em: <http://www.coopermiti.com.br/educacao/cavaco.pdf>. Acesso em: 15/dez/2012.

IBDF. Norma Para Medição e Classificação de Toras de Madeiras de Folhosas, 1984.

JANKOWSKY, I. P. Fundamentos de secagem de madeiras. Documentos Florestais. Piracicaba (10): 1 –13, jun. 1990

MÜLLER, M. D. Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba. 2005, 108 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

SOARES, C.P.B.; RIBEIRO, J.C.; NASCIMENTO FILHO, M.B.; RIBEIRO, J.C. Determinação de fatores de empilhamento através de fotografias digitais. *Revista Arvore*, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 473-479, 2003.

VALVERDE, S.R.; MAFRA, J.W.A.; MIRANDA, M. A., SOUZA, C.S.; VASCONCELOS, D. C. Silvicultura brasileira- oportunidades e desafios da economia verde, 2012. Disponível em: <http://fbds.org.br/fbds/IMG/pdf/doc-549.pdf>. Acesso em: 12/fev/2013.

VITAL, B. R. Planejamento e operação de serrarias. Viçosa, MG: UFV, 2008. 211 p.