



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

RANIELLY MONTEIRO BATISTA

**ESTUDO DA CADEIA PRODUTIVA DE BIOMASSAS PARA FINS DE
OTIMIZAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Recife
2023

RANIELLY MONTEIRO BATISTA

**ESTUDO DA CADEIA PRODUTIVA DE BIOMASSAS PARA FINS DE
OTIMIZAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Área de concentração: Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Orientadora: Profa. Dra. Leonie Asfora Sarubbo.

Coorientador: Prof. Dr. Mohand Benachour.

Recife

2023

RANIELLY MONTEIRO BATISTA

**ESTUDO DA CADEIA PRODUTIVA DE BIOMASSAS PARA FINS DE
OTIMIZAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestra em Engenharia Química. Área de concentração: Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Aprovado em: 27 / 02 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jorge Vinícius Fernandes Lima Cavalcanti (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Dr. Juliano Rodrigues Pappalardo (Examinador Externo)
Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação

Prof. Dr. Nelson Medeiros de Lima Filho (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus pela vida e força.

À Profa. Dra. Leonie Sarubbo, quem me deu a oportunidade e confiança de me reaproximar da pesquisa e pela qual nutro profunda admiração e respeito enquanto pessoa e acadêmica, desde os tempos da iniciação científica e do primeiro período da graduação na UNICAP até à orientação.

Ao Prof. Dr. Benachour por me acolher como coorientada, e dividir seus extensos conhecimentos e sabedoria.

A Lucas Biuk, pela implementação do modelo desenvolvido nesta dissertação, em *Phyton*.

Ao Instituto Avançado de Tecnologia (IATI) e à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) pelo suporte e financiamentos prestados à pesquisa, através de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco (PPGEQ – UFPE) por tornar o mestrado factível.

Aos meus colegas de mestrado, especialmente, Raiane dos Santos, Gabrielly Vasconcelos e Fernanda Silva, com as quais apresentei trabalhos, e partilhei o cotidiano acadêmico nessa jornada pandêmica e laboral. A Hélder Barbosa e Pedro Brasileiro pelo incentivo para a realização do mestrado.

A minha família pelo apoio e compreensão nesse período especialmente atribulado para nós.

A todos os professores que passaram pela minha vida, a todos que direta ou indiretamente me ajudaram nos estudos. Aos colegas de trabalho pelas trocas de turno, convivência e ensinamentos.

RESUMO

O uso de biomassas como combustíveis apesar de desafiador mostra-se promissor ambiental e energeticamente. Nesse sentido, dentro do domínio estudo, as biomassas residuais de dendê, resíduos florestais e capim-elefante foram adotadas em virtude da facilidade de obtenção, custo, rendimento e conteúdo energético. Isso pode ser atestado pelos conteúdos energéticos levantados das biomassas propostas, principalmente pelas fibras e cachos vazios de dendê, com PCI em torno de 19 MJ/kg. No entanto, a variabilidade, bem como a logística associada dificultam a competitividade econômica destes combustíveis renováveis com os fósseis. O alto teor de Cl do capim-elefante apresentado pode vir a contribuir com corrosão e incrustações, favorecendo tratamento lixiviatório, ao passo que apresenta um menor PCI. Já os resíduos florestais apresentam menor teor de cinzas e enxofre (1,33% e 0,02% respectivamente). Sendo assim, o estudo contemporâneo da cadeia produtiva de biomassas de capim-elefante, resíduos de dendê e florestais subsidiaram a modelagem matemática deste trabalho, via programação linear, no horizonte de 1 ano, na base semanal. O modelo foi composto por 1 função objetivo de minimização de custos e 17 restrições. Com programação em linguagem *Python*, a modelagem foi capaz de fornecer solução com programações semanais de misturas de biomassas para combustão em uma caldeira aquatubular com vistas a minimizar os custos de geração de energia elétrica. Para elaboração do modelo foram utilizados dados estimados (arbitrados) de uma usina instalada no estado de Roraima (RR) resultando numa demanda térmica de 68.939,9 kW com necessidade de 830 m³/dia de capacidade de armazenamento com vistas à produção de 31 t/h de vapor via ciclo Rankine. O custo anual minimizado obtido na função objetivo foi de R\$ 3.486.895,87, apontando uma solução ótima que totaliza um consumo anual de 15.937,5 t de cachos de dendê e 11.0797,4 t de fibras de dendê. Diante disso, a ferramenta atendeu ao objetivo proposto de auxiliar a gestão do processo da usina, ajustando a melhor configuração de biomassas do ponto de vista econômico e operacional: resíduos de dendê mostram-se a melhor relação custo-benefício. Entretanto, necessita de melhorias em trabalhos futuros que assegurem sua total implementação para enriquecer a otimização aplicada e ampliar o enfoque ambiental e anticorrosivo através das restrições que envolvem índices de corrosão, pré-tratamento e emissões ambientais.

Palavras-chave: biomassa; combustão; otimização energética; programação linear.

ABSTRACT

The use of biomass as fuels although challenging is promising environmentally and energetically. In this sense, within the study domain, the residual biomass of oil, forest residues and elephant grass were adopted due to the ease of obtaining, cost, yield and energy content. This can be attested by the energy contents obtained from the proposed biomasses, mainly by fibers and empty bunches of palm oil, with lower heating value (LHV) around 19 MJ/kg. However, the variability as well as the associated logistics hinder the economic competitiveness of these renewable fuels comparing with fossils. The high Cl content of elephant grass presented may contribute to corrosion and fouling, favoring leaching while having a lower LHV. On the other, forest residues have lower ash and sulphur content (1,33% and 0,02% respectively). Therefore, the contemporary study of the production chain of elephant grass biomass, palm and forest residues supported the mathematical modeling of this work, through linear programming, in the horizon of 1 year, on a weekly basis. The model consisted of 1 objective function of cost minimization and 17 restrictions. Using Python language programming, the modeling will be able to offer solution with weekly schedules of biomass mixtures for combustion in a watertube boiler to minimize the costs of generating electricity. To elaborate the model, real and estimated data (arbitrated) of a plant installed in the state of Roraima (RR) was used. This resulted in a thermal demand of 68.939,9 kW with the need for 830 m³/day of storage capacity with a view to the production of 31 t/h of steam via rankine cycle. The minimized annual cost obtained in the objective function was R\$ 3,486,895.87, pointing out an optimal solution that totals an annual consumption of 15,937.5 t of bunches of palm oil and 11,0797.4 t of oil palm fiber. Therefore, the tool met the proposed objective of assisting the management of the plant process, adjusting the best biomass configuration from the economic and operational point of view: palm oil residues are the best cost-benefit ratio. However, it needs improvements in future work that ensure its full implementation to enrich the applied optimization and broaden the environmental and anti-corrosive approach through restrictions involving corrosion indexes, pretreatment and environmental emissions.

Keywords: biomass; combustion; energy optimization; linear programming.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1	COMBUSTÃO.....	15
2.1.1	Parâmetros de combustão.....	17
2.2	TIPOS DE BIOMASSAS ENVOLVIDAS NA CADEIA PRODUTIVA.....	23
2.2.1	Resíduos de dendê.....	23
2.2.2	Capim-elefante.....	27
2.2.3	Resíduos florestais.....	28
2.3	PROGRAMAÇÃO LINEAR.....	29
2.3.1	Estudos de caso.....	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS BIOMASSAS.....	33
3.2	LEVANTAMENTO DAS CONDIÇÕES GERAIS PARA O ESTUDO.....	33
3.2.1	Estimativa da massa de combustível.....	33
3.2.2	Capacidade de armazenamento.....	37
3.2.3	Corrosão.....	37
3.2.3.1	Teor de cloro e enxofre.....	38
3.2.3.2	Índice B/A.....	38
3.2.3.3	Índice <i>fouling</i>	39
3.2.3.4	Índice álcali.....	39
3.3	AVALIAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA DAS BIOMASSAS.....	40
3.3.1	Visão geral da usina.....	40
3.3.2	Custos de densificação e lixiviação.....	40
3.3.3	Descrição do processo	40
3.4	AVALIAÇÃO DA LOGÍSTICA DA REGIÃO.....	40
3.5	AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS.....	41
3.6	DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO.....	41
3.6.1	Função objetivo.....	44
3.6.2	1º Restrição.....	45
3.6.3	2º Restrição.....	46
3.6.4	3º Restrição.....	47

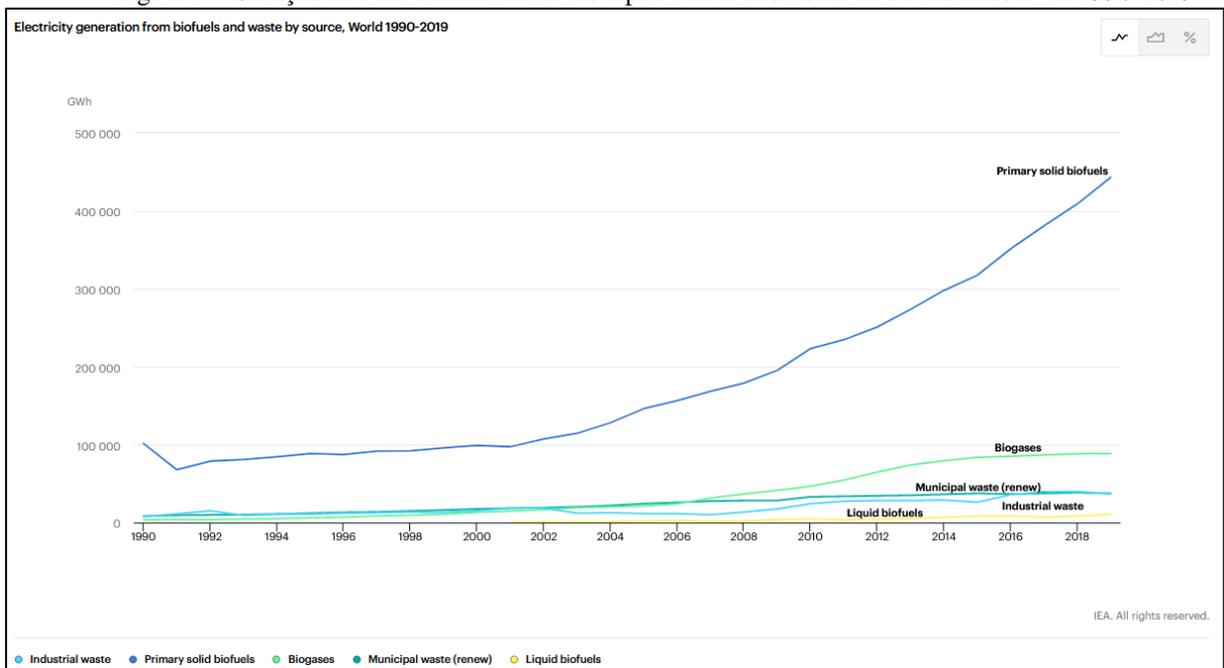
3.6.5	4° Restrição.....	48
3.6.6	5° Restrição.....	49
3.6.7	6° Restrição.....	50
3.6.8	7° Restrição.....	51
3.6.9	8° Restrição.....	52
3.6.10	9° Restrição.....	52
3.6.11	10° Restrição.....	54
3.6.12	11° Restrição.....	54
3.6.13	12° Restrição.....	56
3.6.14	13° Restrição.....	57
3.6.15	14° Restrição.....	57
3.6.16	15° Restrição.....	57
3.6.17	16° Restrição.....	58
3.6.18	17° Restrição.....	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	60
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS BIOMASSAS.....	60
4.2	LEVANTAMENTO DAS CONDIÇÕES GERAIS PARA O ESTUDO.....	61
4.2.1	Estimativa da massa de combustível.....	61
4.2.2	Capacidade de armazenamento.....	62
4.2.3	Corrosão.....	62
4.3	AVALIAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA DAS BIOMASSAS.....	63
4.3.1	Visão geral da usina.....	63
4.3.2	Custos de densificação e lixiviação.....	65
4.3.3	Descrição do processo	67
4.4	AVALIAÇÃO DA LOGÍSTICA DA REGIÃO.....	67
4.5	AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS.....	69
4.6	DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO.....	72
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.....	82
5.1	CONCLUSÕES.....	82
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	82
	REFERÊNCIAS	83
	APÊNDICE A – PARTE DA PLANILHA DE SAÍDA GERADA PELO	
	ALGORITMO PARA QQ_{ctp}.....	91

**ANEXO A – APRESENTAÇÃO PARCIAL DO ALGORITMO DE
MODELAGEM.....**

1 INTRODUÇÃO

O uso de combustíveis fósseis na geração de energia vem sendo desestimulado ao longo dos anos devido ao desafio de menor emissão de poluentes, em atendimento às normas para mitigação do efeito estufa (LIU *et al.* 2020). Nesse sentido, o gás natural, por exemplo, já apresenta tendência de menor popularidade, em virtude dos altos preços e à política de importação de alguns países, reforçando a tendência crescente no uso de biomassas a partir de 2030 (SIKKEMA *et al.* 2021). A Figura 1 ilustra o aumento geral no uso de biocombustíveis no mundo para geração de energia elétrica ao longo das últimas três décadas, sendo em sua grande maioria biocombustíveis primários sólidos.

Figura 1 – Geração de eletricidade no mundo a partir de biocombustíveis e resíduos entre 1990-2019.



Fonte: Renewables - Fuels & Technologies – IEA (2022).

O efeito estufa mencionado acima tem contribuído para o aumento da temperatura global em um cenário cujos níveis de CO₂ no ar já se mostram maiores que em 650 000 anos, segundo NASA (2019) apud Yahya, Ng e Andiappan (2021). Em contrapartida, a suspensão de atividades econômicas através do lockdown advindo da pandemia global do coronavírus em 2020 promoveu menor emissão de poluentes e gases de efeito estufa, como resultado de menor demanda energética no período (SAJID, 2021).

Mesmo que queimadas com outros combustíveis, às vezes com preços não tão competitivos, as biomassas podem ser capazes de reduzir as cinzas e emissões de CO₂, NO_x e

SO_x, enquadrando créditos de emissões de carbono e enxofre, e por consequência, ajudando plantas industriais a alcançarem conformidade com as legislações ambientais (NIENOW; MCNAMARA; GILLESPIE, 2000).

O Protocolo de Kyoto, primeiro acordo internacional para o controle de emissão de gases do efeito estufa, assinado em 1997 no Japão (ZANFER, 2022), permitia a emissão e comercialização de créditos de carbono por meio de projetos em bioenergia e reflorestamento (LORA; ANDRADE, 2009). Segundo Sikkema *et al.* (2021), o Protocolo de Kyoto não contemplava resíduos agrícolas e florestais para o alcance das metas de emissões de gases de efeito estufa, enquanto no substituto do Protocolo desde 2015, o Acordo de Paris, as florestas já são reconhecidas oficialmente como contribuintes à conquista dessas metas, de 2021 a 2030. Além destes benefícios, a utilização de biomassas contribui para geração de empregos, em até 20 vezes mais que carvão e óleo, segundo Van Loo e Koppejan (2008).

York e McGree apud Sikkema *et al.* (2021) ratificam que países com maior geração de eletricidade através de fontes renováveis têm menores emissões de CO₂ per capita em relação aos países com menor uso.

Entretanto, um dos problemas no uso de biomassa na geração de eletricidade está na baixa densidade energética (grandes quantidades de biomassa para baixa energia agregada), que resulta em maiores custos e dificuldades de coleta e transporte. Como resultado, quantidades consideráveis são requeridas para manter a demanda térmica de plantas de energia, o que não é economicamente rentável. Uma das soluções possíveis é reduzir os custos de capital para fazer o transporte da biomassa factível e rentável, frente às dificuldades de compra, entrega, estocagem e custo (LIU *et al.* 2020).

Tomando-se como exemplo o país europeu suíço, tem-se que o custo do transporte da biomassa impacta mais no seu uso do que no desempenho energético em si (SCHNORF *et al.* 2021), daí justifica-se o uso de modelagem de otimização que leve em consideração custos logísticos, dentre outros. De acordo com Wang *et al.* (2020), a logística, junto à colheita, são elementos chave para o sucesso da indústria energética de biomassas e bioprodutos. Quando usada sustentavelmente, a energia da biomassa tem potencial de ser considerada neutra do ponto de vista do carbono, devido à compensação da emissão com a absorção durante o processo de fotossíntese e isso estimularia seu uso. Na prática, o uso de transporte rodoviário culmina por não anular esse balanço de emissões de carbono, para além da possibilidade da desproporção entre replantio de biomassas nativas e consumo.

A logística complexa associada ao transporte de madeira induz a implicações econômicas, energéticas e ambientais que podem representar uma barreira ao desenvolvimento

do setor devido à variação do poder calorífico e densidade inerentes à biomassa (SCHNORF *et al.* 2021), além de elevado índice de umidade (BRAND *et al.* 2021). Nesse aspecto, o uso alternativo de biomassas peletizadas tem lhes agregado valor na medida em que promove manuseio e estocagem mais seguros em virtude do menor teor de umidade, maior homogeneidade e densidade energética (BRAND *et al.* 2021).

Fibras residuais devem ser preferidas às frescas na produção de pellets (SIKKEMA *et al.* 2021). Porém elas têm maior tendência à geração de cinzas quando comparadas novamente, o que torna a produção de misturas de biomassas peletizadas uma boa alternativa para balancear propriedades como eficiência energética, tamanho das partículas e geração de cinzas (BRAND *et al.* 2021).

Enquanto fontes de energia renováveis, as biomassas selecionadas para fins energéticos devem preconizar alto rendimento (material seco obtido por unidade de terra plantada) e conteúdo energético, (SPEIGHT, 2022), para além de aspectos como facilidade de obtenção, baixo custo, e busca por neutralidade para o efeito estufa de gases, bem como o não prejuízo à disponibilidade de terra para alimentação (KUILA; MUKHOPADHYAY, 2020). Economicamente, a procura por mais de uma fonte de biomassa na indústria de energia busca tornar o processo mais autossuficiente e confiável. De acordo com Yoshioka *et al.* (2005) apud Nunes *et al.* (2020) problemas relacionados à disponibilidade sazonal podem ter seus custos reduzidos em 15 a 20% com o uso de múltiplas biomassas.

Nesse sentido, vem sendo aplicado o uso de modelagem na cadeia produtiva de múltiplas biomassas de modo a subsidiar decisões de nível estratégico, tático e operacional, de acordo com a abrangência apresentada.

Sendo assim, o presente trabalho propõe a aplicação de diferentes biomassas no processo de combustão para produção de energia, de forma a minimizar os custos de uma usina, através do estudo multidisciplinar da cadeia produtiva envolvida e modelagem matemática. As biomassas em questão são os cachos e fibras não aproveitados de dendê, o capim-elefante na sua totalidade bem como resíduos florestais disponíveis de madeireiras licenciadas. São levadas em consideração na logística de produção as características físico-químicas das biomassas, a alternativa de pré-tratamentos destas, a localização dos fornecedores, a sazonalidade de colheita, as condições de transporte e armazenamento, viabilizando confiabilidade de suprimento, com vistas a fornecer a melhor configuração estratégica de queima na caldeira da usina, do ponto de vista econômico, energético e ambiental.

Logo, elenca-se como objetivo geral desenvolver um modelo matemático que minimize os custos variáveis de geração de energia elétrica usando diversas fontes de biomassa e variáveis exógenas. Para isso, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

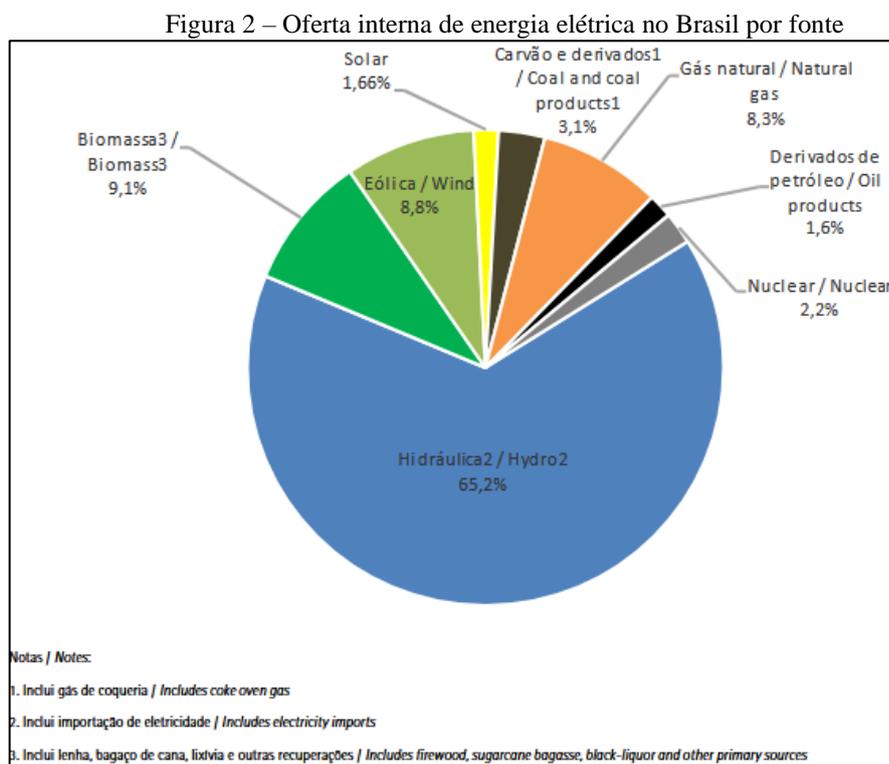
- Obter a caracterização físico-química das biomassas que propicie comparação entre os combustíveis;
- Estimar demanda térmica da caldeira;
- Avaliar pré-tratamentos e seus custos;
- Ponderar na logística associada, a infraestrutura e armazenamentos, considerando sua capacidade;
- Considerar a sazonalidade inerente ao processo;
- Minimizar o impacto da qualidade das biomassas na corrosão da caldeira;
- Investigar fluxo de processo;
- Desenvolver o modelo matemático e apontar solução.

Este trabalho mostra-se importante pela consideração de aspectos variados da usina, reforçando a otimização como ferramenta de melhoria social, através da abordagem econômica e ambiental.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Define-se biomassa como massa de autótrofos ou qualquer planta colhida com fins de conversão energética (fitomassa), ou ainda resíduos animais e humanos conversíveis a combustíveis sólidos ou gasosos (SMIL, 1983). Seus principais constituintes são celulose, hemicelulose e lignina, podendo conter lipídios, proteínas, açúcares simples, amido, compostos inorgânicos e umidade (MANDØ, 2013).

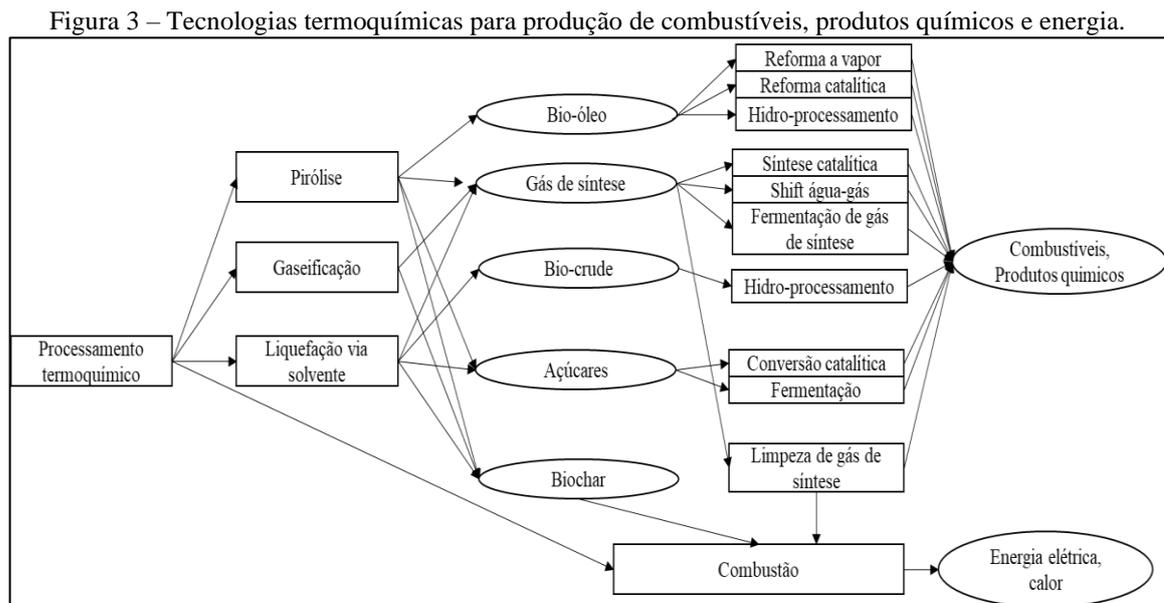
Biomassas como madeira, capim, resíduos da agricultura, rejeitos animais e humanos, algas, entre outros, são fontes naturalmente renováveis que são produzidas sustentavelmente em grandes quantidades em muitas áreas do mundo (LIU *et al.* 2020), com destaque para o agronegócio aqui no Brasil, que produz cerca de 330 megatoneladas de biomassa agrícola (BRAND *et al.* 2021). Segundo o Balanço Energético Nacional de 2021 - ano base de 2020 (EPE, 2021), a oferta interna de energia no Brasil apresenta-se como predominantemente renovável (84,8%), sendo 65,2% de fonte hídrica e cerca de 9,1% de biomassas (Figura 2). Em virtude disso, há ainda potencial de aproveitamento de biomassas como fontes de energia, principalmente num cenário que prevê um aumento de cerca de 13% do consumo de energia per capita de uma população estimada em 220 milhões de habitantes no final de 2026 (EPE, 2017 apud PAES *et al.* 2022).



Fonte: EPE (2021).

Dentre as possibilidades de rotas de conversão termoquímica das biomassas, são listadas a gaseificação, a pirólise, a combustão e a liquefação líquida. As condições de processo e os produtos finais almejados permitem a seleção da tecnologia adequada, conforme ilustra a Figura 3. No que concerne à geração de energia elétrica, utiliza-se combustão, a mais antiga e direta das vias citadas, através da conversão da energia química em calor para transformação em outro tipo de energia (BROWN, 2019). Este tipo de conversão mostra-se confiável e barato e é aplicável tanto em pequena escala (1-10 kW), quanto para plantas de larga escala (maiores que 5 MW) (KUMAR *et al.* 2020).

Devido ao maior teor de umidade das biomassas, a combustão destas normalmente produz fluxos de massa de gases de combustão mais altos em comparação aos combustíveis fósseis, resultando em menos radiação de chama e temperaturas de combustão mais baixas, bem como demanda uma maior superfície de transferência de calor (WIDELL, 2013).



Fonte: Adaptado de Brown (2019).

2.1 COMBUSTÃO

As reações de combustão que ocorrem em caldeiras, gerando vapor industrial para autossuficiência e/ou transformação em energia elétrica, são reações químicas exotérmicas com temperaturas de cerca de 800-1600°C (VAN LOO; KOOPEJAN, 2008), entre combustíveis e oxigênio. Formam principalmente dióxido de carbono e vapor de água, conforme mostra a expressão da reação global de queima da biomassa (Equação 1), dada por Mandø (2013). Diz-se que a combustão é completa quando todos os elementos combustíveis são totalmente

convertidos em CO₂, H₂O e SO₂, o que pressupõe ar estequiométrico, ou mesmo excesso de ar. Do contrário, a combustão é caracterizada como incompleta.

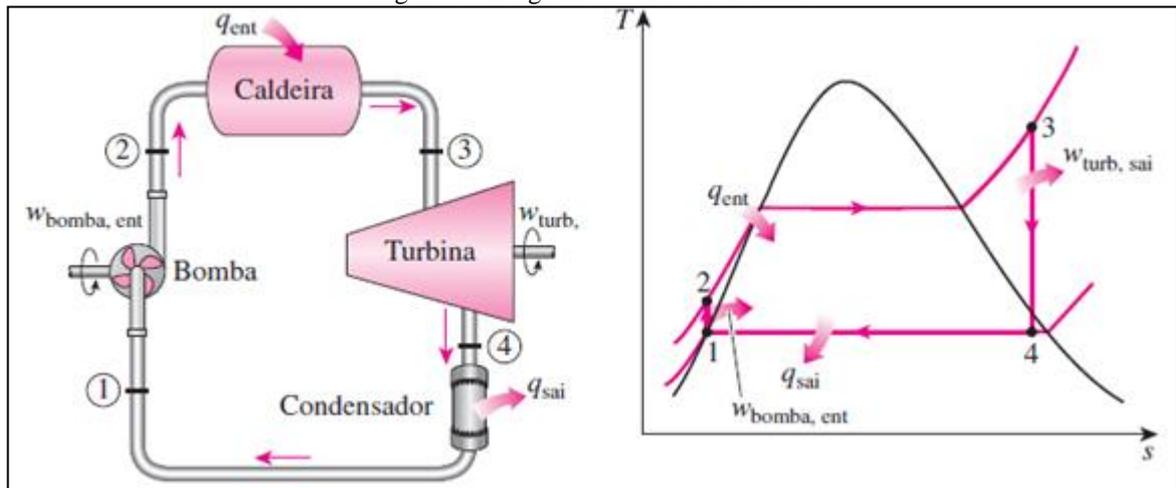


Ainda que possa ser sintetizada em uma reação genérica, a combustão de biomassas envolve mecanismos de reação mais complexos, cujas etapas podem ser inúmeras, necessitando de modelagem apropriada (MANDØ, 2013). A combustão de biomassas abrange simultaneamente reações químicas, fluxo multifásico de fluidos e transferência de massa e calor (SILVA *et al.*, 2021). As taxas de reação das reações elementares reversíveis envolvidas dependem da mistura dos reagentes disponíveis na zona de queima, do tempo de residência, bem como da constante de taxa de reação e da temperatura (VAN LOO; KOOPEJAN, 2008). De acordo com Thengane (2021) e Rendeiro (2008), os estágios da combustão da biomassa sólida perpassam por: aquecimento e secagem, pirólise ou volatilização (liberação dos gases inflamáveis), seguida da combustão dos gases formados na pirólise, e pós-combustão, sendo o resultado na forma de carvão, cinzas ou mesmo particulados.

O processo de combustão de biomassas dá-se em caldeiras que podem ser do tipo grelha, de suspensão ou leito fluidizado, diferindo entre si pela velocidade das partículas de combustível, e por fenômenos como incrustação, emissões, etc. (BROWN, 2019). Quanto à geração de calor fornecida para operação de plantas de geração de energia elétrica, o ciclo mais comumente utilizado é o de Rankine.

Conforme ilustra o diagrama (Figura 4), no ciclo de Rankine o fluido (água) é continuamente recirculado, operando a turbina e a bomba isentropicamente, e o condensador, isobaricamente, enquanto o fluido na caldeira é aquecido também à pressão constante (SANDLER, 2016). Ou melhor, a água entra na bomba como líquido saturado (estado 1) até à pressão de operação da caldeira, passando para a caldeira como líquido comprimido (estado 2). Na caldeira, a água trocará calor com os gases da combustão, inicialmente aquecendo-se, e tornando-se líquido saturado no economizador. Em seguida, torna-se vapor no evaporador, e por fim, é aquecida, saindo na forma de vapor superaquecido (estado 3), após passagem no superaquecedor. Este vapor superaquecido é o responsável por gerar trabalho na turbina, acionando o gerador elétrico, enquanto é condensado ao estado 4 (condensador), na forma de uma mistura saturada de líquido e vapor, após queda de pressão e temperatura. E assim o líquido saturado completa o ciclo, ao ser reciclado para bomba novamente (ÇENGEL; BOLES, 2013).

Figura 4 – Diagrama do ciclo de Rankine



Fonte: Çengel e Boles (2013).

2.1.1 Parâmetros de Combustão

A composição química e as propriedades de combustão de cada biomassa variam conforme a espécie e as condições sazonais de cultivo, afetando diretamente o rendimento da combustão. Alguns parâmetros influenciam na eficiência do processo e devem ser considerados durante a otimização. Os principais são razão ar/combustível, expressa em massa na base seca, e poder calorífico. A relação estequiométrica de ar para combustível nas biomassas situa-se entre 4-7, enquanto no carvão, por exemplo, varia de 14-17. Isso se deve ao elevado conteúdo de oxigênio das biomassas, segundo Mandø (2013).

Quanto ao poder calorífico, há uma diferenciação entre superior (PCS) e inferior (PCI): no primeiro, o módulo da entalpia de combustão contempla a água formada durante a combustão na fase líquida, sendo necessária sua total condensação; enquanto no segundo, a água formada permanece na fase vapor, sendo o calor de condensação do vapor de água deduzido do PCS (MORAN *et al.*, 2013; ZHANG; JI; QIAN, 2021). Define-se PCS como a quantidade de calor liberada durante a combustão de um grama de combustível para produzir CO_2 e H_2O , sendo obtida experimentalmente através de um calorímetro, em condições padrão de 101,33 kPa e 25°C (FASSINO *et al.* 2011). No caso de caldeiras de plantas energéticas, a eficiência geralmente é computada em termos de PCI, a depender do país (BROWN, 2019).

Rajput, Jadhav e Thorat (2020) observam que quanto maior o conteúdo de cinzas conferidas pela biomassa, menor o poder calorífico. Ademais, as cinzas de pellets de misturas de biomassas, por exemplo, podem causar problemas de incrustação e depósitos nos queimadores, tornando-se um fator determinante na aceitabilidade da biomassa como

combustível. Para melhorar estes aspectos, pode ser recomendado mais uma vez a combinação de diferentes biomassas e/ou aditivos.

Dentre os constituintes da biomassa, a celulose tem seu poder calorífico (17,3 MJ/kg) menor que o de lignina (26,7 MJ/kg), o que é atribuído a seu maior grau de oxidação apresentado, segundo Brown (2019). Há estudos que correlacionam o poder calorífico com a composição da biomassa através da análise elementar ou imediata. Gaur e Reed (1995) apud Brown (2019) utilizam-se da composição elementar para estimar o PCS, sugerindo o uso da Equação 2, enquanto Milne apud Fassinou *et al.* (2011) apresentam a Equação 3. Nelas, “C”, “H”, “S”, “O”, “N” e “Cinzas” são as porcentagens na base seca de carbono, hidrogênio, enxofre, oxigênio, nitrogênio e de cinzas na biomassa, respectivamente. Existem outras correlações do tipo, na literatura, para determinação de PCS de gorduras animais, óleos vegetais, e seus derivados. De acordo com Fassinou *et al.* (2011), as melhores correlações quanto à precisão são: Channiwala e Parikh, Boie, Boie e Vondracek, Vondracek, Fassinou *et al.*, IGT, Milne, Demirbas e Dulong.

Para o PCI, Van Loo e Koopejan (2008) elaboraram uma correlação com o PCS através da Equação 4, sendo “w” a umidade do combustível (% na base úmida) e “h” a concentração de hidrogênio (% na base seca).

$$\text{PCS (MJ/kg)} = 0,3491C + 1,1783H + 0,1005S - 0,1034O - 0,0151N - 0,0211\text{Cinzas (MJ/kg seca)} \quad (2)$$

$$\text{PCS (MJ/kg)} = 0,341C + 1,322H + 0,0686S - 0,12O - 0,12N - 0,0153\text{Cinzas (MJ/kg seca)} \quad (3)$$

$$\text{PCI (MJ/kg)} = \text{PCS} \left(1 - \frac{w}{100}\right) - 2,444 \frac{w}{100} - 2,444 \frac{h}{100} - 8,936 \left(1 - \frac{w}{100}\right) \text{ (MJ/kg úmida)} \quad (4)$$

Um dos fatores que conferem variabilidade ao poder calorífico, além do tipo de biomassa, é a umidade desta, uma vez que quanto maior a umidade, maior a quantidade de calor necessária para evaporá-la. A umidade pode representar a massa de água na biomassa por unidade de massa seca ou a massa de água em relação à massa total. De acordo com Mandø (2013) varia ainda com a parte da planta ou estação climática.

A variação da umidade com a sazonalidade pode ser avaliada, sendo cogitada a operação de secagem, de modo a atender um teor máximo de 52% na alimentação da caldeira, de acordo com o Memorial Descritivo da caldeira. Segundo Annevelink *et al.* (2017), é aceitável um percentual entre 40 e 50% de teor de umidade na biomassa. Percentuais altos de umidade além de encarecerem o transporte, pela compra indireta de água, podem vir a causar obstrução da biomassa em linhas, e acarretar perda de eficiência do processo de combustão, com o aumento

do gasto energético para vaporização do líquido presente na biomassa fresca. Segundo Demirbas (2005), Van Loo, Koopejan (2008) e Mandø (2013), altos valores de umidade e cinzas causam também problemas de ignição, aumentam o tempo de residência necessário, reduzem a temperatura adiabática da chama, dificultando a estabilidade dela. Por isso, faz-se necessário enquadrar o teor de umidade previamente. A eficiência da caldeira em função do teor de umidade pode ser observada, através de um gráfico de correlação. Segundo Van Loo e Koopejan (2008), a secagem natural pode ser aliada na redução de umidade de 50 para 30%, enquanto Annevelink *et al.* (2017) cita atingir 20 a 30%. Já Alves, Ushima e Peixoto (2020) relatam remoção de umidade a teores em torno de 50% b.u. (base úmida) por meio de prensagem mecânica.

No sentido de reduzir a absorção de umidade por parte da biomassa, pode-se densificá-la, por meio de pelletização ou briquetagem, logo após moagem, para então ser estocada. A densificação torna possível a melhoria da qualidade da biomassa através do aumento da densidade energética, estabilidade e durabilidade, bem como redução do custo com manuseio, estocagem e transporte (SAIDUR *et al.* 2011). Pellets são cilindros com diâmetros típicos entre 6 e 10 mm, geralmente utilizados em alimentações automáticas de caldeiras, devido à boa fluidez, e características uniformes como umidade, tamanho e composição química, enquanto os briquetes, são alimentados manualmente e possuem dimensões de 30 a 100 mm de diâmetro (VAN LOO; KOOPEJAN, 2008). O modelo deve ajustar a composição de carga da caldeira de acordo com a disponibilidade de biomassa, seja ela seca, densificada ou *in natura*.

Já a estocagem é uma estratégia frente às flutuações sazonais de fornecimento de biomassas. Dessa forma, o modelo deve levar em consideração um estoque mínimo que garanta alimentação da caldeira em um período determinado, e um tempo máximo de armazenamento, que contemple tanto a redução de umidade, quanto a prevenção de perda de material por deterioração biológica, de biomassas hidrofílicas, ou mesmo oxidação química (SILVA, 2009 apud SILVA, 2012; REZA *et al.* 2013). Conforme Van Loo e Koopejan (2008), esta última pode levar à geração de calor e causar autoignição do combustível. Para Garstang *et al.* (2002), Jirjis (2005) e Brand *et al.* (2014) apud Campos, Rosa e Borga (2017), a estocagem por 4 meses da biomassa de *Pinus sp.* e *Eucalyptus sp.* demonstrou ser o ideal, havendo redução do teor de umidade, se as condições de estocagem foram adequadas. Já Van Loo e Koopejan (2008) relatam o benefício de redução de umidade 59 para 44%, com uma estocagem de 6 meses. Segundo os mesmos autores, a perda equivalente à estocagem externa seria em torno de 12%.

Outro aspecto a ser considerado é a corrosão conferida à caldeira pela utilização inadequada de biomassas, diminuindo a vida útil do equipamento e a eficiência do processo, ao

longo do tempo. Isso pode elevar os custos com paradas não programadas e o risco de acidentes e vazamentos, impactando ambientalmente pela perda de contenção para além da demanda de novos recursos naturais, com a substituição das partes danificadas.

A corrosão decorrente do fluxo de gases de combustão pode suceder em regiões de alta temperatura (superaquecedores), por formação de deposição de cinzas, e em regiões de baixa temperatura (economizadores e aquecedores de ar), associada à formação de depósitos ácidos (CAILLAT; VAKKILAINEN, 2013). A corrosão promove oxidação de materiais sob condições aceleradas através da reação dos metais e suas ligas com sais fundidos/liquefeitos (KUMAR; KUMAR; HANDA, 2018), comprometendo regiões como o superaquecedor, cujo custo é elevado. Dermibas (2005) atribui a corrosão em pré-aquecedores de ar à combinação de compostos higroscópicos com cloreto de ferro e variações de temperatura devido à operação intermitente. Conforme Caillat e Vakkilainen (2013), o resfriamento dos gases de combustão a partir de certa temperatura promove condensação de espécies que estavam na forma gasosa, formando condensado ácido, como é o caso do SO_3 e do HCl . Tratando-se de cloretos especificamente, a corrosão acontece pela reação dos Cl_2 e HCl gasosos com o ferro das tubulações, formando cloreto ferroso, que reage com o oxigênio, dando óxido ferroso que libera cloreto e reinicia o ciclo.

A corrosão dita a quente, com possibilidade de incrustação, é atribuída à presença de compostos inorgânicos em sua composição (SAIDUR *et al.* 2011). São principalmente compostos alcalinos, contendo K e Na, que formam silicatos alcalinos, fundindo em temperaturas baixas (700°C de acordo com Saidur *et al.* (2011) ou 500–600°C para Caillat e Vakkilainen (2013)), afinando superfícies. Uma vez que biomassas contêm maior variedade de materiais inorgânicos em comparação ao carvão mineral, problemas de incrustação, corrosão e emissões poluentes precisam ser explorados segundo Caillat e Vakkilainen (2013). Devido ao alto ponto de fusão dos inorgânicos, incluindo os metais pesados, eles permanecem nas cinzas restantes da combustão ou co-queima (REZA *et al.* 2013). Os componentes das cinzas frequentemente sofrem várias mudanças de estado com as temperaturas elevadas, tornando-as depósitos corrosivos ou de difícil remoção devido ao fato de a fração fundida ser frequentemente mais incrustante do que a cinza sólida (CAILLAT; VAKKILAINEN, 2013). Os mesmos autores salientam que tais depósitos não são estáticos, dependendo das condições de processo, do tempo e da seção da caldeira.

Segundo Miltner, Beckmann e Friedl (2006), há risco de corrosão quando a razão de S:Cl na composição da biomassa é menor que 4. As biomassas geralmente têm essa proporção em torno de 2 ou menos. Em compensação, óleo combustível e carvão apresentam valores entre

5 a 300. De acordo com Alves, Ushima e Peixoto (2020), o enxofre pode desempenhar papel positivo nas biomassas cloradas, evitando a corrosão a quente dos superaquecedores das caldeiras, por ser passível de formar uma camada inerte nos internos. Isso porque o dióxido de enxofre (SO₂) formado na combustão pode reagir com cloreto de potássio (KCl) já depositado nas superfícies, gerando sulfato de potássio (K₂SO₄), cujo ponto de fusão é maior que o do próprio KCl (equação 5). Já o HCl também formado nessa mesma reação de sulfatação acompanha os gases de combustão e pode corroer partes dos economizadores, pré-aquecedores de ar e sistemas de limpeza de gás da caldeira.



Ainda de acordo com Alves, Ushima e Peixoto (2020), o potássio se manifesta principalmente nos vapores de KCl e KOH e de sais como K₂SO₄ e K₃PO₄, enquanto o cloro das biomassas, sob altas temperaturas pode vir a formar compostos organoclorados, oxidando a HCl durante o processo de combustão. Isso contribui para corrosão na caldeira, cujas temperaturas altas atuam para incentivar ainda mais o processo. Ácidos como H₂SO₄, H₂SO₃, HCl, HBr e HNO₃ podem existir como vapores ácidos nos gases da chaminé, vindo a corroer superfícies quando temperaturas mais baixas que os pontos de orvalho desses ácidos são atingidas (SILVA, 2021).

As cinzas compreendem uma grande variedade de inorgânicos, principalmente óxidos estáveis como SiO₂, CaO, K₂O, P₂O₅, Al₂O₃, MgO, Fe₂O₃, Na₂O e TiO₂. No geral, óxidos ácidos tendem a elevar o ponto de fusão de cinzas, enquanto os alcalinos, presentes principalmente em biomassas herbáceas, reduzem esta temperatura (LACHMAN *et al.* 2021). As cinzas não contribuem para a produção de energia e muitas vezes precisam ser descartadas (MEESTERS *et al.* 2018).

Durante a operação da caldeira essas cinzas tendem a fundir geralmente em temperaturas altas, solidificando novamente quando a caldeira resfria, o que provoca os depósitos citados que obstruem a passagem dos gases ou ar com o tempo. Conforme esses depósitos acumulam e se tornam pesados demais para manter adesão aos tubos e refratários, eles tendem a se desprender, danificando partes da caldeira. A presença de enxofre (e vanádio em outros combustíveis no geral) pode ser preocupante devido ao grau corrosivo conferido pelas cinzas com baixo ponto de fusão (BOZZUTO, 2021).

Dentre os fenômenos possíveis no depósito de cinzas podem ocorrer o *fouling* e o *slagging*. Segundo Reza *et al.* (2013), o *slagging* tem relação com o depósito de cinzas (total

ou parcialmente fundidas) nas seções expostas a calor radiante tais quais paredes de fornos/caldeiras ou superfícies de convecção. As causas atribuídas ao *slagging* que ocorre na combustão seriam a precipitação de cristais de metais alcalinos da biomassa e a fusão das cinzas durante a combustão (ZHU, 2014). Já o *fouling* é referido como o depósito nas superfícies de convecção como superaquecedores e reaquecedores. Caso não sejam prevenidos, *slagging* e *fouling* podem ser minimizados por temperaturas de combustão mais baixas (SPEIGHT, 2022).

Zhu *et al.* (2014) relatam a necessidade de usinas na China pararem suas produções a cada 20 a 30 dias por motivos de limpeza do *slagging* formado no superaquecedor de temperatura intermediária da caldeira. Dessa forma, é pertinente evitar estes fenômenos, no sentido de prolongar a vida útil da caldeira, pois podem afetar a operação do equipamento, aumentando o custo, as emissões e as temperaturas de trabalho (devido à redução de eficiência e taxas de transferência de calor) (SAIDUR, 2011). Uma vez que a composição da biomassa pode não ser constante, em termos de homogeneidade e qualidade, recomenda-se prover condições para que o modelo minimize formações corrosivas, como parâmetro de qualidade ao processo.

De maneira geral, cada fabricante adota uma forma de prevenção à corrosão e incrustações. Na literatura, são usados inibidores de corrosão, seleção de ligas específicas (adição de cromo, níquel, molibdênio de acordo com Caillat e Vakkilainen (2013)), proteção catódica, revestimentos e otimização do projeto (KUMAR; KUMAR; HANDA, 2018). Através do processo de lixiviação (remoção de elementos solúveis em água não desejáveis através de lavagem com água), cloro e outros elementos podem ter seus teores reduzidos. Segundo Reza *et al.* (2013), a lixiviação com água quente é capaz de remover 50-90% de inorgânicos como Ca, S, P, Mg e K na biomassa. A própria chuva promove lixiviação nas semanas anteriores à utilização ou dias após colheita, porém sua utilização dependeria do clima e acresceria o perigo de degradação, com aumento da umidade (VAN LOO, KOOPEJAN, 2008).

Mais presentes nos resíduos agrícolas e gramíneas como capim-elefante do que nas biomassas florestais, estes compostos permanecem nas cinzas devido ao alto ponto de fusão, reduzindo a eficiência da caldeira e aumentando o desgaste dos internos dos equipamentos, de maneira geral. Segundo Mandø (2013), é esperado haver incrustação significativa com biomassas do tipo gramíneas devido ao seu elevado teor de cloro e de alcalinos.

Segundo Van Loo e Koopejan (2008), a concentração de cloro na biomassa depende do tipo e da quantidade do fertilizante aplicado. A aplicação de fertilizantes sem cloro reduz bastante o teor de cloro nas biomassas, sem incrementar K e S. Uma alternativa à minimização do efeito do cloro, é a captura dos compostos alcalinos, para elevar o ponto de fusão das cinzas

formadas na combustão, através da aplicação de aditivos como bauxita, caulinita, calcário e óxido de magnésio (SAIDUR *et al.* 2011). Para a redução de cloro nas cinzas depositadas de combustão de madeiras e palhas, Jensen *et al.* (2005) apud Mandø (2013) aplicaram fósforo e cálcio na razão molar ótima de 0,8-0,9.

2.2 TIPOS DE BIOMASSAS ENVOLVIDAS NA CADEIA PRODUTIVA

Dentro do domínio de estudo, foram adotadas as biomassas residuais de dendê, resíduos florestais e capim-elefante como carga de alimentação da caldeira, servindo de matéria-prima para a combustão. A escolha deu-se de acordo com aspectos como disponibilidade da usina, custo, rendimentos e conteúdo energético.

2.2.1 Resíduos de dendê

O dendê (*Elaeis guineensis*) é o fruto do dendezeiro que é utilizado para a produção de óleo de palma, também conhecido como óleo de dendê, e biodiesel. Na região Norte, o dendezeiro encontra condições climáticas apropriadas para seu cultivo. A geração de resíduos associados ao processamento faz com que seja possível a aplicabilidade destes na fertilização de safras ou produção de calor e eletricidade em processos industriais. Podem ser aproveitados para este fim os cachos vazios, as fibras da polpa e as cascas dos frutos (MÜLLER, 1980; QUEIROZ; FRANÇA; PONTE, 2012), sendo o caso aqui descrito de cachos vazios e fibras de palma (Figura 5). Segundo Yahya, Ng e Andiappan (2021), este resíduo é um dos mais inexplorados, aplicando-se como matéria-prima para a cadeia de abastecimento de biomassas.

Figura 5 – Resíduos de dendê de Roraima na parte superior da foto com possíveis apresentações dos resíduos na parte inferior: cachos vazios dos frutos, cascas e fibras do dendê da esquerda para direita.



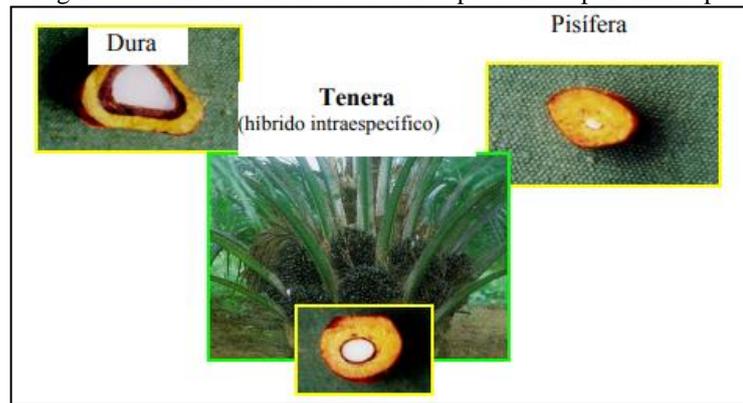
Fonte: da própria usina e Ordoñez-Frías *et al.* (2020).

Costa (2018) afirma a viabilidade de uso de resíduos de dendê (cachos) na combustão direta por sua composição química e propriedades físicas e energéticas, entre outros resíduos para uso como biomassa.

De cultivo perene, o dendezeiro é favorecido em solos profundos sem compactação, adaptando bem àqueles ácidos (pH entre 4 e 6), em temperaturas moderadas, com radiação solar e boa distribuição de chuvas (precipitação pluviométrica acima de 2000 mm/ano). Adapta-se à declividade máxima de 5% e nível de até 600 m, e vive entre 20 e 30 anos, dando frutos a partir dos 3,5 anos de idade (KUSS *et al.* 2015).

Considerada a oleaginosa de maior produtividade mundial (>25 t/ha/ano de cachos), esta palma tem uma densidade de plantio de 143 plantas/ha, o que demanda cerca de 200 sementes germinadas/ha. No Brasil, essas sementes, geralmente híbridas do tipo tenera, entre genitores do tipo dura e pisífera (Figura 6), são obtidas principalmente junto à Embrapa – Escritório de Negócios do Amazonas ou ainda de empresas como a ASD/Costa Rica (CORDEIRO; ALVES; MACIEL, 2009). Com relação aos resíduos gerados, estima-se que de 100 t de cachos frescos de dendê são gerados 5 t de cascas, 20-22 t de cachos vazios e 14 t de fibras de dendê (ORDOÑEZ-FRÍAS *et al.* 2020).

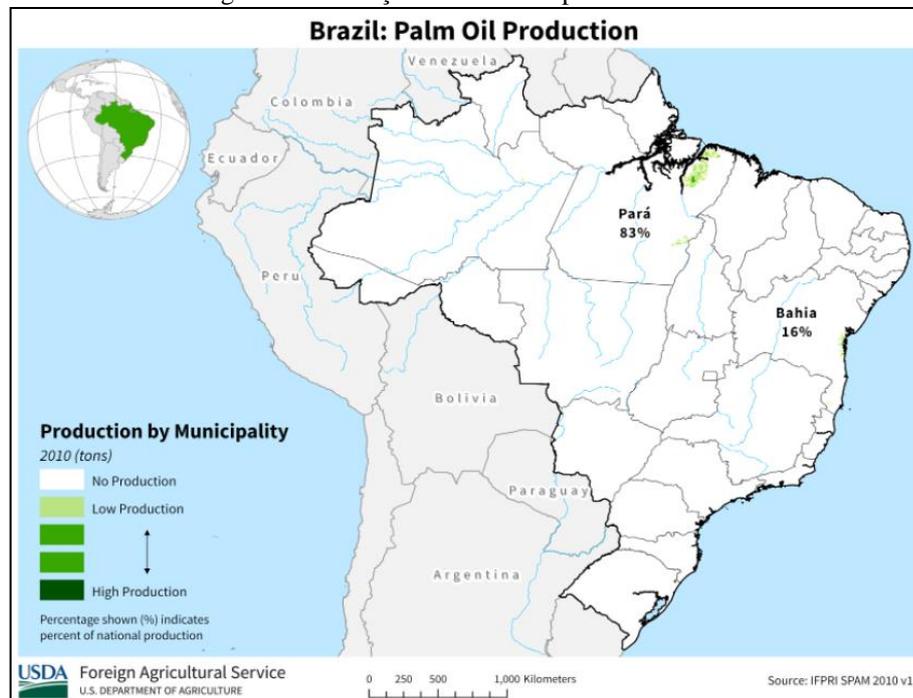
Figura 6 – Sementes híbridas de dendê produzidas pela Embrapa



Fonte: Cordeiro Alves Maciel (2009).

O Brasil atualmente representa o nono produtor mundial da palma de dendê, segundo ranking do Departamento de Agricultura dos EUA (PALM, 2021) – Figura 7, principalmente com os estados do Pará e da Bahia, sendo os maiores produtores mundiais os países asiáticos Indonésia, Malásia e Tailândia. Apesar do potencial, a Figura 8 ilustra o grau recente desta exploração no estado de Roraima.

Figura 7 – Produção brasileira de palma de dendê.



Fonte: PALM OIL (2021).

Figura 8 – Mapeamento da plantação no estado de Roraima.



Fonte: PALM OI (2021).

Nesse sentido, o Zoneamento Agroecológico do Dendê para as Áreas Desmatadas da Amazônia Legal - ZAE-Dendê, de 2010, seria capaz de fornecer subsídios para o desenvolvimento do estado frente a seu potencial agroecológico na produção sustentável do dendezeiro, reflorestando áreas deterioradas e, bem como para a reestruturação da matriz energética brasileira. Conforme do Prado e Block (2012), os principais fatores que inibiriam o crescimento do setor dendezeiro seriam a falta de experiência no cultivo e infraestrutura insuficiente para energia e comunicações nas regiões de processamento, atrelada às dificuldades econômicas e sociais intrínsecas às proximidades nas quais o produto precisa ser processado, em virtude de sua perecibilidade.

Os custos envolvidos nas diferentes fases de cultura (pré-viveiro, viveiro, implantação) envolvem aqueles decorrentes da irrigação, aplicação de fertilizantes (ureia, superfosfato triplo, cloreto de potássio, sulfato de magnésio, bórax, entre outros, e eventuais agentes de controle fitossanitário), além de mão de obra para coveamento (abertura de covas de plantio), transporte, distribuição dos sacos e o plantio em si (CORDEIRO; ALVES; MACIEL, 2009).

Para a fase de manutenção, Müller (1980) destaca a execução de replantio, coroamento, rebaixo da cobertura viva, adubação, controle sanitário e preparação para colheita, indicando para o período ideal de plantio os meses mais chuvosos, que na região amazônica compreende o período de janeiro a maio.

2.2.2 Capim-elefante

O capim-elefante (*Pennisetum purpureum*) ilustrado na Figura 9 é uma gramínea que tem mostrado bastante potencial energético, seja pela qualidade, seja pela disponibilidade, além do rápido crescimento. Para este fim, precisa ter seu manejo direcionado para maiores teores de fibras (>30%), lignina, relação C:N, matéria seca e conseqüentemente, poder calorífico, em detrimento do percentual de proteína, quando se destina à alimentação animal (ALVES *et al.* 2018). Segundo Dorez *et al.* (2014) apud Rocha *et al.* (2017), do ponto de vista da combustão, merece atenção também a razão celulose/lignina presente na biomassa. Valores altos tenderiam à degradação da celulose e queima incompleta das fibras. Esta última, junto com o teor de ligninas regularia a energia de ativação da reação.

Figura 9 – Plantação de capim-elefante



Fonte: Nascimento (2016).

Nesse sentido, recomenda-se a seleção adequada do capim-elefante a ser plantado. Existem muitas variantes de genótipos desta planta em bancos de culturas. O tipo de capim-elefante Cameroon, por exemplo, apresenta aptidão para fins energéticos via combustão direta, com um poder calorífico de 18,16 MJ/kg. O valor é similar ao do tipo Napier (18,11 MJ/kg) porém o primeiro fornece maior produtividade: cerca de 24,13 Mg/ha (t/ha) de biomassa seca, ao invés dos 21,05 Mg/ha do tipo Napier (ROCHA *et al.* 2017; QUESADA, 2005 apud ALVES *et al.* 2018).

O ciclo produtivo do capim-elefante leva 12-16 meses e pode permitir dois cortes por ano, gerando grandes volumes de matéria seca. Diferentemente de Rocha *et al.* (2017) e Quesada (2005) apud Alves *et al.* (2018), Pedroso (2018) aponta uma faixa de poder calorífico em torno de 4170 a 4298 kcal/kg (17,45 a 17,98 MJ/kg). Quanto ao tempo de corte, quando inferior ao sugerido, fornece um corte menos lignificado, e, portanto, menor potencial

bioenergético (SILVA, 2012). Sua capacidade de produção gira em torno de 40 toneladas de matéria seca por hectare ao ano, segundo Pedroso (2018).

Conforme Alves *et al.* (2018), o plantio é feito no início da época chuvosa, não tolerando bem a seca, solos mal drenados ou inundados, bem como pH baixo e alta concentração de alumínio. De origem tropical, a espécie adapta-se bem à umidade e temperatura alta (25 a 40°C) (SILVA, 2012; ALVES *et al.* 2018).

Mostra competitividade com a cana-de-açúcar como fonte renovável, para além da produção de açúcar, por maior conteúdo energético por biomassa seca (ALVES *et al.* 2018), tolerando cortes mais frequentes do que a cana-de-açúcar, com seis meses como o período ótimo (ALEXANDER *et al.* 1981 apud SMIL, 1983).

Ao longo da cadeia produtiva podem estar embutidos custos com mão-de-obra externa, controle de pragas, correção de solo e adubagem, melhoramento genético, entre outros.

2.2.3 Resíduos florestais

Nessa categoria encontram-se os resíduos do manejo florestal ou práticas silviculturais; os resíduos da colheita florestal e os resíduos da transformação da madeira em manufaturados (BRANDAO *et al.* 2021). Os resíduos florestais, nesta dissertação, foram considerados o cavaco de madeira e o pó de serragem. Além de variabilidade considerável, este tipo de biomassa pode estar contaminado com solo, plástico ou mesmo produtos químicos (CAILLAT; VAKKILAINEN, 2013).

O aproveitamento de resíduos das madeireiras no entorno da usina evita o descarte inapropriado destes (geração de metano na decomposição) e até mesmo incêndio, complementando a matriz energética da caldeira, de acordo com a flutuação de disponibilidade das outras biomassas para a otimização requerida.

Segundo Ferreti (2021) podem ser utilizadas como combustível para a produção de energia tanto as cascas quanto as aparas de madeira, sendo determinante a estratégia e o tempo de armazenamento prévio. Já Smil (1983) relata o uso de copas de árvores, galhos, além de resíduos de moagem. São desejadas madeiras com maior teor de lignina e com abundância de extrativos (resinas, ceras) devido ao maior poder calorífico conferido: celulose e hemicelulose contêm apenas cerca de 17,5 MJ/kg, enquanto a lignina tem cerca de 26,5 MJ/kg, e extrativos podem chegar a 35 MJ/kg, na base seca (SHAFIZADEH; DEGROOT, 1976 apud SMIL, 1983). Na prática, os valores de umidade vão de 22 a 67%, tendo a madeira, vantagem de baixo teor de cinzas e enxofre (SMIL, 1983).

Ressalta-se o controle rigoroso de origem dos resíduos, para que não haja contribuição com o desflorestamento.

2.3 PROGRAMAÇÃO LINEAR

Surgida na Inglaterra da década de 50 do século passado, dentro do contexto militar da Segunda Guerra Mundial, quando os computadores ainda eram restritos, a programação linear advinda do ramo da Pesquisa Operacional, se propunha a resolver problemas de natureza logística, tática e estratégica, realocando melhor recursos militares (MATOUŠEK; GÄRTNER, 2007; BELFIORE; FÁVERO, 2013). De acordo com Matoušek e Gärtner (2007), as pessoas viram-se surpreendidas pela economia de cerca de 20% nos custos quando da implementação do método, em substituição à experiência e intuição costumeiras.

A aplicação de modelagem na cadeia produtiva de biomassas envolvendo suprimento energético vem sendo bastante explorada na literatura e pode subsidiar decisões de nível estratégico, tático e operacional. A diferença dá-se pela abrangência dos níveis de decisão: de caráter mais em longo prazo (anual por ex.), decisões estratégicas incluem design da cadeia em si, dos investimentos, seleção dos fornecedores e alocações das instalações, etc., enquanto decisões em médio prazo envolvendo rotas de transporte, inventários sazonais são decisões táticas. Os problemas operacionais precisam de ajustes mais frequentes e compreendem o planejamento de transporte e demandas em curto prazo (CAO; ZHANG; ZHOU, 2021).

A abordagem escolhida pelos pesquisadores na otimização varia de acordo com o objetivo do modelo, as características e localização da(s) planta(s) e o rol dos parâmetros disponíveis para a criação do modelo. Segundo Wang *et al.* (2020), um dos desafios da otimização da cadeia de suprimentos de biomassas para bioenergia diz respeito à complexidade adquirida pelo problema quando se leva em consideração o máximo de variáveis possíveis.

No geral, há preponderância do enfoque econômico na otimização da cadeia produtiva de biomassas, com abordagem limitada sobre o planejamento de redução de carbono dessa cadeia (YAHYA; NG; ANDIAPPAN, 2021).

A modelagem da cadeia produtiva de biomassas pode ser do tipo objetivo único (single-objective) ou múltiplos (multiobjective), com várias metas a serem otimizadas ao mesmo tempo (NG *et al.* 2022).

De acordo com Albashabsheh e Stamm (2021), a utilização de métodos determinísticos pressupõe o conhecimento de todos os parâmetros de antemão. Do contrário, os artigos levam em consideração incertezas e parâmetros randômicos mais realísticos, relacionados ao

suprimento, transporte, demanda de biocombustíveis, preços destes e das biomassas, caracterizando um modelo estocástico ou híbrido, quando mescla com o determinístico. A necessidade surge de tornar factível a solução ótima, independente da incerteza (distribuições de probabilidade), podendo ser feita análise de sensibilidade com variação dos parâmetros de entrada (SOWLATI, 2016; ALBASHABSHEH, STAMM, 2021).

Enquanto no modelo determinístico, a solução ótima pode ser encontrada por métodos analíticos, no estocástico (teoria das filas, simulação, programação dinâmica estocástica e teoria dos jogos) são utilizados métodos numéricos, não havendo a garantia da solução ótima (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

A técnica de otimização programação linear é amplamente empregada e serve de apoio à tomada de decisão no planejamento de produção. De origem determinística, esta modelagem matemática envolve uma ou mais funções objetivos a serem maximizadas ou minimizadas e uma série de restrições (expressões matemáticas tais quais equações ou inequações lineares) que abordam as variáveis de decisão (incógnitas) a partir dos parâmetros de entrada elencados (valores fixos e conhecidos). Se uma ou mais variáveis são inteiras, para além das variáveis contínuas da programação linear (LP), tem-se uma programação linear mista inteira (MILP). As quantidades limitadas por restrições representam soluções para a otimização de um sistema (KOLMAN; BECK, 1995; SOWLATI, 2016).

O objetivo pode compreender a maximização do lucro, do poder calorífico, da geração de energia elétrica, a minimização dos custos operacionais, do impacto ambiental ou mesmo do consumo de combustíveis. As restrições gerais de um modelo da cadeia de suprimentos dizem respeito à disponibilidade de biomassa, capacidades de processamento, e demanda de mercado, estabelecendo limites a serem cumpridos (NG *et al.* 2022).

Segundo Wu *et al.* (2022), o principal custo envolvido na cadeia de suprimentos é referente ao transporte, seguido pelo de custo de aquisição das biomassas. Quanto aos custos operacionais, a maior parcela é derivada de custos trabalhistas (35,92%), seguida pelo custo de compra e de equipamentos (30,70% e 24,25%, respectivamente). A grande contribuição do custo de compra, com a variabilidade do padrão de fornecimento das biomassas, bem como as incertezas associadas demandam a necessidade de uma modelagem bem-feita.

Zahraee, Shiwakoti e Stasinopoulos (2020) destacam a importância da MILP na resolução de problemas envolvendo modelagem, devido à existência de fenômenos discretos. Entretanto, no caso de modelagem e otimização da cadeia de biomassas, às vezes a linearidade só reflete condições específicas, desviando-se o modelo da realidade, quando há mudanças dessas condições (YUE; YOU, 2016).

2.3.1 Estudos de caso

Cundiff, Dias e Sherali (1997) utilizaram-se de programação linear (LP) para minimizar custos de transporte e de expansão de capacidade nos armazenamentos, fazendo estudo de incerteza com relação ao clima, e aplicando-o em uma planta cuja cadeia envolvia 20 produtores, com 4 a 7 locais de estocagem cada.

A LP foi utilizada em 2000 por Nienow, Mcnamara e Gillespie para otimizar a mistura ótima da queima principal de carvão com biomassa de resíduos de madeira no estado de Indiana (EUA) e assim, minimizar custos.

Bruglieri e Liberti (2008) adotaram LP para gerir uma malha já pré-existente de fornecimento, transporte e processamento de biomassas na Itália e MILP para tratar da otimização do processo decisório na alocação de centrais de processamento, e gestão da malha.

Rocco e Morabito (2012) propuseram um modelo de otimização usando a LP para apoiar tomadas de decisões no processo de produção de vapor, envolvendo o gerenciamento (compra, estoque e uso) de combustíveis (bagaço de cana-de-açúcar, cavaco de madeira, lenha, palha de arroz e óleo com baixo ponto de fluidez) e o modo de funcionamento de uma ou múltiplas caldeiras (acionamento, aquecimento e desligamento). O software de otimização utilizado foi o General Algebraic Modelling System (GAMS).

Saghaei, Ghaderi e Soleimani (2020) apresentaram um modelo de otimização, a princípio não linear (por uma multiplicação de variáveis contínuas e binárias), porém posteriormente linearizado ao longo da execução, para minimizar os custos totais da cadeia de produção de energia elétrica a partir de biomassas diversas, identificando fluxos de biomassas dos fornecedores aos estoques, dos estoques às usinas, bem como volumes armazenados (e excessos armazenados), produção de energia elétrica de cada usina e plano de distribuição de energia elétrica das usinas para os consumidores. Nesta abordagem, é presumido que a demanda de energia segue uma distribuição normal, tornando o problema típico de programação estocástica.

Wang *et al.* (2020) desenvolveram um modelo via MILP cujo objetivo era otimizar a colheita de diferentes biomassas e a logística da cadeia de suprimento de biomassas, quantificando e mapeando (dentro 13 estados dos EUA) os custos em diferentes cenários, com análise de sensibilidade sobre a disponibilidade, taxa de colheita, teor de umidade, raio de aquisição e capacidade de instalação.

Abdelhady, Shalaby e Shaban (2021) utilizaram-se de MILP para projetar uma rede nacional de cadeia de suprimentos de biomassa, no Egito, com vistas a maximizar o lucro através de uma configuração ótima.

Ferreti (2021) utilizou-se de modelo matemático para maximizar lucros com a definição de quantidades ótimas semanais de resíduos de biomassa de madeira que seriam destinadas para diferentes propósitos: combustão, reintegração ao ciclo de produção, venda e estocagem, auxiliando do ponto de vista estratégico a tomada de decisão. Foi conseguido um aumento de cerca de 15% nos lucros do processo.

Partindo do pressuposto de que a cadeia de suprimentos de biomassa é estocástica por natureza, Aghalari *et al.* (2021) buscaram uma modelagem matemática (MILP e algoritmo híbrido) para avaliar o impacto da qualidade (teor de cinzas, umidade), otimizando a produção de pellets de biomassa.

Yahya, Ng e Andiappan (2021) aplicaram MILP num estudo de caso na Malásia, abordando cenários diferentes, com avaliação de abastecimento total das novas usinas somente com biomassa e investigação para atingir redução das emissões de carbono.

Paes *et al.* (2022) fizeram uma modelagem do sistema energético brasileiro, agregando parâmetros de caráter ambiental, aos socioeconômicos mais comumente abordados, e imputando penalidades: restrição de emissões de gases de efeito estufa ou ainda uma taxa de carbono, relacionando um custo à poluição ambiental, dentro da própria função objetivo. Foram estudados os cenários com e sem aplicação das penalidades.

Através de uma análise multidisciplinar que incluía MILP, GIS (*Geographic Information System*), análise econômica e de sensibilidade, Wu *et al* (2022) otimizaram a nível estratégico a cadeia de suprimentos de biomassas na busca por menor custo.

No que compete à cadeia de suprimentos, Paolucci, Bezzo e Tugnoli (2016) utilizaram-se de MoMILP (Programação linear inteira mista multi-objetivo) para otimizar o processo de pirólise, minimizando emissões e maximizando lucro.

Diante do exposto, cada modelo torna-se único, a exemplo de porcentagens máximas de participação de determinado tipo de biomassa visando evitar incrustação, depósitos, considerações ambientais, localização, etc. Isso é advindo da complexidade conferida ao modelo, do conhecimento do processo, bem como da composição química das biomassas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item consta a metodologia aplicada para o desenvolvimento do modelo. Em parte, algumas condições relativas às biomassas selecionadas constam na revisão bibliográfica levantada, a exemplo de condições de plantio e dados de safra. As etapas da metodologia adotada foram discriminadas abaixo.

3.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS BIOMASSAS

Foram fornecidos dados de análise elementar das biomassas e avaliado o potencial de combustão das matérias primas, através de poder calorífico, como dados de embasamento ao modelo, através de literatura específica: uma base de dados holandesa para biomassas denominada Phyllis. Utilizaram-se as palavras “napier grass”, “empty fruit bunches palm oil”, “mesocarp fiber palm oil” e “wood chips” e “sawdust” como palavras-chave. As umidades foram citadas, quando disponíveis, porém serão objetos de acompanhamento da usina “*in loco*”.

3.2 LEVANTAMENTO DAS CONDIÇÕES GERAIS PARA O ESTUDO

As condições gerais de estudo consideradas relevantes foram: demanda térmica da caldeira, calculada através de balanço de massa e de energia, com informações do memorial descritivo de projeto do equipamento e que uma vez determinada, dá condições do modelo determinar a quantidade de combustíveis a ser queimada, considerando-se as restrições envolvidas na modelagem; avaliação dos pré-tratamentos como coadjuvantes no processo de melhoria da qualidade das biomassas que alimentam a caldeira; estimativa do volume de estocagem das biomassas; e avaliação do impacto da qualidade das biomassas na corrosão da caldeira.

3.2.1 Estimativa de massa de combustível

Para estimar a massa de combustível a ser queimada foi feito cálculo da demanda térmica da caldeira aquatubular CBS-92T/H, através de um balanço de energia na base mássica, com os dados de projeto obtidos no memorial descritivo da caldeira, assumindo-se as seguintes considerações:

- Volume de controle analisado na região de entrada de água comprimida até à saída de vapor superaquecido;
- Operação da caldeira em regime permanente;
- Pressão constante, de 2,059 MPa (21 kgf/cm²);
- Não ocorrência significativa de transferência de massa (perda material), nem de perdas no volume de controle analisado;
- Diferença de cota entre entrada e saída dos equipamentos desprezível;
- Não ocorrência significativa de troca de energia, nem por radiação, nem por condução, nem por convecção, devido aos volumes grandes de matéria, comparados à interface com o meio externo, i.e., a caldeira é considerada adiabática.

Conforme a primeira lei da termodinâmica, tem-se a conservação de energia total de um sistema:

$$\frac{d\dot{E}}{dt} = \dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} \quad (6)$$

Como o processo é tido em regime permanente, não há variação líquida ou taxa de acúmulo de energia, sendo zerado este primeiro termo, enquanto a convenção indica um sinal positivo para as energias que entram no sistema, e negativo para as que saem. Logo, tem-se:

$$\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{sai} \quad (7)$$

O balanço é composto pelo fluxo de energia que acompanha a matéria, por unidade de massa (parcelas de entalpia, h , energia cinética, $\frac{v^2}{2}$, e energia potencial, gz), bem como pelos fluxos de calor, Q , e trabalho, W . Para fins de praticidade, geralmente despreza-se a energia cinética e a energia potencial diante da grandeza da entalpia:

$$\dot{Q}_{ent} + \dot{W}_{ent} + \sum_{ent} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) = \dot{Q}_{sai} + \dot{W}_{sai} + \sum_{sai} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (8)$$

Supondo que o calor perdido pelo sistema é nulo, tem-se:

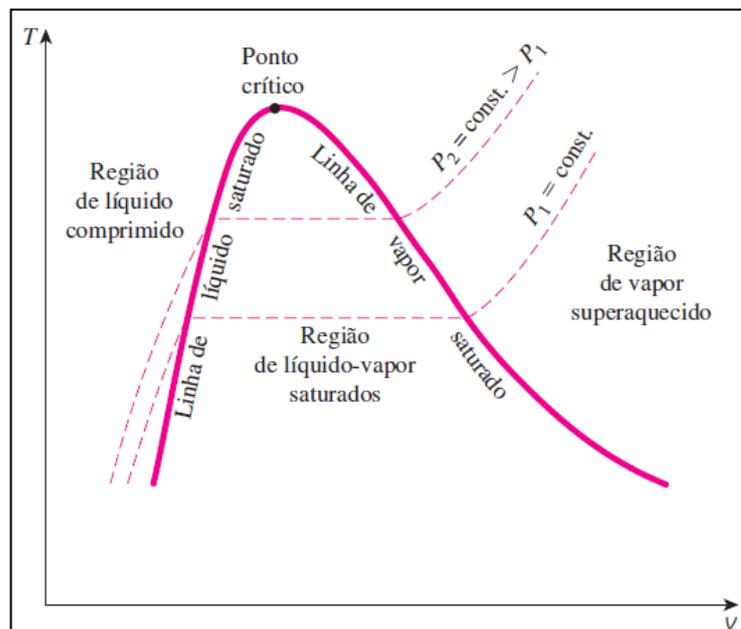
$$\dot{Q}_{ent} + \dot{m}_{ent} h_{ent} = \dot{m}_{sai} h_{sai} \quad (9)$$

Do balanço de massa, tem-se que a massa que entra é igual à massa que sai, portanto, a Equação 9 torna-se:

$$\dot{Q}_{ent} = \dot{m}_{ent}(h_{sai} - h_{ent}) \quad (10)$$

Para o cálculo da demanda térmica, as entalpias foram contabilizadas por meio de interpolação, conforme as tabelas de propriedades termodinâmicas (em unidades do SI) de Çengel e Boles (2013), de acordo com a seção dentro do gerador de vapor: economizador, onde o líquido comprimido ou sub-resfriado é aquecido da temperatura de entrada até à temperatura de saturação, por uma variação de calor sensível; evaporador, à temperatura de saturação, onde a diferença de entalpias é expressa pelo calor latente de vaporização h_{lv} ; e superaquecedor, onde é fornecido calor sensível da temperatura de saturação até à temperatura de saída do vapor. As mudanças de estado envolvidas são ilustradas em um diagrama P-V, ou T-V, como o da Figura 10.

Figura 10 – Diagrama T-V de uma substância pura



Fonte: Çengel e Boles (2013).

Dados da caldeira:

Produção de vapor: 92000 kg/h;

Pressão de trabalho: $21 \text{ kgf/cm}^2 = 2,059 \text{ MPa}$, que corresponde a uma temperatura de saturação de $213,813^\circ\text{C}$;

Temperatura de vapor: 380°C;

Temperatura da água: 120°C.

Eficiência térmica mínima ao PCI: 83%.

Poder Calorífico Inferior (PCI) aproximado tido como referência no projeto da caldeira: 2.300 kcal/kg = 9.623,2 kJ/kg.

Economizador (líquido sub-resfriado a líquido saturado):

Aplicando-se a Equação 10:

$$\dot{q}_{\text{economizador}} = \dot{m}_e (h_{l@T_{\text{sat}}} - h_l) \quad (11)$$

$$h_{l@T_{213,83^\circ\text{C}}} = 915,1297 \text{ kJ/kg (obtido por interpolação)}$$

$h_l \cong h_{l@T_{120^\circ\text{C}}} + v_{l@120^\circ\text{C}} (P - P_{\text{sat}@120^\circ\text{C}})$, em que o líquido comprimido é tratado por aproximação, como líquido saturado aquecido à mesma temperatura, a pressões elevadas.

$$h_l = 503,81 + 0,001060 (2059,4 - 198,67) = 505,7824 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{q}_{\text{economizador}} = 92000 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times \frac{\text{h}}{3600\text{s}} (915,1297 - 505,7824) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 10461,0977\text{kW}$$

Evaporador (líquido saturado a vapor saturado):

$$\dot{q}_{\text{evaporador}} = \dot{m}_e (h_{lv@T_{\text{sat}}}) \quad (12)$$

$$h_{lv@T_{213,83^\circ\text{C}}} = 1883,7034 \text{ kJ/kg (obtido por interpolação)}$$

$$\dot{q}_{\text{evaporador}} = 92000 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times \frac{\text{h}}{3600\text{s}} (1883,7034) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 48139,0864 \text{ kW}$$

Superaquecedor (vapor saturado a vapor superaquecido):

$$\dot{q}_{\text{superaquecedor}} = \dot{m}_e (h_{lv@T_{380}} - h_{v@T_{\text{sat}}}) \quad (13)$$

$$h_{lv@T_{380^\circ\text{C}}} = 3203,0199\text{kJ/kg (obtido por interpolação)}$$

$$h_{v@T_{213,83^\circ\text{C}}} = 2798,8346 \text{ kJ/kg (obtido por interpolação)}$$

$$\dot{q}_{\text{superaq}} = 92000 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times \frac{\text{h}}{3600\text{s}} (3203,0199 - 2798,8346) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 10329,1799\text{kW}$$

Em resumo, a demanda térmica da caldeira resulta:

$$\dot{q}_e = \dot{q}_{\text{economizador}} + \dot{q}_{\text{evaporador}} + \dot{q}_{\text{superaquecedor}} \quad (14)$$

$$\dot{q}_e = \mathbf{68929,4kW}$$

3.2.2 Capacidade de armazenamento

As biomassas podem apresentar heterogeneidade de granulometria. Algumas normas (ISO 17225 e EN 14691) dizem respeito à padronização de diversas biomassas sólidas para uso industrial. Uma vez recebidas e padronizadas, as biomassas precisam ser estocadas, tendo suas umidades equilibradas com a umidade relativa do ar ambiente (DEMIRBAS, 2005).

De acordo com Brown (2019), a umidade de equilíbrio da biomassa varia acima de 25%, na base úmida, quando a umidade relativa do ar ultrapassa 90-95%. Já Alves, Ushima e Peixoto (2020) relatam uma umidade de equilíbrio em torno de 22,5 % b.u. para biomassas que sofreram processo de lixiviação.

Segundo Saidur (2011), o ideal seria dispor de armazenamentos intermediários e não em campo, pois isto acarreta perda maior de material, com falta de controle da umidade final e formação fúngica e de esporos. Faz-se importante monitorar a umidade e temperatura da biomassa, como indícios de bio-decomposição (MANDØ, 2013).

A estimativa inicial do volume de estoque na usina foi obtida de forma conservadora através do combustível com menor densidade, o que demanda mais espaço. O volume foi calculado de modo a prover um estoque capaz de manter a operação da planta.

Da literatura obtiveram-se valores de densidade aproximados de 870 kg/m³ para o capim-elefante (YAMAJI *et al.*, 2013 apud ALVES, 2018) e 471,43 kg/m³ para os cachos de dendê (COSTA, 2018), na forma fresca, a granel. Vale salientar que a densidade preferível para contabilizar o armazenamento e transporte é a densidade *bulk*, que por concepção leva em consideração a granulometria, porosidade e estado de compactação, variando bastante na literatura para o mesmo material de acordo como foi amostrado (umidade, corte, etc.). Análises conduzidas pela própria usina podem mensurar com maior precisão as densidades ao longo do uso da ferramenta, para conferir mais realismo e incluir os resíduos florestais em questão.

Tendo como base a demanda da caldeira, calculada previamente (6.8929,4 kW), a menor densidade, de 0,47 g/cm³ e o poder calorífico inferior dos cachos vazios de dendê de 18,4 MJ/kg obtidos por Costa (2018), estimou-se o volume necessário de biomassa.

3.2.3 Corrosão

De acordo com o memorial descritivo da caldeira, a composição do superaquecedor da caldeira é dada por uma liga de aço carbono com C entre 0,06 e 0,18%, Mn entre 0,27 e 0,63%, P < 0,035%, S < 0,035% e Si < 0,25% (ASTM-A-192). Já o pré-aquecedor pode ter 0,08 a 0,18%

de C, 0,27 a 0,6% de Mn, P <0,03%, S < 0,035% (ASTM-A-214/SAE 1010). Não há menção sobre adição de cromo, níquel ou molibdênio conforme preconiza Caillat e Vakkilainen (2013) para proteção corrosiva.

Idealmente, faz-se necessária a existência de amostragem periódica na recepção das biomassas para avaliação de suas composições, controlando a qualidade, e conseqüentemente, o risco de corrosão química. Embora muitas vezes a formação de cinzas durante combustão em escala laboratorial não reflita o fenômeno real na caldeira, por dar-se de forma mais lenta no primeiro caso, alguns índices preditivos são sugeridos a seguir para avaliação da propensão dos combustíveis a *slagging/fouling*, com base na composição de suas cinzas. Tais índices ajudam a nortear a suscetibilidade à corrosão, porém tornam questionável a comparação entre bancada e indústria, bem como entre combustíveis fósseis e biomassas, devido à perda de acurácia (LACHMAN *et al.* 2021; ZHU *et al.* 2014). Da mesma forma, há condições não previstas pelos fabricantes de caldeiras com formação de escória e incrustações nas superfícies quentes das paredes dos tubos da caldeira com gases de exaustão muito quentes relatados por Lima (2014), quando da combustão de bagaço seco de cana de açúcar, abaixo de 45% de umidade (MAGASINER, 1987 apud LIMA, 2014).

A seguir estão os índices mais comumente encontrados na literatura:

3.2.3.1 Teor de cloro e enxofre

Do ponto de vista preventivo, as melhores práticas da indústria recomendam um teor de enxofre na biomassa menor que 0,1% m/m na base seca, livre de cinzas (VAN LOO; KOOPEJAN, 2008). Reza *et al.* (2013) apresentam um limite de cloro na biomassa menor que 0,2% m/m para que seja considerado risco baixo de depósito de cinzas “*slagging*”, e como mencionado anteriormente, S:Cl > 4 (MILTNER, BECKMANN E FRIEDL, 2006).

Este último autor utilizou-se de um diagrama que correlaciona temperatura da parede da caldeira com a temperatura do gás da chaminé e a velocidade do gás na chaminé, “*Flinger plot*”, para encontrar limites de temperatura de corrosão por cloro, mantendo a faixa de operação da caldeira dentro de regiões de indiferente ou baixo risco de corrosão.

3.2.3.2 Índice B/A (relação entre compostos básicos e ácidos)

A relação entre a fração mássica dos óxidos básicos e ácidos nas cinzas é um dos principais parâmetros utilizados para determinar a tendência ao *slagging*, principalmente pelo

fato de compostos básicos reduzirem o ponto de fusão das cinzas, ao contrário dos ácidos. A seguir consta a definição deste índice, sendo valores de $B/A < 0,206$ indicadores de *slagging* leve, enquanto $B/A > 0,4$, *slagging* severo. A faixa compreendida entre $0,206 < B/A < 0,4$ apresenta-se como *slagging* moderado (ZHU *et al.* 2014).

Lachman *et al.* (2021) apresentam outros valores de referência para este mesmo índice preditivo: $B/A < 0,5$ indica tendência baixa ao *slagging*, $0,5 < B/A < 1$, média, $1 < B/A < 1,75$, tendência alta, enquanto $B/A > 1,75$ seria um *slagging* severo.

$$\frac{[B]}{[A]} = \frac{[\text{Fe}_2\text{O}_3] + [\text{CaO}] + [\text{MgO}] + [\text{K}_2\text{O}] + [\text{Na}_2\text{O}]}{[\text{SiO}_2] + [\text{TiO}_2] + [\text{Al}_2\text{O}_3]} \quad (15)$$

3.2.3.3 Índice *fouling*

O índice que prevê a tendência a *fouling*, especificamente, pode ser expresso resumidamente em termos da relação entre óxidos básicos e ácidos, sendo o potássio de grande importância. Um índice $Fu < 0,6$ representa baixo risco, enquanto a faixa de 0,6 a 40 indica uma tendência severa. Valores > 40 tendem a *fouling* extremamente severo (LACHMAN, 2021).

$$Fu = \frac{[B]}{[A]} [\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}] \quad (16)$$

3.2.3.4 Índice álcali

Inicialmente desenvolvido para carvão, expressa a quantidade/efeito de óxidos alcalinos tais quais Na_2O e K_2O , que reduzem o ponto de fusão das cinzas no combustível, por unidade de energia de combustível (PCS). Indica tendência a incrustações: $I_A < 0,17$ kg/GJ representa uma tendência baixa, I_A na faixa entre 0,17 e 0,34 indicaria como provável a sua ocorrência, enquanto $I_A > 0,34$ é dado como certo o *slagging* (REZA *et al.* 2013; MANDØ, 2013; LACHMAN, 2021). O índice é representado a seguir:

$$I_A = \frac{\%[Na_2O] + \%[K_2O]}{100} \times \frac{\%Cinzas}{100} \times \frac{1 \times 10^6}{PCS} \quad (17)$$

Dentre os parâmetros, julgou-se pertinente eleger alguns dos índices como relevantes. Para dados de entrada no modelo só foram utilizados aqueles cuja obtenção fosse fácil, frente às diversas possibilidades existentes na literatura. Existem, porém não foram contemplados na explanação os índices de *slagging* (I_s), de viscosidade *slag* (I_v) e de fusibilidade das cinzas (AFI).

3.3 AVALIAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA DA BIOMASSA

O fluxo de processo foi descrito e discutido, do fornecimento até à queima das biomassas na caldeira, através de mediação junto à usina, com vistas à otimização. Foi feita abordagem dos custos envolvidos nos tratamentos de lixiviação e densificação.

3.3.1 Visão geral da usina

Informações da usina foram obtidas junto a ela por meio de consultorias e do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), confrontando-se com a literatura.

3.3.2 Custos de densificação e lixiviação

Os custos de pré-tratamentos como densificação e lixiviação foram pontuados através da literatura.

3.3.3 Descrição do processo

O processo foi descrito sucintamente de acordo com as informações constantes no memorial descritivo da caldeira.

3.4. AVALIAÇÃO DA LOGÍSTICA DA REGIÃO

O transporte e manuseio de biomassas podem responder por 20 a 50% do custo da cadeia produtiva, sendo seu custo dependente das distâncias bem como do tempo de viagem. As

distâncias incorrem no aumento do consumo de combustíveis e, portanto, na elevação de emissões, enquanto o tempo de viagem inclui carregamento, descarregamento e retorno, afetando custos com a depreciação, seguro e manutenção dos veículos, para além da mão de obra (RENTIZELAS, 2009).

Brandão *et al.* (2021) corroboram que o custo de transporte é um dos fatores limitantes para a cadeia produtiva de biomassas, dependendo da biomassa, da infraestrutura, das vias e distâncias, podendo o transporte ser limitado somente à estação seca. Dessa forma, a variação sazonal das distâncias das rotas entre os fornecedores e os locais de plantio para os locais de estoque pode impactar nos custos.

3.5. AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS

As condições meteorológicas locais, como chuva, temperatura, umidade, sazonalidade, etc., foram pontuadas nos locais de obtenção das biomassas e da usina, de forma a prover dados atualizáveis.

3.6 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO

Neste tópico é descrito o modelo matemático representativo da cadeia produtiva de biomassas para otimizar o planejamento da usina, no horizonte de 1 ano, operando continuamente, ou seja, os cenários específicos de partida e parada da caldeira não são levados em consideração na modelagem. A solução propõe encontrar entre todos os vetores pertencentes ao conjunto dos reais um vetor que minimize o valor da função objetivo custo e satisfaça um sistema de equações e inequações lineares (restrições). De acordo com Belfiore e Fávero (2013), a solução factível que apresenta melhor valor da função objetivo é chamada de solução ótima.

Antes de tudo, é assumido neste trabalho que a caldeira foi considerada apta para queimar misturas diversas de biomassas. A seguir são listados os índices utilizados, em ordem alfabética, os parâmetros de entrada, bem como as variáveis de decisão do modelo. Logo após, constam a função objetivo e as restrições do modelo na forma canônica.

Índices:

- c : combustível ($i = 1, 2, 3, \dots, C$);

- f: fornecedor ($f = 1, 2, 3, \dots, F$);
- g: transportador ($g = 1, 2, 3, \dots, G$);
- p: pré-tratamentos ($p = 1, 2, \dots, P$);
- t: período ($t = 1, 2, 3, \dots, T$). Foi definida uma base semanal para o período do modelo. Considerando que alguns meses têm 30 dias enquanto outros têm 31, optou-se por dividir os 365 dias do ano por 12 meses, totalizando $T = 52$ semanas. Logo, afirma-se que a primeira semana do modelo seja a 1º semana do 1º mês.

Parâmetros:

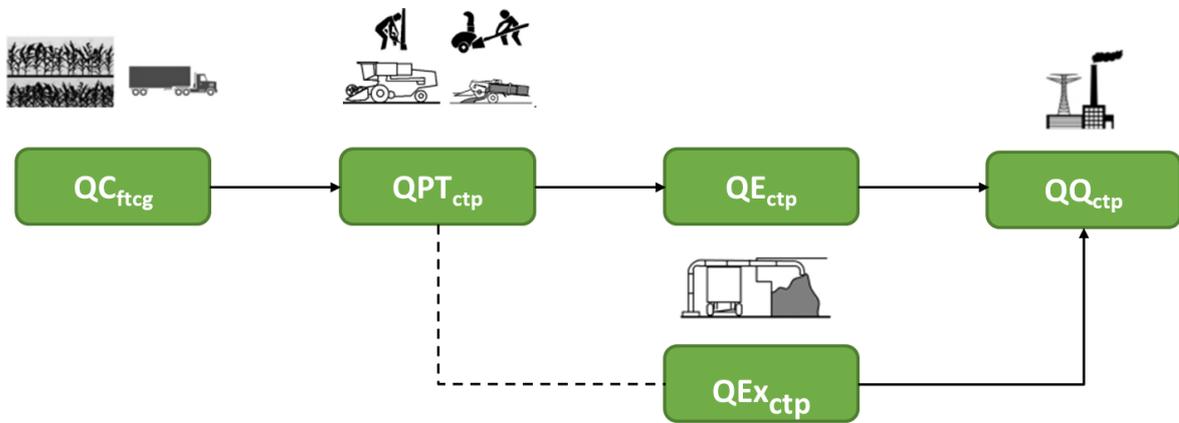
- $c1_{fc}$ (R\$/kg): custo de aquisição de cada combustível de cada fornecedor em cada período;
- $c2_{fg}$ (R\$/kg.km): custo de transporte de cada fornecedor ao estoque realizado por cada transportador em cada período, podendo incluir custos de manutenção, seguro e mão de obra;
- $c3_{cp}$ (R\$/kg): custo de cada pré-tratamento para cada combustível;
- $c4$ (R\$/m³): custo de estocagem principal;
- $c5$ (R\$/m³): custo de estocagem extraordinária podendo incluir o custo de transporte até este estoque;
- $cap1_{gt}$ (kg): capacidade de transporte de cada transportadora em cada período;
- $cap2$ (m³): capacidade nominal do estoque principal;
- $cap3$ (m³): capacidade nominal do estoque extraordinário;
- $cap4$ (m³): capacidade nominal do estoque auxiliar;
- Cl_{cp} (m/m): percentual de cloro final de cada combustível, na base seca, sujeito a cada pré-tratamento, na forma decimal;
- Cl_i (m/m): percentual de cloro inicial de cada combustível, na base seca, na forma decimal;
- cm_{fc} (kg): compra mínima de cada combustível em cada fornecedor em quaisquer períodos;
- CO_c (mg/Nm³): teor de monóxido de carbono emitido pela caldeira de cada combustível no período em mg/Nm³;
- dem_t (kJ): demanda térmica média da caldeira em cada período;

- dens_{cp} (kg/m^3): densidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento;
- d_{ft} : distância de cada fornecedor ao estoque em cada período;
- eff_{cp} : eficiência de combustão da caldeira, na forma decimal;
- estseg : fração de estoque de segurança suficiente para atender a uma parcela da demanda térmica em qualquer período;
- f_p : fator de efetividade do pré-tratamento na redução de umidade;
- g_p : fator de efetividade do pré-tratamento na redução de enxofre;
- h_p : fator de efetividade do pré-tratamento na redução do cloro;
- j_p : fator de efetividade do pré-tratamento na alteração do poder calorífico inferior;
- mrf_f (kg): montante anual contratado de resíduos florestais de cada fornecedor;
- o_{ftc} (kg): oferta de cada combustível por cada fornecedor em cada período;
- pci_c (kJ/kg): poder calorífico inferior inicial de cada combustível;
- pci_{cp} (kJ/kg): poder calorífico final de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento;
- perd_{ctg} : fator de perda associada ao transporte de cada combustível por cada transportador em cada período, na forma decimal;
- S_{cp} (m/m): percentual de enxofre final de cada combustível, na base seca, sujeito a cada pré-tratamento, na forma decimal;
- S_{ic} (m/m): percentual de enxofre inicial de cada combustível, na base seca, na forma decimal;
- tes_{cp} (semanas): limite de tempo de estocagem para cada combustível submetido a cada pré-tratamento para evitar apodrecimento;
- tpt_{cp} (semanas): tempo estimado para que ocorra pré-tratamento de cada combustível para cada pré-tratamento;
- u_{ict} (m/m): percentual de umidade inicial de cada combustível no período, na forma decimal;
- u_{ctp} (m/m): percentual de umidade final de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento no período, observando-se o tempo de pré-tratamento estimado, na forma decimal.

Variáveis de decisão:

As variáveis de decisão se relacionam entre si através da cadeia produtiva da usina conforme ilustra a Figura 11. Logo abaixo constam em ordem de aparecimento.

Figura 11 – Diagrama de relação entre as variáveis de decisão resumindo a cadeia produtiva de biomassas do modelo adotado para a usina



Fonte: A Autora (2023).

- QC_{ftcg} (kg): quantidade de cada combustível que cada transportador transportará de cada fornecedor ao estoque em cada período;
- QPT_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível que será sujeita a cada pré-tratamento em cada período;
- QE_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento presente no estoque principal em cada período;
- QEx_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento presente no estoque extraordinário em cada período;
- QQ_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento que será disponibilizada ao estoque auxiliar para queima na caldeira durante cada período.

3.6.1 Função objetivo

A função objetivo visa minimizar os custos de compra, transporte, pré-tratamento e estocagem dos combustíveis, com eventual estocagem extraordinária para o caso de exceder a capacidade de estocagem principal da usina, o que pode acarretar custos diferenciados.

Custos relativos ao consumo de água, à partida e aquecimento da caldeira, limpezas periódicas, ou até mesmo operação futura de caldeiras suplementares, caso haja implementação, não foram inicialmente contemplados no modelo, pois o foco é relativo à mistura de biomassas que resultará da otimização.

$$\begin{aligned}
Min C = & \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \left(c1_{ftc} \sum_{g=1}^G QC_{ftcg} \right) + \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T \left\{ d_{ft} \left[\sum_{g=1}^G \left(c2_{ftg} \sum_{c=1}^C QC_{ftcg} \right) \right] \right\} \\
& + \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \left(c3_{cp} \sum_{t=1}^T QPT_{ctp} \right) + \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \left(\frac{c4 \cdot QE_{ctp} + c5 \cdot QEx_{ctp}}{dens_{cp}} \right) \quad (18)
\end{aligned}$$

- $c1_{ftc}$ (R\$/kg): custo de aquisição de cada combustível de cada fornecedor em cada período;
- QC_{ftcg} (kg): quantidade de cada combustível que cada transportador transportará de cada fornecedor ao estoque em cada período;
- d_{ft} : distância de cada fornecedor ao estoque em cada período;
- $c2_{ftg}$ (R\$/kg.km): custo de transporte de cada fornecedor ao estoque realizado por cada transportador em cada período, podendo incluir custos de manutenção, seguro e mão de obra;
- $c3_{cp}$ (R\$/kg): custo de cada pré-tratamento para cada combustível;
- QPT_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível que será sujeita a cada pré-tratamento em cada período;
- $c4$ (R\$/m³): custo de estocagem principal;
- QE_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento presente no estoque principal em cada período;
- $c5$ (R\$/m³): custo de estocagem extraordinária;
- QEx_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento presente no estoque extraordinário em cada período;
- $dens_{cp}$ (kg/m³): densidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento.

3.6.2 1ª Restrição

A 1ª restrição diz respeito a uma condição básica da programação linear, a não negatividade das variáveis de decisão.

$$QC_{ftcg}, QPT_{ctp}, QE_{ctp}, QEx_{ctp}, QQ_{ctp} \geq 0 \quad (19)$$

- QC_{ftcg} (kg): quantidade de cada combustível que cada transportador transportará de cada fornecedor ao estoque em cada período;
- QPT_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível que será sujeita a cada pré-tratamento em cada período;
- QE_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento presente no estoque principal em cada período;
- QEx_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento presente no estoque extraordinário em cada período;
- QQ_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento que será disponibilizada ao estoque auxiliar para queima na caldeira durante cada período.

3.6.3 2ª Restrição

Em virtude da complexidade e variabilidade de composição das biomassas, um dos maiores desafios para simulação e otimização de rotas termoquímicas como gaseificação e pirólise de biomassas é a obtenção de dados termodinâmicos como entalpia de formação, entropia, capacidade calorífica, exergia, etc. (ZHANG; JI; QIAN, 2021). Analogamente, no que compete à combustão, o desafio do modelo consiste em prever uma restrição de demanda térmica mínima que contemple a realidade, com dados termodinâmicos de fácil obtenção.

Na restrição adotada para a demanda térmica mínima, a energia líquida conferida pela queima das biomassas é calculada em termos mais reais, isto é, a partir do poder calorífico inferior, PCI.

Dessa forma, a 2ª restrição considera a demanda térmica da caldeira mínima a ser atendida através da quantidade de energia disponibilizada pela queima das biomassas. Para isso multiplica-se a massa de combustível pelo poder calorífico observando-se tanto a umidade presente quanto a eficiência da caldeira. Note que o poder calorífico fornecido como parâmetro é expresso na base seca, antes da realização de quaisquer pré-tratamentos. Isso equivale a dizer que diante da possibilidade de alteração do poder calorífico e umidade com a realização de pré-tratamentos que levem à melhoria energética, adota-se um fator de correlação chamado fator de efetividade do pré-tratamento.

$$\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P QQ_{ctp} [pci_{cp}(1 - u_{ctp})] eff_{cp} \geq dem_t, \forall t \quad (20)$$

$$\text{Sendo: } u_{ctp} = u_{i_c(t-t_{pt_{cp}})} \cdot f_p$$

$$pci_{cp} = pci_c \cdot j_{cp}$$

- QQ_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento que será disponibilizada ao estoque auxiliar para queima na caldeira durante cada período;
- pci_{cp} (kJ/kg): poder calorífico final de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento;
- pci_c (kJ/kg): poder calorífico inferior inicial de cada combustível;
- j_p : fator de efetividade do pré-tratamento na alteração do poder calorífico inferior;
- u_{ctp} (m/m): percentual de umidade final de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento no período, observando-se o tempo de pré-tratamento estimado, na forma decimal;
- u_{i_c} (m/m): percentual de umidade inicial de cada combustível no período, na forma decimal;
- $t_{pt_{cp}}$ (semanas): tempo estimado para que ocorra pré-tratamento de cada combustível para cada pré-tratamento;
- f_p : fator de efetividade do pré-tratamento na redução de umidade;
- eff_{cp} : eficiência de combustão da caldeira, na forma decimal;
- dem_t (kJ): demanda térmica média da caldeira em cada período.

3.6.4 3ª Restrição

Nesta restrição é considerada a limitação de umidade da carga de alimentação da caldeira, através da média ponderada de umidade das biomassas, sendo a umidade utilizada a umidade final, isto é, após os pré-tratamentos. Para efeito de correlação é usado um fator de efetividade do pré-tratamento (secagem), que se supõe ser linear, em relação à umidade inicial da biomassa cuja caracterização é disponível. De acordo com o Memorial descritivo da caldeira, recomenda-se que a umidade das biomassas não exceda 52%.

Fatores de correlação inicialmente introduzidos aqui para a secagem aparecem correspondentemente para demais tratamentos, com exceção da densificação. Nesta, a densidade da biomassa é elevada, melhorando o aspecto energético da biomassa e reduzindo o volume a ser transportado, quando feito anteriormente a esta etapa, ou seja, o pré-tratamento ocorrendo por concepção entre a compra e a estocagem. Para o caso até então da usina, em que somente lá a densificação é passível de ocorrer (isto é, após o transporte), o ganho volumétrico

é reduzido somente à estocagem. Segundo a usina, as biomassas pré e pós-tratadas co-existirão no mesmo espaço de armazenamento, induzindo à adoção das densidades iniciais de cada biomassa, ou seja, as menores densidades, enquanto a viabilização do tratamento fica expressa pelos custos imputados na função objetivo a ser minimizado e indiretamente na restrição de queima, através de PCI maiores. No caso de a “filosofia” da usina convencionalmente conceber o pré-tratamento antes da estocagem e do transporte, passa a ser admitido o i_p : fator de efetividade do pré-tratamento na alteração da densidade, que modificaria a densidade de acordo com $dens_{cp} = densi_c \cdot i_{cp}$ na função objetivo e nas 10^a, 11^a, 12^a e 13^a restrições. No caso de a usina inferir diretamente valores finais desses parâmetros, inibe-se o uso dos fatores mencionados.

$$\frac{\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P (u_{ctp} \cdot QQ_{ctp})}{\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P QQ_{ctp}} < 0,52, \forall t \quad (21)$$

$$\text{Sendo: } u_{ctp} = ui_{c(t-tpt_{cp})} \cdot f_p$$

- QQ_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento que será disponibilizada ao estoque auxiliar para queima na caldeira durante cada período;
- u_{ctp} (m/m): percentual de umidade final de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento no período, observando-se o tempo de pré-tratamento estimado, na forma decimal;
- ui_{ct} (m/m): percentual de umidade inicial de cada combustível no período, na forma decimal;
- tpt_{cp} (semanas): tempo estimado para que ocorra pré-tratamento de cada combustível para cada pré-tratamento;
- f_p : fator de efetividade do pré-tratamento na redução de umidade.

3.6.5 4^a Restrição

Esta restrição refere-se à obrigatoriedade de pré-tratamento das biomassas compradas (secagem, uso “*in natura*”, etc.). Sua equação leva em conta o fator de perda associada ao transporte, tratando a quantidade de biomassa comprada e transportada que efetivamente chega à usina.

$$\sum_{f=1}^F \sum_{g=1}^G (1 - \text{perd}_{ctg}) QC_{ftcg} = \sum_{p=1}^P QPT_{ctp}, \forall t, c \quad (22)$$

- perd_{ctg} : fator de perda associada ao transporte de cada combustível por cada transportador em cada período, na forma decimal;
- QC_{ftcg} (kg): quantidade de cada combustível que cada transportador transportará de cada fornecedor ao estoque em cada período;
- QPT_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível que será sujeita a cada pré-tratamento em cada período.

3.6.6 5ª restrição

A 5ª restrição habilita a queima de biomassas somente após o tempo de pré-tratamento estabelecido ser concluído, observando também um limite de tempo de estocagem, de forma que as biomassas pré-tratadas e armazenadas sejam queimadas neste limite de tempo máximo estabelecido para que não sofram degradação, evitando perdas mássicas ou energéticas. De acordo com os testes feitos por Wihersaari (2005) apud Rentizelas (2013), as perdas mensais em massa de chips de madeira podem variar de 1,1 a 2,6%, dependendo da umidade inicial.

Nela, através da função degrau unitário - Heaviside Step (H) nos termos que envolvem o período t , para períodos menores que o tempo de pré-tratamento, ou seja, início do ano corrente, a quantidade de biomassa pré-tratada a ser contabilizada é a disponibilizada em períodos finais do ano anterior. Tal estratégia está alinhada com a similaridade de produtividade observada entre anos próximos ao longo da cadeia produtiva de biomassas, em virtude da sazonalidade, ajustando a condição do primeiro período em que o modelo é executado ($t = 1$).

$$QPT_{c\{[-H(t-tpt_{cp})+1]T+t-tpt_{cp}\}p} \leq B, \forall c, p, t \quad (23)$$

Que resulta em: $QPT_{c(T+t-tpt_{cp})p}$ se $t \leq tpt_c$

$$QPT_{c(t-tpt_{cp})p} \text{ se } t > tpt_c$$

Em que B pode assumir: $\sum_t^{t+tes_{cp}-1} QQ_{ctp}$, se $t + tes_{cp} \leq T$

$$\sum_t^T QQ_{ctp} + \sum_1^{t+tes_{cp}-T-1} QQ_{ctp}, \text{ se } t + tes_{cp} > T$$

- QPT_{cp} (kg): quantidade de cada combustível que será sujeita a cada pré-tratamento em cada período;
- tpt_{cp} (semanas): tempo estimado para que ocorra pré-tratamento de cada combustível para cada pré-tratamento;
- tes_{cp} (semanas): limite de tempo de estocagem para cada combustível submetido a cada pré-tratamento para evitar apodrecimento;
- QQ_{cp} (kg): quantidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento que será disponibilizada ao estoque auxiliar para queima na caldeira durante cada período.

3.6.7 6ª Restrição

Em atendimento à prevenção de corrosão, a mistura de biomassas deve ponderar teor de enxofre, teor de cloro e teor de previsão de corrosão. O modelo vislumbra ainda contemplar o teor de álcali que tem por função evitar a formação de incrustações, considerando o teor de óxidos alcalinos por unidade de energia de combustível (PCS), entretanto sua restrição recai em uma condição não linear da variável de decisão QQ_{cp} , tendo sido desconsiderado.

Teor de enxofre

De acordo com Speight (2022), as biomassas têm em sua maioria teores de enxofre menores que carvão, acarretando menores emissões de SO_2 em suas plantas. A faixa de S relatada fica entre 0,05 e 0,20% m/m na base seca. Nesse sentido, as biomassas em questão confirmam baixo teor de enxofre, entretanto, devido à variabilidade de fornecimento e possibilidade futura de implementar novas biomassas, achou-se oportuno incluir este teor como restrição na concepção do modelo devido à importância do enxofre nos mecanismos de deposição de incrustações e corrosão.

O modelo limita a média ponderada de enxofre das biomassas conforme a literatura, utilizando um fator de correlação para tratamento que venha a alterar a composição da biomassa como, por exemplo, a lixiviação. Alves, Ushima e Peixoto (2020), por exemplo, observaram na lixiviação uma redução de 33,3% no teor de S na palha da cana de açúcar, que talvez mereça atenção.

$$\frac{\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P (S_{cp} \cdot QQ_{ctp})}{\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P QQ_{ctp}} < 0,001, \forall t \quad (24)$$

$$\text{Sendo: } S_{cp} = Si_c \cdot g_{cp}$$

- QQ_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento que será disponibilizada ao estoque auxiliar para queima na caldeira durante cada período;
- S_{cp} (m/m): percentual de enxofre final de cada combustível, na base seca, sujeito a cada pré-tratamento, na forma decimal;
- Si_c (m/m): percentual de enxofre inicial de cada combustível, na base seca, na forma decimal;
- g_p : fator de efetividade do pré-tratamento na redução de enxofre.

3.6.8 7ª Restrição

Teor de cloro

O modelo limita também a média ponderada de cloro das biomassas conforme a literatura. Como não se dispõe de análise pré e pós-tratamento das biomassas, optou-se por adotar a proporção de remoção de Cl através de lixiviação da literatura, muito embora isso vá depender do tipo de biomassa e das condições de realização (temperatura da água, escala laboratorial ou industrial, tipo de processo termoquímico em questão). No caso de não haver estudos de regressão linear das biomassas abordadas, presume-se o valor de redução mássica de Cl obtido por Alves, Ushima e Peixoto (2020) na palha da cana de açúcar em até 77,35%, nas condições de água a 75°C, leito fixo e tempo de lixiviação de 50 min.

$$\frac{\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P (Cl_{cp} \cdot QQ_{ctp})}{\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P QQ_{ctp}} < 0,002, \forall t \quad (25)$$

$$\text{Sendo: } Cl_{cp} = Cli_c \cdot h_{cp}$$

- QQ_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento que será disponibilizada ao estoque auxiliar para queima na caldeira durante cada período;

- Cl_{cp} (m/m): percentual de cloro final de cada combustível, na base seca, sujeito a cada pré-tratamento, na forma decimal;
- Cl_i (m/m): percentual de cloro inicial de cada combustível, na base seca, na forma decimal;
- h_p : fator de efetividade do pré-tratamento na redução do cloro.

3.6.8 8ª Restrição

Teor de previsão de corrosão

Conforme dito em seções anteriores, há risco de corrosão a quente quando a razão molar de S:Cl apresenta-se menor que 4, logo, é esperado que tal relação mantenha-se maior que 4. Considerando que o modelo trabalha na base mássica e não molar, tem-se uma restrição de previsão de corrosão que precisa em termos mássicos atender o mínimo de 4,2.

$$\frac{\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P (S_{cp} \cdot QQ_{ctp})}{\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P (Cl_{cp} \cdot QQ_{ctp})} > 4,2, \forall t \quad (26)$$

3.6.10 9ª Restrição

Na literatura as emissões de gases de efeito estufa (GEE) são geralmente expressas em termos padrões de dióxido de carbono (CO_{2eq}), atreladas a estudos de LCA (*life cycle assessment*). O CO_{2eq} é uma métrica utilizada pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês), que permite comparar o impacto de diferentes gases, o que inclui dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4), biogênico ou não. Leva em consideração a quantidade emitida do GEE e o impacto, seja na contribuição para aumento da temperatura do planeta (GWP, que avalia o potencial de aquecimento do planeta através das características da molécula) ou no potencial de aquecimento global (GTP, que avalia o impacto da emissão de um GEE sobre as temperaturas médias globais da superfície em um ponto específico no tempo após sua emissão (MORAES *et al.* 2019; PINTO *et al.* 2022)).

Já o LCA é uma ferramenta padronizada internacionalmente de modo a avaliar a sustentabilidade ambiental e as implicações socioeconômicas do ciclo de vida completo de um produto, no caso a biomassa, desde a aquisição até à disposição das cinzas (BROWN, 2019).

De acordo com Paes *et al.* (2022), há duas maneiras de se incluir emissões no planejamento de um modelo: uma estabelece o limite máximo de emissões por meio de restrições, enquanto a outra aplica uma penalidade monetária, o que implicaria em um custo de poluição ambiental. A legislação brasileira não contempla um limite de gases de efeito estufa (kgCO_2/kWh), considerando outros aspectos locais e regionais em virtude de as emissões serem responsáveis pela baixa qualidade do ar, problemas respiratórios, *smog*, etc., atrelados a materiais particulados, monóxido de carbono, hidrocarbonetos, óxidos de nitrogênio e de enxofre (MANDØ, 2013), compostos orgânicos voláteis, amônia e sulfeto de hidrogênio (SPEIGHT, 2022).

No Brasil, as especificações de emissões são reguladas pela Resolução CONAMA nº 382, de 26/12/2006, que é complementada pela Resolução nº 436/2011 e alterada pela Resolução nº 501/2021. Ela estabelece limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas a partir da sua vigência, ou seja, 2007. A Resolução CONAMA nº 436, de 26/12/2011 diz respeito a fontes fixas instaladas antes de 2007. São estabelecidos limites máximos de poluentes atmosféricos (material particulado, CO, NO_x e SO_x) provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão externa de bagaço de cana-de-açúcar e derivados de madeira, enquanto biomassas, tendo em vista a capacidade nominal da unidade (BRASIL, 2006; BRASIL, 2011). No que compete às biomassas de interesse, capim-elefante, resíduos de dendê e suas misturas com resíduos florestais, particularmente não constam limites nestas legislações.

Segundo a termelétrica há medição online de CO, CO_2 e O_2 na chaminé. Considerando que o modelo pode adotar diversas combinações possíveis de misturas de biomassas a serem queimadas, este modelo preconizou o uso de restrição que levasse em consideração um limite através da média ponderada de emissão gerada por kg de biomassa. Partindo do pressuposto de que se tem uma capacidade nominal de até 9,8 MW (BRASIL, 2021), caldeiras que queimam bagaço de cana podem emitir $280 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ de material particulado, enquanto as que queimam derivados de madeira têm limite de $730 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ (ambas na base seca, tendo como referência uma queima com 8% de excesso de oxigênio). No entanto, há permissão do órgão ambiental licenciador aceitar o monitoramento periódico apenas de monóxido de carbono para sistemas com potência de até 10 MW (limite de $1300 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ de CO com capacidades entre 1 e 10

MW). Logo, a média ponderada dos teores de monóxido de carbono emitidos pela queima da mistura na caldeira não deve exceder este limite estabelecido.

$$\frac{\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P (CO_c \cdot QQ_{ctp})}{\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P QQ_{ctp}} \leq 1300 \text{ mg/Nm}^3, \forall t \quad (27)$$

- QQ_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento que será disponibilizada ao estoque auxiliar para queima na caldeira durante cada período;
- CO_c (mg/Nm^3): teor de monóxido de carbono emitido pela caldeira de cada combustível no período em mg/Nm^3 .

3.6.11 10ª Restrição

Na 10ª restrição um estoque auxiliar é contemplado por definição como o armazenamento das biomassas dispostas para queima em cada período na caldeira. Seu limite de capacidade deve atender mais que ou a quantidade de biomassas pré-tratadas, dispostas para queima no período.

$$\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \frac{QQ_{ctp}}{dens_{ctp}} \leq cap4, \forall t \quad (28)$$

- QQ_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento que será disponibilizada ao estoque auxiliar para queima na caldeira durante cada período;
- $dens_{cp}$ (kg/m^3): densidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento;
- $cap4$ (m^3): capacidade nominal do estoque auxiliar.

3.6.12 11ª Restrição

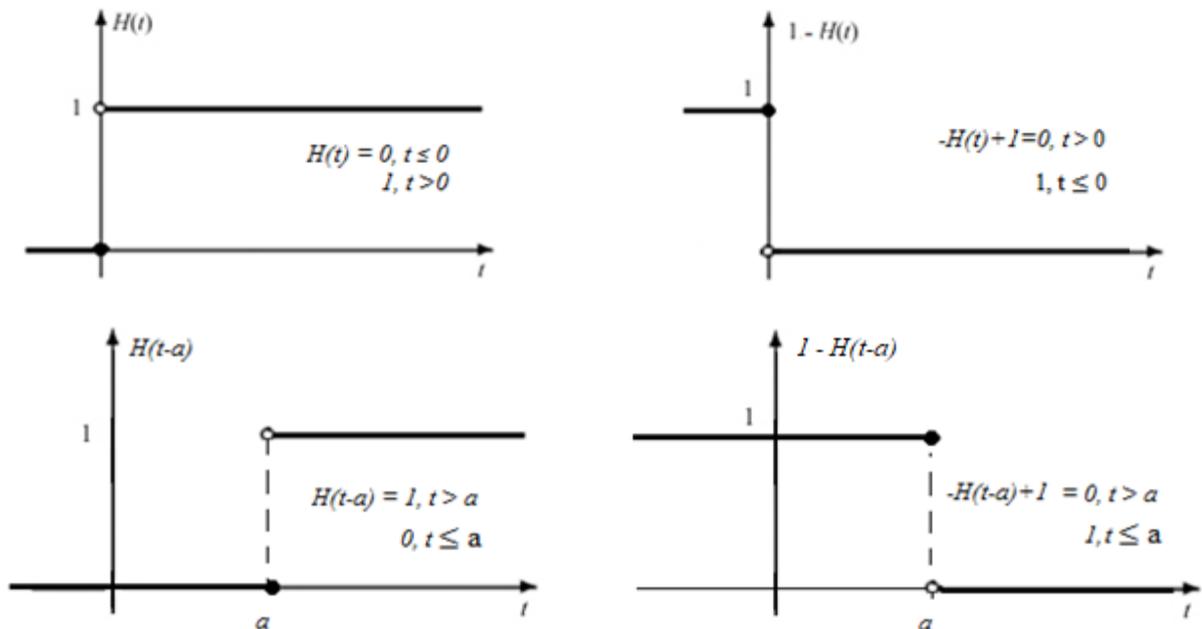
A 11ª restrição relaciona o balanço de massa de biomassas com a capacidade de estoque, através da conversão para volume: a quantidade de biomassas que são destinadas para pré-tratamento mais o montante de biomassas estocadas que sobraram do período anterior nas

estocagens principal e extraordinária menos a quantidade de biomassas pré-tratada disponibilizada para queima não deve exceder a capacidade de ambas as estocagens.

$$\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \frac{QPT_{ctp}}{dens_{cp}} + \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \left(\frac{QE_{c\{-H(t-1)+1\}T+t-1\}p} + QEx_{c\{-H(t-1)+1\}T+t-1\}p}{dens_{cp}} \right) - \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \frac{QQ_{ctp}}{dens_{cp}} \leq cap2 + cap3, \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (29)$$

Nesta restrição utilizou-se da função degrau unitário - Heaviside Step (H) nos termos que envolvem o período t, porém do tipo degrau negativo $f(t) = 1 - H(t)$ (Figura 12). Isso adveio da necessidade de considerar na primeira parcela o tempo necessário para pré-tratar as biomassas, quando necessário, e os volumes estocados previamente ao primeiro período em que o modelo é executado ($t = 1$), na segunda parcela.

Figura 12 - Função degrau unitário



Fonte: A Autora (2023).

Isso resulta em: $\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \left(\frac{QE_{cTp} + QEx_{cTp}}{dens_{cp}} \right)$ se $t = 1$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \left(\frac{QE_{c(t-1)p} + QEx_{c(t-1)p}}{dens_{cp}} \right) \text{ se } t = 2, \dots, T$$

- QPT_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível que será sujeita a cada pré-tratamento em cada período;
- $dens_{cp}$ (kg/m³): densidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento;
- QE_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento presente no estoque principal em cada período;
- QEx_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento presente no estoque extraordinário em cada período;
- QQ_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento que será disponibilizada ao estoque auxiliar para queima na caldeira durante cada período;
- $cap2$ (m³): capacidade nominal do estoque principal;
- $cap3$ (m³): capacidade nominal do estoque extraordinário.

3.6.13 12ª Restrição

O balanço de massa de biomassas convertido para volume também deve atender a uma fração denominada estoque de segurança de modo a garantir a continuidade operacional da caldeira. Inicialmente essa fração foi pensada de 10 a 50% do volume de estoque.

$$\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \frac{QPT_{ctp}}{dens_{cp}} + \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \left(\frac{QE_{c\{[-H(t-1)+1]T+t-1\}p} + QEx_{c\{[-H(t-1)+1]T+t-1\}p}}{dens_{cp}} \right) - \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \frac{QQ_{ctp}}{dens_{cp}} \geq estseg \cdot cap2, \forall t \quad (30)$$

- QPT_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível que será sujeita a cada pré-tratamento em cada período;
- $dens_{cp}$ (kg/m³): densidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento;
- QE_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento presente no estoque principal em cada período;
- QEx_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento presente no estoque extraordinário em cada período;
- QQ_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento que será disponibilizada ao estoque auxiliar para queima na caldeira durante cada período;

- estseg: fração de estoque de segurança suficiente para atender a uma parcela da demanda térmica em qualquer período;
- cap2 (m³): capacidade nominal do estoque principal.

3.6.14 13ª Restrição

A 13ª Restrição considera um limite de capacidade do estoque extraordinário:

$$\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \frac{QEx_{ctp}}{dens_{cp}} \leq cap3, \forall t \quad (31)$$

- QEx_{ctp} (kg): quantidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento presente no estoque extraordinário em cada período;
- dens_{cp} (kg/m³): densidade de cada combustível sujeito a cada pré-tratamento;
- cap3 (m³): capacidade nominal do estoque extraordinário.

3.6.15 14ª Restrição

A 14ª restrição diz respeito ao limite de capacidade de transporte, limitando a quantidade de combustível a ser transportada de acordo com a capacidade disponibilizada pela transportadora.

$$\sum_{c=1}^C \sum_{f=1}^F QC_{ftcg} \leq cap1_{gt}, \forall g, t \quad (32)$$

- QC_{ftcg} (kg): quantidade de cada combustível que cada transportador transportará de cada fornecedor ao estoque em cada período;
- cap1_{gt} (kg): capacidade de transporte de cada transportadora em cada período.

3.6.16 15ª Restrição

A 15ª restrição leva em consideração a existência de uma compra mínima do fornecedor, limitando a quantidade a ser comprada, e, por conseguinte, transportada.

$$\sum_{g=1}^G QC_{ftcg} \geq cm_{fc}, \forall t, f, c \quad (33)$$

- QC_{ftcg} (kg): quantidade de cada combustível que cada transportador transportará de cada fornecedor ao estoque em cada período;
- cm_{fc} (kg): compra mínima de cada combustível em cada fornecedor em quaisquer períodos.

3.6.17 16ª Restrição

Analogamente, há uma restrição quanto à existência de oferta de combustível por fornecedor que limita a quantidade máxima a ser comprada, e, por conseguinte, transportada.

$$\sum_{g=1}^G QC_{ftcg} \leq o_{ftc}, \forall t, f, c \quad (34)$$

- QC_{ftcg} (kg): quantidade de cada combustível que cada transportador transportará de cada fornecedor ao estoque em cada período;
- o_{ftc} (kg): oferta de cada combustível por cada fornecedor em cada período.

3.6.18 17ª Restrição

Por último, diante da necessidade manifestada pela usina foi criada uma restrição adicional que refletisse a disposição de resíduos florestais previamente contratados à operação da usina (cavaco de madeira inicialmente), garantindo que anualmente fossem totalmente consumidos na queima da caldeira.

$$\sum_{g=1}^G \sum_{t=1}^T QC_{ftcg} \geq mrf_f, \forall f = 1, \dots, F \quad (35)$$

$c = 1$ (resíduos florestais – cavaco de madeira)

- QC_{ftcg} (kg): quantidade de cada combustível que cada transportador transportará de cada fornecedor ao estoque em cada período;
- mrf_f (kg): montante anual contratado de resíduos florestais de cada fornecedor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção foram apresentados e discutidos os resultados do estudo que culminaram nesta dissertação. É composta pelas subseções que dizem respeito à caracterização das biomassas, às condições gerais do estudo, à avaliação da cadeia produtiva como um todo, da logística, das condições meteorológicas, bem como pelo desenvolvimento do modelo.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS BIOMASSAS

Os resultados exibidos na Tabela 1 foram obtidos na literatura através da base de dados holandesa para biomassas Phyllis (administrada pelo Centro de Pesquisas Energéticas da Holanda), utilizando-se na busca as palavras “napier grass”, “empty fruit bunches palm oil”, “mesocarp fiber palm oil”, “wood chips” e “sawdust” (sendo estes dois últimos as opções aqui disponíveis para resíduos florestais). Nela são disponibilizadas informações sobre a composição de diferentes biomassas, incluindo valores de poder calorífico analisado e calculado (segundo a correlação de Milne). Na Tabela 2, dados sobre o teor de Cloro (% massa b. s.) foram fornecidos por pesquisadores do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) que analisaram as biomassas de Cacho vazio de dendê, Fibra de palma de dendê, Capim-elefante e Pó de serragem, como uma das possibilidades de resíduos florestais.

Tabela 1 – Dados de composição das biomassas

Composição	Biomassas				
	Capim-elefante ¹	Cachos vazios de dendê ²	Fibras de palma de dendê ²	Resíduos florestais (cavaco de madeira) ³	Resíduos florestais (pó de serragem) ⁴
Umidade (%)	-	57,20	37,20	-	4,82
Cinzas (%)	5,70	5,12	2,08	1,90	1,33
C (%)	45,20	45,53	46,92	49,6	48,81
H (%)	6,00	5,46	5,89	6,00	6,13
O (%)	43,10	43,40	42,66	42,08	43,47
N (%)	0,00	0,45	1,12	0,40	0,10
S (%)	-	0,04	0,09	0,02	0,02

PCI (MJ/kg)	17,00	15,83	18,32	18,54	-
PCS (MJ/kg)	18,30	17,02	19,61	19,85	20,23
PCS _{Milne} (MJ/kg)	18,09	17,41	18,49	19,72	19,5

Fonte: ¹GAUR, S.; REED, T. B. Thermal data for natural and synthetic fuels. New York: Marcel Dekker, 259 p., 1998 apud PHYLLIS2 (2022). ²UEMURA, Y.; OMAR, W. N.; TSUTSUI, T.; YUSUP, S. BT. Torrefaction of oil palm wastes, Fuel, v. 90, p. 2582-2591, 2011 apud PHYLLIS2 (2022).

³http://edv1.vt.tuwien.ac.at/AG_HOFBA/BIOBIB/Biobib.htm, 1997 apud PHYLLIS2 (2022).⁴ PHYLLIS2 (2022).

Tabela 2 – Teor de cloro das biomassas

Teor de Cloro (% massa b. s.)			
Cacho vazio de dendê	Fibra de palma de dendê	Pó de serragem	Capim-elefante
0,30	0,40	0,031	0,488

Fonte: do próprio instituto IPT (2022).

Tendo em conta as composições apresentadas é possível observar baixos teores de enxofre, menores que os valores recomendados na faixa recomendada por Van Loo e Koppejan (2008), que seria < 0,1% (b. s). Quanto ao cloro, análises conduzidas pelo IPT permitem observar menor teor no resíduo florestal disponibilizado (para além do menor teor de S e cinzas) ao passo que o capim-elefante, como já pontuado, apresenta maior concentração deste inorgânico. Tais observações são importantes quando se pensa em previsão à corrosão pela utilização das biomassas citadas, em complemento a poderes caloríficos similares.

4.2 LEVANTAMENTO DAS CONDIÇÕES GERAIS PARA O ESTUDO

As condições elencadas como relevantes na metodologia foram apresentadas e discutidas a seguir.

4.2.1 Estimativa de massa de combustível

Como descrito anteriormente, a demanda térmica da caldeira consiste em 68929,4 kW. De acordo com o memorial descritivo da caldeira, a eficiência térmica (ou de combustão)

mínima é de 83%. Notando que o Poder Calorífico Inferior de referência neste mesmo memorial é de 9623,2 kJ/kg, tem-se a seguinte vazão mássica de combustível requerida:

$$\dot{m}_c = \frac{68929,4 \frac{kJ}{s}}{0,83 \times 9623,2 \frac{kJ}{kg}} = 8,6299 \frac{kg}{s} \times \frac{3600s}{1h} = 31.067,7 \text{ kg/h ou } 31 \text{ t/h}$$

Muito embora este valor de PCI não condiga com os valores encontrados na literatura e dispostos na seção 4.1, representando apenas cerca da metade do conteúdo energético (9,6 MJ/kg), foi utilizado para o cálculo de massa de combustível de acordo com o memorial descritivo. Na restrição de queima do modelo de otimização, a demanda térmica permanece inalterada e é crucial para quantificar os combustíveis. No caso de serem instaladas outras caldeiras, a metodologia a ser adotada para o cálculo é a mesma.

4.2.2 Capacidade de armazenamento

A necessidade diária volumétrica de biomassa foi de cerca de 830 m³ (5810 m³ de biomassa por semana), quando se leva em consideração a menor densidade absoluta relatada e um armazenamento único de biomassa.

$$\dot{m}_c = \frac{68929,4 \frac{kJ}{s}}{0,83 \times 18400 \frac{kJ}{kg}} = 4,5134 \frac{kg}{s} \times \frac{3600s}{1h} = 16248,42 \frac{kg}{h} \times \frac{24h}{1d} = 389962,08 \frac{kg}{d}$$

$$\dot{V}_c = \frac{389962,08 \frac{kg}{d}}{470 \frac{kg}{m^3}} \cong 830 \frac{m^3}{d}$$

4.2.3 Corrosão

A prevenção da corrosão foi contemplada no estudo através da inclusão dos teores de enxofre e de cloro de forma individual, e concomitante (através do teor de previsão de corrosão), em três restrições do modelo que devem ponderar tais elementos na composição da mistura das biomassas. O modelo vislumbrava ainda contemplar o teor de álcali, evitando assim a formação de incrustações através da consideração do teor de óxidos alcalinos por unidade de energia de combustível (PCS). Entretanto sua restrição recaiu em uma condição não linear,

indesejável neste momento. De acordo com Bynum *et al.* (2021), expressões lineares nos problemas de programação são preferíveis a alguns autores por resultar em soluções cujo esforço computacional geralmente é menor.

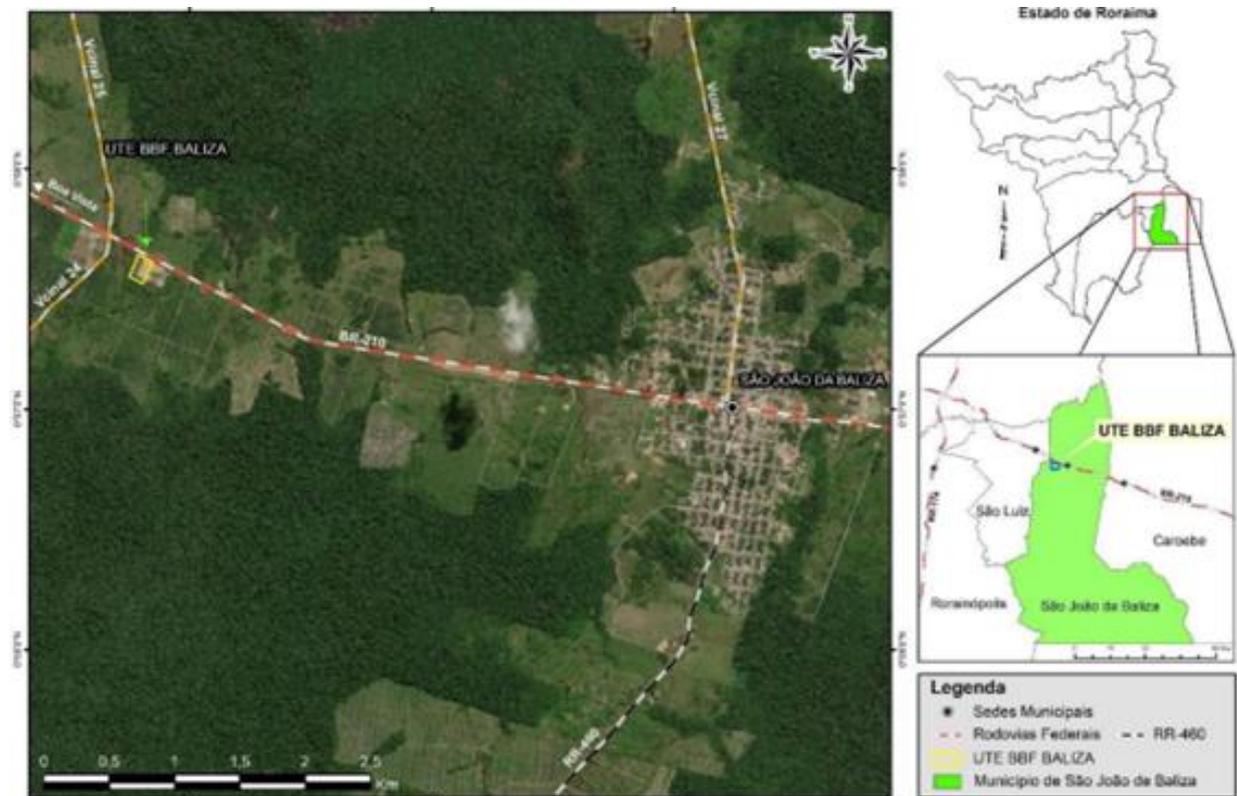
4.3 AVALIAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA DA BIOMASSA

O fluxo de processo produtivo de energia através de biomassas foi discriminado conforme a realidade da usina.

4.3.1 Visão geral da usina

A usina termelétrica fica localizada no município de São João da Baliza, no estado de Roraima, conforme ilustra a Figura 13. Está estrategicamente ao lado da usina de beneficiamento de palma, sendo próxima aos locais de pré-viveiro, viveiro, à subestação SE São João da Baliza e à esmagadora de palma (BRASIL, 2021).

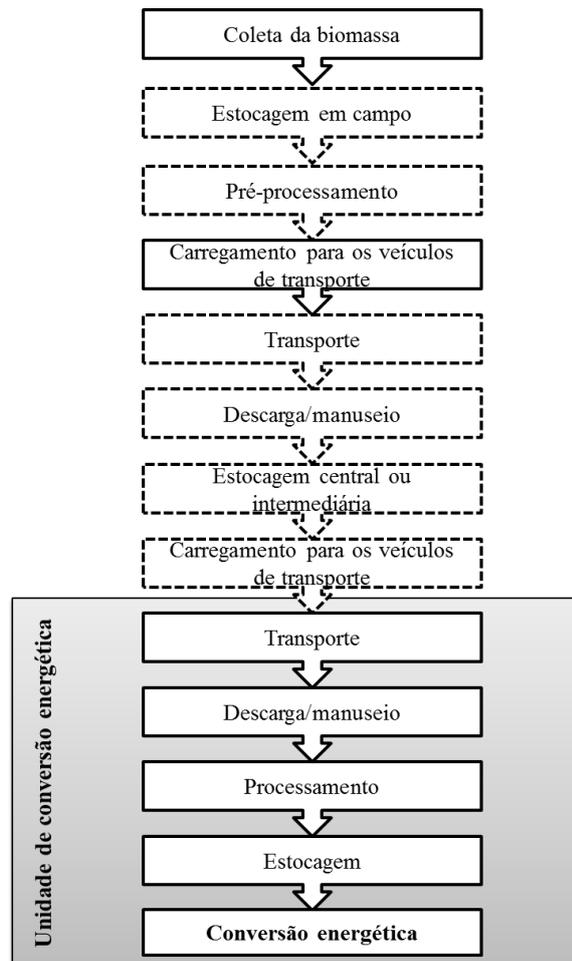
Figura 13 – Localização da usina



Fonte: Ambiental (2020) apud Brasil (2021).

No geral, a cadeia de suprimentos de biomassa envolve etapas como recebimento de matérias-primas, colheita, estocagem, transporte, pré-processamento e conversão (WANG *et al.* 2020), podendo haver ainda pesagem, amostragem para análise, moagem, com eventual lixiviação, secagem, peletização e ensacamento. Operações unitárias de lavagem e peneiramento podem ser aplicadas para limpeza de sólidos como areia. Antes da conversão ou até mesmo do transporte pode-se fazer necessário estocagem em galpão. As manutenções envolvidas incluem: preparação do solo e plantação, cultivo, colheita e manuseio (RENTIZELAS, 2009). Segundo Annevelink *et al.* (2017), não necessariamente se precisa pré-tratar a biomassa para aumentar sua densidade aparente antes de transportá-la localmente até à estocagem (distâncias menores que 30 km). A estrutura típica da cadeia produtiva de biomassas é apresentada na Figura 14 de acordo com Rentizelas (2013), que a resumiu em etapas gerais. Nela, algumas etapas aparecem tracejadas, pois não constam em todos os processos, tendo cada um suas especificidades.

Figura 14 – Estrutura típica da cadeia produtiva de biomassas



Fonte: Rentizelas (2013).

A estocagem faz-se necessária devido aos períodos de indisponibilidade de biomassa, limitando-a à época das safras e colheitas, bem como às condições climáticas. A sazonalidade de biomassas só deixa de ser algo que precisa ser alvo de preocupação quando se tem disponibilidade durante todo o ano, o que na prática é raro, mas minimiza-se com a utilização de resíduos diversos (RENTIZELAS, 2013).

Idealmente a densificação precede o transporte, porém não se encontra viabilizada ainda dentro da realidade da usina, bem como a lixiviação, podendo ser incorporadas no futuro. Sendo assim, na cadeia estabelecida tem-se que as biomassas de fibra e cacho de palma de dendê são coletadas, armazenadas em pátio após esmagamento, pesagem e análise de umidade; o capim-elefante é colhido com uso de máquina automotriz ou forrageira, pesado, analisado quanto à umidade e armazenado em pátio. Já os resíduos florestais são comprados de terceiros e coletados para transporte, pesagem, análise quanto à umidade, e armazenamento.

Reforça-se a necessidade de inspeção visual através de amostragem da biomassa na entrega à usina, cujos contratos com os fornecedores devem prezar idealmente pelo conteúdo energético e pela padronização de parâmetros de qualidade como tamanho das partículas, umidade, conteúdo de cinzas, etc., de forma a evitar o recebimento de materiais fora de especificação (VAN LOO; KOOPEJAN, 2008).

Segundo Agroindústria (2021), 5,4 mil ha de palma de dendê sustentável foram plantados na região em 2008, para aproveitamento industrial: beneficiamento do óleo (produção de óleo para biodiesel) e geração de energia em usina termelétrica. Conforme a termelétrica, além de São João da Baliza, está previsto que o município paraense Acará forneça resíduos do dendê.

De acordo com ela, de junho a julho de 2022 também foram utilizados cerca de 10 ha para plantio de capim elefante, com expectativa de evolução para 1.100 ha até março de 2023 para além de resíduos de madeireiras licenciadas obtidos no entorno (cavaco de madeira).

4.3.2 Custos de densificação e lixiviação

Ao mesmo tempo em que o pré-tratamento agrega despesas, traz benefícios econômicos na medida em que reduz custos de estocagem, transporte e manuseio, por aumentar a densidade energética, melhorando a qualidade do combustível, pela redução de impurezas e homogeneização da alimentação do sistema de combustão (VAN LOO, KOOPEJAN, 2008).

Tais etapas permanecem em estudo pela usina e uma vez implementadas, precisam munir o modelo através de parâmetros estimados. Os custos envolvidos no pré-tratamento de

densificação alteram consideravelmente de acordo com o país e o consumo energético envolvido. Segundo Zeevalkink e Van Ree (2000) apud Van Loo e Koppejan (2008), na Holanda, o consumo energético por tonelada de biomassa briquetizada ou peletizada pode variar de 15 a 80 kWh, o que totalizaria cerca 7,5 a 25 euros por tonelada de biomassa. Para Quirino (2007) apud Rocha (2011), o custo energético considerado para a peletização é de 60 kW/t. Já a produtividade pode variar entre 100 kg/h e 10 t/h. No modelo, o custo deve refletir o gasto energético que diz respeito ao equipamento a ser utilizado na usina. Nesse custo pode estar embutido custo com secagem ou não, a depender da necessidade da biomassa em questão. Van Loo e Koppejan (2008) recomendam uma umidade de cerca de 10% na biomassa para realização de peletização ou briquetagem, exemplificando o caso da peletização de madeira, cuja umidade deve estar entre 8 e 12%. No caso de briquetagem, é citada uma faixa entre 12 e 14% de umidade.

Levando em conta a análise econômica feita por Králík *et al.* (2020), através de modelagem da cadeia de produção de pellets de madeira, do cultivo à peletização, na República Tcheca, tem-se um custo de 7,85 a 8,55 euros por GJ produzido. O estudo considerou preços relativos ao ano de 2018. Tendo em vista que o euro apresentou na época um valor médio de 4,3067 (EUR/BRL Dados Históricos, 2021), seria equivalente dizer que em média gastou-se no período 33,81 a 36,82 reais para cada GJ fornecido pelo pellet.

A secagem geralmente dá-se pela transferência de umidade para uma corrente de ar aquecido, com baixa umidade, e envolve quantidades de energia altas e eficiências baixas. Pode-se usar ar pré-aquecido com energia solar ou vapor residual. Sugere-se secagem ao sol do capim-elefante, viabilização da secagem das demais biomassas residuais e avaliação da eficiência da caldeira. De acordo com Caillat e Vakkilainen (2013), a secagem pode ser feita antes ou depois da fragmentação, havendo cerca de 5 a 10% de perda mássica e elevação de temperatura com uma pequena probabilidade de autoignição, quando feita posteriormente.

Com relação à lixiviação, Meesters *et al.* (2018) estimaram um custo aproximado de 8 US\$/t (6,5 €/t) para uma usina de dendê com capacidade de extração da escala de 40.000 t de biomassa seca. Os autores observaram uma redução de cerca de 80% dos teores de Cl e K de cachos vazios de dendê através da lixiviação por 4 lavagens consecutivas com água fresca na duração de 30 minutos. Revelou-se uma perda mássica de aproximadamente 6% e a necessidade de 5,4 L de água por kg de biomassa, para um sistema em contracorrente. A reutilização de água é almejada em virtude dos grandes volumes necessários à lixiviação, podendo o descarte ser utilizado para irrigação. Os autores perceberam um aumento do teor de cálcio e fosfato nas cinzas, reforçando a complexidade envolvida com a predição das cinzas.

4.3.3 Descrição do processo

A planta opera de acordo com o ciclo termodinâmico de Rankine. As turbinas responsáveis por gerar energia (9,8 MW) são alimentadas pelo vapor produzido pela caldeira. A caldeira vertical radiante de tiragem balanceada foi contruída pela C. B. Serv. e está sendo comissionada em 2023. Como pincelado anteriormente no cálculo da demanda térmica, através do memorial descritivo, por projeto, é capaz de produzir 92 t/h de vapor com temperatura de 380°C, à pressão de 2,059 MPa (21 kgf/cm²) e consome cerca de 31 t/h de combustível. A biomassa de referência neste memorial contém 52,00% de umidade, 22,27% de C, 3,05% de H₂, 21,18% de O₂ e 1,50% de cinzas, 2800 kcal/kg de PCS e 2300 kcal/kg de PCI. O excesso de ar teórico referido é na média de 35% e a eficiência da caldeira, 83% ao PCI.

Em suma, os gases de combustão geram vapor através de três superfícies de transferência de calor, antes de serem lançados na atmosfera (SILVA, 2021). Na caldeira em questão, esses gases saem da fornalha com cerca de 750/770°C numa vazão mássica de 146630 kg/h, gerando vapor aquecido no evaporador, seguem para o superaquecedor (zona de radiação), onde resfriam até 557°C, passam pelo feixe de convecção a cerca de 320/340°C, pelo pré-aquecedor de ar (200/210°C), aquecendo o ar de 27/30°C para 231/235°C, para então passar pelo economizador que poupa a energia de aquecimento da água desmineralizada de 115/120°C até 140°C, saindo a cerca de 160°C. para o lavador de gases. Tal descrição está alinhada com as perdas de carga do memorial descritivo.

A energia gerada pode ser utilizada na usina, ou ainda ser exportada pela distribuidora do Estado de Roraima (RR). De acordo com Lima (2014), a venda do excedente energético das indústrias é economicamente atraente, valorizando a matriz energética do país.

4.4. AVALIAÇÃO DA LOGÍSTICA DA REGIÃO

Segundo relatos da usina, os fornecimentos próprios de fibra e cacho de palma e capim elefante encontram-se em fazendas dentro de um de raio 50 km enquanto os resíduos florestais são fornecidos por madeireiras que distam 15 km a 130 km da usina. A partir destas informações, afirma-se que dentro das classificações dos modais de transportes existentes, o mais pertinente para o transporte das biomassas é o rodoviário, através de caminhões e carretas (Figura 15). A indicação está atrelada às distâncias médias e curtas.

Figura 15 – Transporte rodoviário



Fonte: Nunes *et al.* (2020).

Inicialmente propôs-se estabelecer rotas otimizadas de transporte com base em recursos como Open Street Map, Google Maps e mapas disponibilizados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, coletando o endereço das madeireiras a partir do seu registro de CNPJ. Entretanto, na falta de informações mais detalhadas sobre as madeireiras contratadas, esse método mostrou-se ineficaz e moroso. Portanto, supôs-se que os próprios fornecedores e transportadores, com sua expertise no seu ramo em sua região, poderiam fornecer uma planilha com dados relevantes como estoque disponível para aquisição, transportadores, e custo de transporte de cada biomassa por distância, isto é, custo de transporte para cada quilo de biomassa por quilômetro.

O fato das estradas da região de São João da Baliza (Estado de RR) serem na sua maioria vicinais, com vias rurais, faz necessário o levantamento de um fator de perda no transporte, a ser calculado de acordo com a quantidade de biomassa a ser transportada de cada fornecedor e a quantidade demandada durante a produção. Com a pesagem na entrada da usina, o modelo admite este fator de perda como nulo.

Dado que os fornecimentos próprios de resíduos de dendê e capim elefante podem induzir a uma vantagem logística com relação à distância e perdas decorrentes do transporte, o modelo poderia preferir seu uso. Entretanto, para além da questão de eficiência energética, entre outros aspectos, o modelo deverá enxergar a sazonalidade inerente a tais biomassas.

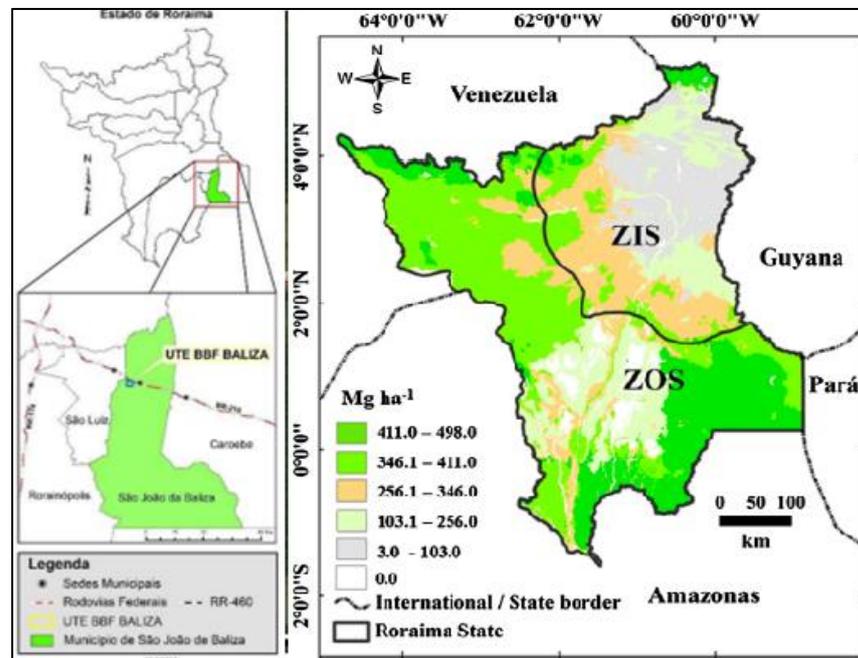
4.5 AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS

As condições climáticas têm influência direta sobre o cultivo e a umidade das biomassas, impactando tanto nos custos com tratamento, através de secagem, quanto na logística, visto que as estradas vicinais podem ser afetadas de acordo com o período. Conforme Silva (2021), foi possível perceber uma variação de 41,64%, no mês de fevereiro (inverno), para 23,26% no mês de agosto (verão), na média de umidade das biomassas provenientes de resíduos florestais de eucalipto, em Portugal.

O estado de Roraima está submetido a um clima tropical-equatorial, ou tropical úmido. Isso permite dizer que as condições locais são de muito calor e umidade, nas regiões norte, sul e oeste do território, enquanto há uma estação seca mais definida, com menor índice de chuvas, na região leste. A temperatura média anual fica em torno de 24°C (GEOGRAFIA, 2022).

O clima do município de São João de Baliza (cerca de 290 km da capital Boa Vista) configura-se como “Af” (clima de floresta úmida) segundo a Classificação de Köppen: mescla uma vegetação oligotrófica (campina e campinarana), adaptada à limitação de nutrientes e às inundações ou elevação do lençol freático com floresta ombrófila, do sudoeste e extremo noroeste de Roraima. Este estado da Amazônia possui duas zonas fitoclimáticas que se distinguem pela existência de influência das savanas (ZIS e ZOS), estando o município fora da zona dessa influência (ZOS, como pode ser visto na Figura 16), com precipitações que vão de 2.000 a 3.000 mm/ano e 1-5 meses de período seco no ano (BARNI *et al.* 2016). Na mesma figura é possível ver a distribuição de biomassas em Mg/ha num mapa de referência.

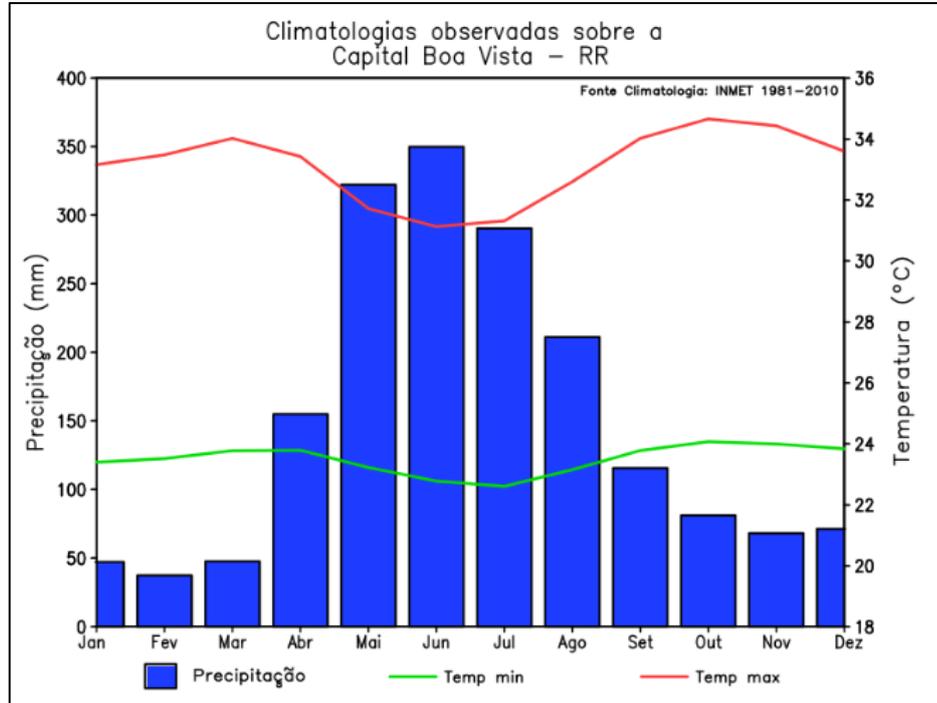
Figura 16 – Mapa do estado de Roraima que mostra a localização de São João da Baliza, a divisão das zonas fitoclimáticas (ZIS – zona sob influência da savana e ZOS – zona sem influência da savana) e distribuição de biomassas no estado (Mg/ha)



Fonte Brasil Biofuels (2021) e Barni (2016).

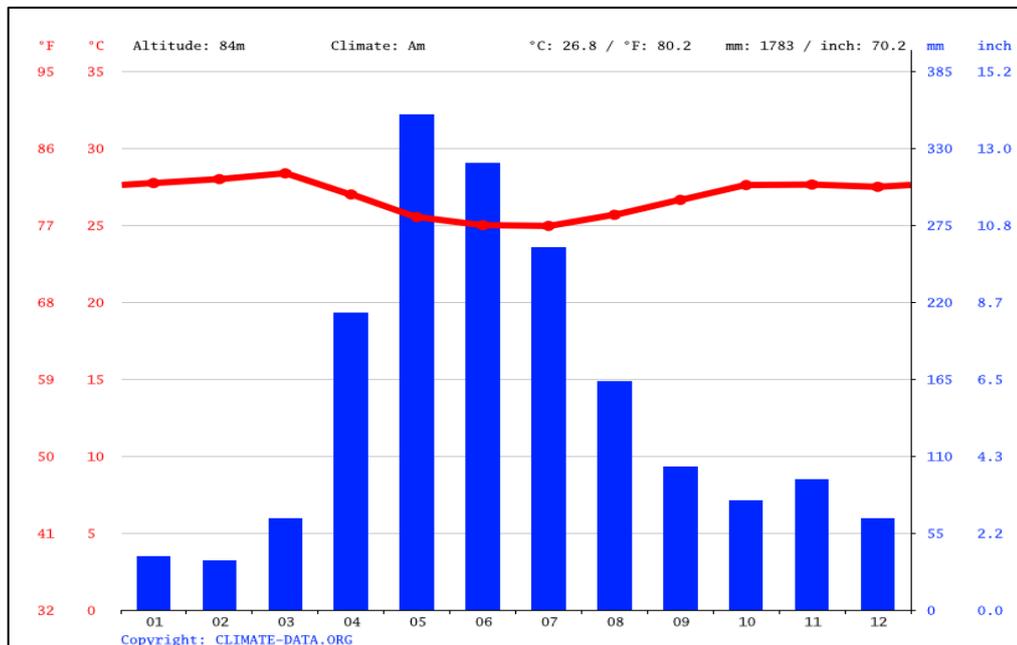
Com base na capital do estado, e estendendo tais condições para São João da Baliza, apresenta-se o comportamento pluviométrico da região através de meteogramas (distribuição gráfica de parâmetros meteorológicos em intervalos de tempo predefinidos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE) com dados de trinta anos (Figura 17), dos quais pode-se inferir sobre a sazonalidade das chuvas da região, com taxas de temperatura e médias anuais. Em seguida, na Figura 18, consta o meteograma do ano de 2021. É notável a divergência entre os meses chuvosos (maio, junho e julho) e os meses secos (dezembro, janeiro e fevereiro).

Figura 17 – Meteograma: precipitação e temperaturas médias de 1981 a 2010 em Boa Vista (RR)



Fonte: Monitoramento, 2022.

Figura 18 – Meteograma: temperatura e precipitação do ano 2021 em Boa Vista (RR)



Fonte: CLIMATE-DATA.ORG (2022).

Com relação às temperaturas, vê-se médias (ano 2021) com temperaturas mínimas na faixa de 22°C a 26°C, e máximas entre 32°C e 34°C. Boa Vista tem variação sazonal moderada

na sensação de umidade. O período mais abafado do ano dura 9,5 meses, de 1 de abril a 17 de janeiro, no qual o nível de conforto é abafado, opressivo ou extremamente úmido pelo menos em 87% do tempo. O mês com mais dias abafados em Boa Vista é julho, com até 31,0 dias abafados. O mês com menos dias abafados em Boa Vista é fevereiro, com 23,3 dias abafados ou pior (CLIMA, 2022). Logo, infere-se que este será o período de maior atenção no que se refere aos impactos sobre todo o processo, desde o transporte das biomassas, até os pré-tratamentos e estocagem.

Sendo assim, o modelo reflete indiretamente a influência meteorológica/climática através da variação inerente aos parâmetros: oferta e custo de aquisição dos combustíveis fibra de dendê, cacho vazio de dendê e capim-elefante; distância das rotas entre os fornecedores e o estoque e por conseguinte, custo de transporte e fator de perda, principalmente nos meses de maio a agosto quando há aumento de chuvas; poder calorífico, devido à variação da umidade; custo de pré-tratamentos, pois períodos chuvosos (terceiro trimestre) elevam o custo com secagem; limite de tempo de estocagem, para evitar apodrecimento em virtude do aumento da umidade relativa do ar; bem como a umidade dos próprios combustíveis.

Contudo, devido às mudanças climáticas mundiais, o estudo deve buscar atualização anual no intuito de manter as previsões sobre os parâmetros fidedignas.

4.6 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO

Uma vez concebido, o modelo matemático de otimização criado para subsidiar a tomada de decisão pode ser resumido no Quadro 1 abaixo pela função objetivo e as 17 restrições que o compuseram.

Quadro 1 – Resumo do modelo de otimização	
$\text{Min } C = \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \left(c1_{ftc} \sum_{g=1}^G QC_{ftcg} \right) + \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T \left\{ d_{ft} \left[\sum_{g=1}^G \left(c2_{ftg} \sum_{c=1}^C QC_{ftcg} \right) \right] \right\}$ $+ \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \left(c3_{cp} \sum_{t=1}^T QPT_{ctp} \right) + \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \left(\frac{c4 \cdot QE_{ctp} + c5 \cdot QEx_{ctp}}{dens_{cp}} \right)$	
$QC_{ftcg}, QPT_{ctp}, QE_{ctp}, QEx_{ctp}, QQ_{ctp} \geq 0$	$\frac{\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P (CO_c \cdot QQ_{ctp})}{\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P QQ_{ctp}} \leq 1300 \text{ mg/Nm}^3, \forall t$
$\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P QQ_{ctp} [pci_{cp} (1 - u_{ctp})] eff_{cp} \geq dem_t, \forall t$	$\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \frac{QQ_{ctp}}{dens_{cp}} \leq cap4, \forall t$

$\frac{\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P (u_{ctp} \cdot QQ_{ctp})}{\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P QQ_{ctp}} < 0,52, \forall t$	$\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \frac{QPT_{ctp}}{dens_{cp}}$ $+ \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \left(\frac{QE_{c\{-H(t-1)+1\}T+t-1\}p} + QEx_{c\{-H(t-1)+1\}T+t-1\}p}{dens_{cp}} \right)$ $- \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \frac{QQ_{ctp}}{dens_{cp}} \leq cap2 + cap3,$
$(1 - perd_{ctg})QC_{ftcg} = \sum_{p=1}^P QPT_{ctp}, \forall f, t, c, g$	$\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \frac{QPT_{ctp}}{dens_{cp}}$ $+ \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \left(\frac{QE_{c\{-H(t-1)+1\}T+t-1\}p} + QEx_{c\{-H(t-1)+1\}T+t-1\}p}{dens_{cp}} \right)$ $- \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \frac{QQ_{ctp}}{dens_{cp}} \geq estseg.cap2, \forall t$
$QPT_{c\{-H(t-tpt_{cp})+1\}T+t-tpt_{cp}\}p} \leq B, \forall c, p, t$ <p>B: $\sum_t^{t+tes_{cp}-1} QQ_{ctp}$, se $t + tes_{cp} \leq T$</p> $\sum_t^T QQ_{ctp} + \sum_1^{t+tes_{cp}-T-1} QQ_{ctp}$, se $t + tes_{cp} > T$	$\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \frac{QEx_{ctp}}{dens_{cp}} \leq cap3, \forall t$
$\frac{\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P (S_{cp} \cdot QQ_{ctp})}{\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P QQ_{ctp}} < 0,001, \forall t$	$\sum_{c=1}^C \sum_{f=1}^F QC_{ftcg} \leq cap1_{gt}, \forall g, t$
$\frac{\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P (Cl_{cp} \cdot QQ_{ctp})}{\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P QQ_{ctp}} < 0,002, \forall t$	$\sum_{g=1}^G QC_{ftcg} \geq cm_{fc}, \forall t, f, c$
$\frac{\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P (S_{cp} \cdot QQ_{ctp})}{\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P (Cl_{cp} \cdot QQ_{ctp})} > 4,2, \forall t$	$\sum_{g=1}^G QC_{ftcg} \leq o_{ftc}, \forall t, f, c$
$\sum_{g=1}^G \sum_{t=1}^T QC_{ftcg} \geq mrf_f, \forall f = 1, \dots, F$	

Fonte: A Autora (2023).

Aqui, salienta-se o enfoque dado à corrosão como diferencial dos demais modelos encontrados na literatura, conferindo complexidade e uma abordagem mais completa da questão. A metodologia de elaboração permeia aspectos operacionais, ambientais e sobretudo, logísticos, com objetivo econômico. Nesse caso, a modelagem também constitui resultado da pesquisa desenvolvida.

No caso da ambiental (9ª restrição), surge em complemento às demais restrições de combustão, pois emissões são reflexo de reações incompletas de combustão, composição das

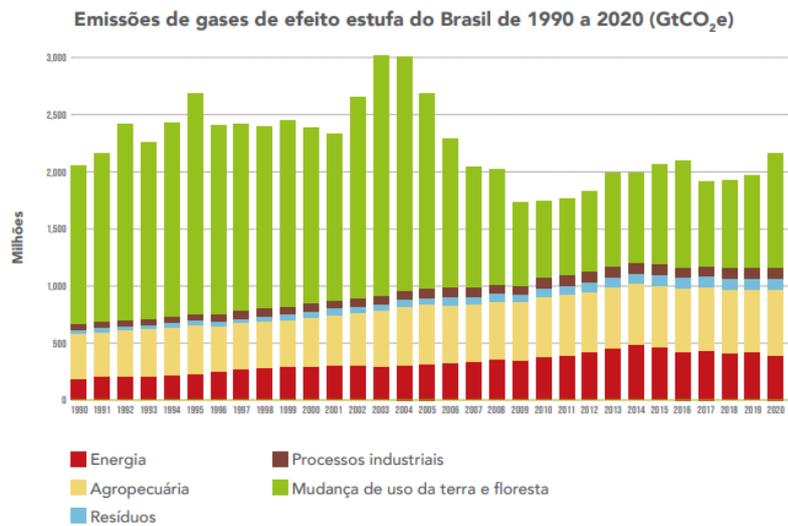
biomassas e ajustes operacionais da caldeira (baixo excesso de ar, mistura inadequada dos reagentes, baixo tempo de residência e temperatura de combustão), bem como da tecnologia utilizada. De acordo com Narnaware e Panwar (2022), a gaseificação, por exemplo, é capaz de superar em cerca de 35% o desempenho da combustão direta para geração de eletricidade, tanto do ponto de vista emissivo, quanto de eficiência.

Segundo Campos, Rosa e Borga (2017), com a redução do teor de umidade da biomassa, observa-se menor emissão de dióxido e monóxido de carbono. Ao mesmo tempo, a redução de cloro através de lixiviação é capaz de evitar emissões nocivas à saúde, como no caso relatado por Saidur *et al.* (2011) de biomassas residuais que continham cloro, metais pesados e compostos orgânicos tóxicos como dioxinas.

Reforça-se a importância de se incluir a questão ambiental no modelo pela demanda crescente por sustentabilidade, muito embora a otimização da cadeia de biomassas residuais contribua para isso. De acordo com Speight (2022), o aproveitamento de biomassas residuais para conversão energética por si só atua para redução de emissões de gases de efeito estufa através da substituição de combustíveis fósseis na geração de calor e energia elétrica e da diminuição de emissões de metano de aterros sanitários e do aproveitamento de resíduos.

Tem-se também preconizado na cadeia de fornecimento o licenciamento das madeiras de onde os resíduos florestais provêm, num cenário roraimense em que ainda há desmatamento, incêndios florestais e registro seletivo. Segundo Barni *et al.* (2016), no período de 2005 a 2010 a Amazônia como um todo apresentou redução nas suas taxas de desmatamento, em contrapartida à tendência do estado de Roraima, sobretudo por fatores locais como fiscalização ambiental negligente e da prevalência de grilagem. Logo, reforça-se o caráter ambiental da modelagem na área energética por essa questão e também pelo aumento na tendência de emissões desse setor como demonstra a Figura 19. O aquecimento global, combinado com a mudança local do uso da terra, sem práticas de sustentabilidade florestal, pode transformar, segundo Nepstad *et al.* (2008) apud Brandão (2021), a floresta amazônica de sumidouro em fonte de carbono atmosférico.

Figura 19 – Emissões do Brasil de gases de efeito estufa em termos de setores de 1990 a 2020.



¹ Segundo estimativas do Global Carbon Project, a redução foi de 6,7%. Ver https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/20/files/GCP_CarbonBudget_2020.pdf

² Todas as referências a gás carbônico equivalente (CO₂e) neste documento, exceto quando explicitamente especificado de outra forma, referem-se a GWP-AR5 ou o potencial de aquecimento global em 100 anos do 5º relatório do IPCC.

Fonte: Potenza *et al.* (2022)

Ao mesmo tempo, podem ser despendidas emissões com combustíveis fósseis nas etapas de colheita, processamento e transporte. Por isso é inconclusivo e polêmico taxar a produção de biomassa como neutra em carbono, é preferível cunhar seu potencial. De acordo com Brown (2019), há um lapso temporal entre a liberação e a retirada de CO₂ da atmosfera que não leva em consideração fatores como taxa de crescimento das árvores, taxa de decomposição da biomassa, tempo de rotação e mudança no uso da terra, reduzindo-os à suposição de regime estacionário de que emitir uma grande quantidade de poluente de uma só vez tem o mesmo impacto que emitir lentamente a mesma quantidade de poluentes em um determinado intervalo de tempo.

Sendo assim, no modelo apresentado, para além da restrição, está expresso o desejo de redução da poluição através da minimização dos custos com transporte. Futuramente pode-se incorporar ao modelo subsídio ou compensação de custos através do replantio de florestas, bem como utilização do próprio biodiesel da usina como parte do combustível da frota veicular que transportará as biomassas. Ademais, há possibilidade de aproveitamento das cinzas como fertilizantes evitando o descarte ambiental e melhorando o ciclo de reaproveitamento com eventual fonte de receita.

De acordo com Cruz *et al.* (2019), cinzas de biomassas podem ser recicladas ambientalmente em solos como fertilizantes ou para correção de pH, construção de estradas ou incorporação em materiais cimentícios, no entanto, a aplicabilidade demanda estudos mais específicos acerca das propriedades das cinzas formadas durante a combustão.

Enquanto isso, a ferramenta desenvolvida para aplicação em indústria do ramo energético teve sua programação feita por equipe dedicada, em linguagem *Python*, utilizando-se *Visual Studio Code* (interface), *Pyomo* e planilhas do Excel por meio da biblioteca *Pandas* para abrigar os parâmetros inicialmente arbitrados por meio de consultorias. O *Pyomo* de acordo com Bynum *et al.* (2021) trata-se de uma plataforma *open source* onde é inserida linguagem de modelagem algébrica que especifica o modelo de otimização. Como solver utilizou-se o GLPK (GNU Linear Programming Kit), um pacote *open source* para resolução de problemas de programação linear de grande escala (LP) e programação inteira mista (MIP).

No geral, as resoluções de PL podem dar-se de três maneiras: através de métodos gráficos (para no máximo três variáveis de decisão), analíticos e o método simplex. O algoritmo ou método computacional utilizado pelo solver é derivado do simplex e envolve uma sequência de operações sistematizadas (MATOUŠEK; GÄRTNER, 2007; EISELT; SANDBLOM, 2007; BELFIORE; FÁVERO, 2013).

O programa foi elaborado por um membro da equipe, o mestrando Lucas Henrique Biuk, no quadro de desenvolvimento de sua dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa (UTFPR)/PR, 2023.

Basicamente, o algoritmo lê as planilhas onde os parâmetros foram alimentados, armazena-os para declaração das restrições e da função objetivo, cuja solução apontada pelo solver foi programada para gerar novas planilhas de resultados, com o intuito de auxiliar a gestão da usina.

Um modelo pode ser considerado válido se conseguir representar ou prever, com precisão aceitável, o comportamento do sistema em estudo (BELFIORE; FÁVERO, 2013). Os resultados preliminares apontaram nenhuma solução ótima factível, o que demandou inicialmente reconsiderar a ordem de grandeza dos parâmetros e a escrita da programação para tornar a solução factível e ótima. Como estratégia optou-se por reduzir a modelagem à função objetivo e restrições essenciais à cadeia de suprimento de biomassas, isto é, aquelas cuja existência garantissem o funcionamento logístico e operacional da usina para observação do comportamento do modelo em si e da solução apontada pelo solver.

Nesse sentido, foram elencadas as restrições 1^a, 2^a, 4^a, 5^a, 11^a, 12^a, 14^a e 16^a como essenciais, adotando-se as seguintes simplificações: fatores de alteração de propriedades como 1 (sem pré-tratamento), uso de biomassas secas, correspondendo à umidade 0,00%. Para além dessas alterações, fez-se necessário utilizar restrições adicionais que iguallassem a soma das quantidades de biomassas queimadas à soma das biomassas pré-tratadas, que por sinal, deve ser a mesma das biomassas estocadas. A seguir constam as ponderações feitas para arbitrar alguns dos parâmetros:

- $dem_t = 68.929,4 \text{ kJ/s} \times 60 \text{ s/min} \times 60 \text{ min/h} \times 24 \text{ h/dia} \times 7 \text{ dias/sem} = 41.688.501.120 \text{ kJ}$ (por semana, independente do período t, exceto nos últimos quatro períodos, pois a usina é paralisada para manutenção);

- PCI:

$$\text{Capim-elefante} = 17,15 \times 10^3 \text{ kJ/kg};$$

$$\text{Cachos de dendê} = 19,81 \times 10^3 \text{ kJ/kg};$$

$$\text{Fibras de dendê} = 18,91 \times 10^3 \text{ kJ/kg};$$

$$\text{Cavaco de madeira} = 18,71 \times 10^3 \text{ kJ/kg};$$

$cap1_{gt} = 4.000.000 \text{ kg}$ (estimado em 2 vezes a demanda estimada de combustível na semana, que é $2 \times 10^6 \text{ kg}$, independente do transportador e do período): $41.688.501.120 \text{ (kJ)}/20000 \text{ (kJ/kg aproximadamente)} = 2 \times 10^6 \text{ kg}$;

- Densidades:

$$\text{Capim-elefante} = 870 \text{ kg/m}^3;$$

$$\text{Cachos de dendê e fibras de dendê} = 470 \text{ kg/m}^3;$$

$$\text{Cavaco de madeira} = 200 \text{ kg/m}^3;$$

$cap2 = 16 \times 10^3 \text{ m}^3$ (estoque principal consegue suprir aproximadamente 4 semanas de biomassa com densidade de 500 kg/m^3 e PCI = 20.000 kJ/kg): $2 \times 10^6 \text{ kg} / 500 \text{ kg/m}^3 = 4000 \text{ m}^3/\text{semana}$;

- $cap3 = 16 \times 10^3 \text{ m}^3$ (estoque extraordinário analogamente também consegue suprir aproximadamente 4 semanas de biomassa com densidade de 500 kg/m^3 e PCI = 20.000 kJ/kg).

- Oferta proporcionada:

Capim elefante ~ $2.000.000 \text{ kg}/\text{disponibilização com 2 ao ano, distribuídas assim}$ (total resulta em 4000 t/ano):

- 500.000 kg nos períodos 1, 2, 3 e 4;
- 500.000 kg nos períodos centrais, i.e. 26, 27, 28 e 29;

Fibra de dendê ~ 800.000 kg/mês com disponibilização todas as semanas, i.e., 200.000 kg/período (total resulta em 9600 t/ano);

Cacho de dendê vazio ~1.250.000 kg/mês com disponibilização todas as semanas, i.e., 312.500 kg/período (total resulta em 15000 t/ano);

Cavaco de madeira ~ 71400 t / ano, distribuídos assim:

- nas semanas dos meses pares, ou seja, nos períodos: 5, 6, 7 e 8; 13, 14, 15 e 16; 21, 22, 23 e 24; 29, 30, 31 e 32; 37, 38, 39 e 40; 45, 46, 47 e 48; haverá disponibilização de 2.975.000 kg/período.

- $c1_{ftc}$:
 - 0,040 R\$/kg (cavaco de madeira, proveniente apenas de um fornecedor);
 - 0,065 R\$/kg (capim-elefante, proveniente apenas de um fornecedor);
 - 0,020 R\$/kg (fibra de dendê, proveniente apenas de um fornecedor);
 - 0,020 R\$/kg (cacho vazio de dendê, proveniente apenas de um fornecedor).
- d_{ft} :
 - havendo apenas um fornecedor para cada biomassa, independentemente do período:
 - 20 km, distância entre o fornecedor de capim elefante e a usina;
 - 50 km, distância entre o fornecedor de cavaco de madeira e a usina;
 - 15 km, distância entre o fornecedor de fibra de dendê e a usina;
 - 15 km, distância entre o fornecedor de cacho vazio de dendê e a usina.
- $c2_{ftg}$: independentemente do período:
 - 0,00050 R\$/km.kg (quando o fornecedor for de capim elefante, fibra de dendê ou cacho vazio de dendê e o transportador for a BBF);
 - 0,00020 R\$/km.kg (quando o fornecedor for de cavaco de madeira e o transportador for o chamado “terceirizado”);
- $c3_{cp}$: assumirá um valor nulo inicialmente.
- $c4$: 0,00625 R\$/m³ (assume-se um custo equivalente a R\$ 100 para um estoque com volume igual a $cap2$): R\$100/16000 m³.
- $c5$: 0,025 R\$/m³ (assume-se um custo equivalente a R\$ 400 para um estoque com volume igual a $cap3$): R\$ 400/16000 m³.

Uma vez funcional, foi possível obter a solução prévia de composição das biomassas a serem queimadas (Tabela 3) nas 52 semanas que compõem o ano para então se proceder com o amadurecimento do modelo com a reinserção das restrições restantes. Como pode ser observado, não foram direcionados para queima nem capim-elefante nem resíduo florestal

(cavaco de madeira). Isso pode ser atribuído à maior distância de transporte, bem como pelo maior custo do capim-elefante frente aos outros combustíveis cuja disponibilização já se encontra viabilizada e pelos PCI maiores das fibras e cachos, ambos de dendê. Diante do exposto, os resíduos de dendê mostram-se a melhor relação custo-benefício para atender a demanda. Na Tabela 3 é possível ainda contabilizar a composição da mescla de biomassas a partir da semana, como por exemplo nas semanas 1, 2, 3 e 4 do primeiro mês, equivalendo ao consumo mensal de 625 t de cachos de dendê e 9969,7 t de fibras de dendê.

Tabela 3 – Configuração de queima da caldeira de cada combustível (c) de acordo com a semana (t): valores obtidos para a variável de decisão QQ_{cp}

Período (semana)	Combustível (kg)			
	1 (capim-elefante)	2 (cachos dendê)	3 (fibras dendê)	4 (cavaco de madeira)
1	0	312500	2328741	0
2	0	0	2656114	0
3	0	29465,74	2625246	0
4	0	283034,3	2359609	0
5	0	0	2656114	0
6	0	0	2656114	0
7	0	29465,74	2625246	0
8	0	283034,3	2359609	0
9	0	0	2656114	0
10	0	0	2656114	0
11	0	29465,74	2625246	0
12	0	283034,3	2359609	0
13	0	0	2656114	0
14	0	29465,74	2625246	0
15	0	0	2656114	0
16	0	312500	2328741	0
17	0	0	2656114	0
18	0	0	2656114	0
19	0	0	2656114	0
20	0	312500	2328741	0

21	0	0	2656114	0
22	0	2535442	0	0
23	0	312500	2328741	0
24	0	0	2656114	0
25	0	0	2656114	0
26	0	0	2656114	0
27	0	312500	2328741	0
28	0	0	2656114	0
29	0	2535442	0	0
30	0	2016266	543886,3	0
31	0	0	2656114	0
32	0	2535442	0	0
33	0	2535442	0	0
34	0	0	2656114	0
35	0	0	2656114	0
36	0	0	2656114	0
37	0	312500	2328741	0
38	0	0	2656114	0
39	0	0	2656114	0
40	0	0	2656114	0
41	0	312500	2328741	0
42	0	0	2656114	0
43	0	0	2656114	0
44	0	312500	2328741	0
45	0	0	2656114	0
46	0	0	2656114	0
47	0	0	2656114	0
48	0	312500	2328741	0
49	0	0	0	0
50	0	0	0	0
51	0	0	0	0
52	0	0	0	0

Fonte: A Autora (2023).

No entanto, a manipulação dos valores de PCI, densidade, tempo de pré-tratamento e custo (c3), atribuídos ao tratamento de densificação para o cavaco de madeira, tornou possível a visualização de uma mistura composta pelas quatro biomassas, sendo ainda irrisórias as quantidades de capim-elefante e cavaco de madeira.

Resta saber se com as outras restrições estes cenários se mantêm. Até porque, manter a oferta sobrecarregada apenas por dois tipos de biomassas pode não condizer com a realidade. Para o caso descrito, o valor do custo anual minimizado (função objetivo) foi de R\$ 3.486.895,87. Levou-se 0,12 s para o solver encontrar a solução ótima. Neste estudo de caso, com $c = 4$, $f = 4$, $g = 2$, $p = 1$, $t = 52$, após a eliminação dos elementos nulos (8.529), geraram-se 1.517 restrições e 2.289 variáveis. Totalizou-se um consumo anual de 15.937,5 t de cachos de dendê e 11.0797,4 t de fibras de dendê.

Tendo em vista que a usina se encontra na etapa de condicionamento e partida, parâmetros mais realísticos acerca de custos em trabalhos futuros podem ser colhidos, abrindo a possibilidade de o modelo comportar-se diferente com relação às proporções de mistura inicialmente encontradas. Tal aprimoramento faz-se importante para implementação diferencial deste trabalho, já que na literatura pesquisada não há menção ao caráter preventivo à corrosão e à consideração do tempo de pré-tratamento a ser respeitado, através de restrições. Outra sugestão futura para além da validação diz respeito à construção de cenários com diferentes custos, à incorporação da demanda elétrica à modelagem e/ou de um parâmetro fator de perda com o pré-tratamento, atribuído à lixiviação devido à hidrólise passível de ocorrer com os carboidratos.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Conclusões e perspectivas foram traçadas de acordo com os resultados obtidos ao longo do estudo da cadeia produtiva de biomassas para fins de otimização da geração de energia elétrica. A seguir, as subsecções 5.1 e 5.2 apresentam-nas.

5.1 CONCLUSÕES

Biomassas diferentes e residuais de dendê e madeira, e capim-elefante foram contextualizadas para utilização no processo de combustão de uma usina no norte do país. As condições logísticas de fornecimento e transporte, o perfil das biomassas e a possibilidade de tratamentos foram considerados durante o estudo.

A cadeia de suprimentos de biomassas para fins energéticos de maneira geral foi investigada e otimizada na modelagem proposta através de colaboração industrial e acadêmica. Os resultados mostraram o favorecimento do uso de resíduos de dendê e a aplicabilidade da modelagem matemática programação linear como ferramenta de otimização, tendo reprodutibilidade para outras biomassas de interesse e outros contextos de otimização. O estudo reforça a perspectiva de aprimoramento dos critérios levados em consideração no modelo, frente à necessidade de observância ao caráter ambiental pujante dos processos atuais, bem como da consideração da incerteza na complexidade de utilizar-se diferentes tipos de biomassa. Para além disso, foram consideradas restrições que prevenissem o apodrecimento das biomassas estocadas, corrosão da caldeira e a existência de pré-tratamentos cuja realização levam um tempo para ocorrer, o que conferiria maior realismo e veracidade ao modelo, porém segue para implementação de escrita futura na programação.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho desenvolvido dá subsídios para modelagens com programação estocástica bem como estudos futuros de viabilidade técnico-econômica e/ou ambiental comparando desempenho entre diferentes tecnologias de conversão de biomassas ou mesmo avaliação de integração com outras tecnologias termoquímicas de processamento, e análise de sensibilidade. Por ora, os resultados alcançados atenderam a demanda inicial de fornecer uma ferramenta útil à tomada de decisão no que diz respeito a orientar melhores configurações de queima das biomassas.

REFERÊNCIAS

- ABDELHADY, S.; SHALABY, M. A.; SHABAN, A. Techno-Economic Analysis for the Optimal Design of a National Network of Agro-Energy Biomass Power Plants in Egypt. **Energies**, v. 14, 2021.
- AGHALARI, A.; ALADWAN, B. S.; MARUFUZZAMAN, M.; TANGER, S.; DA SILVA, B. K.; GUDE, V. G. Optimizing a pellet supply system: Market-specific pellet production with biomass quality considerations. **Computers & Chemical Engineering**, v. 153, 2021.
- AGROINDÚSTRIA. **Brasil Biofuels**, 2021. Disponível em: <https://www.brasilbiofuels.com.br/agroindustrial/>. Acesso em: 10 ago. 2021.
- ALBASHABSHEH, N.; STAMM, J. L. H. Optimization of lignocellulosic biomass-to-biofuel supply chains with densification: Literature review. **Biomass and Bioenergy**, v.144, 2021.
- ALVES, F. G. da S.; SILVA, S. F.; SANTOS, F. N. de S.; CARNEIRO, M. S. de S. Capim elefante: um recurso bioenergético. **Nucleus Animalium**, Ituverava, v. 10, n. 2, p. 117-130, 2018.
- ALVES, V. R. S.; USHIMA, A. H.; PEIXOTO, C. de S. Pré-tratamento da palha de cana-de-açúcar: avaliação do potencial dos processos de torrefação e lixiviação para remoção de contaminantes. **Revista IPT | Tecnologia e Inovação**, v. 4, n. 14, 2020.
- ANNEVELINK, B.; ANTTILA, P.; VÄÄTÄINEN, K.; GABRIELLE, B.; GARCÍA-GALINDO, D.; LEDUC, S.; STARITSKY, I. Modeling Biomass Logistics. *In*: PANOUTSOU, C. **Modeling and Optimization of Biomass Supply Chains: Top-Down and Bottom-Up Assessment for Agricultural, Forest and Waste Feedstock**. London: Academic Press, p. 79-103, 2017.
- BARNI, P. E.; MANZI, A. O.; CONDÉ, T. M.; BARBOSA, R. I.; FEARNSSIDE, P. M. Spatial distribution of forest biomass in Brazil's state of Roraima, northern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 377, p. 170–181, 2016.
- BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013, 541p.
- BOZZUTO, C. **Boiler Operator's Handbook**. 3 ed. Gistrup: River Publishers, 2021.
- BRAND, M. A.; RODRIGUES, T. M.; DA SILVA, J. P.; DE OLIVEIRA, J. Recovery of agricultural and wood wastes: The effect of biomass blends on the quality of pellets. **Fuel**, London, v. 284, 2021.
- BRANDÃO, P. C.; SOUZA, A. L. de; ROUSSET, P.; SIMAS, F. N. B.; MENDONÇA, B. A. F. de. Forest biomass as a viable pathway for sustainable energy supply in isolated villages of Amazonia. **Environmental Development**, v. 37, 2021.
- BRASIL BIOFUELS. **RIMA – Relatório de Impacto Ambiental UTE – BBF Baliza**. Disponível em:

<http://www.femarh.rr.gov.br/index.php/institucional/publicacoes?download=1461:rima-ute-bbf-baliza>. Acesso em: 21 jun. 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução n° 382, de 26 de dezembro de 2006**. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), Brasília, DF, 2006.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução n° 436, de 26 de dezembro de 2011**. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), Brasília, DF, 2011.

BROWN, R. C. (Ed.). **Thermochemical Processing of Biomass: Conversion into Fuels, Chemicals and Power**. 2 ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2019.

BRUGLIERI, M.; LIBERTI, L. Optimal running and planning of a biomass-based energy production process. **Energy Policy**, v. 36, p. 2430-2438, 2008.

BYNUM, M. L.; HACKEBEIL, G. A.; HART, W. E.; LAIRD, C. D.; NICHOLSON, B. L.; SIROLA, J. D.; WATSON, J.; WOODRUFF, D. L. **Pyomo — Optimization Modeling in Python**. 3 ed. Cham, CH: Springer Springer Optimization and Its Applications, 2021.

CAILLAT, S.; VAKKILAINEN, E. Large-scale biomass combustion plants: an overview. *In*: ROSENDAHL, L. Biomass Combustion Science, **Technology and Engineering**. Woodhead Publishing, Elsevier, [S.I.], p. 189-224, 2013.

CAMPOS, R. F. F. de; ROSA, L. D.; BORGA, T. Análise do processo de co-combustão da biomassa, através da influência da umidade do cavaco na emissão de contaminantes atmosféricos, eficiência energética e geração de cinzas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 10, n. 05, p. 1471-1480, 2017.

CAO, J. X.; ZHANG, Z.; ZHOU, Y. A location-routing problem for biomass supply chains. **Comput. Ind. Eng.**, v. 152, 2021.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

CLIMA e condições meteorológicas médias no Boa Vista, Boa Vista Intl no ano todo Brasil. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/147493/Clima-caracter%C3%ADstico-no-Boa-Vista-Boa-Vista-Intl;-Brasil-durante-o-ano>. Acesso em: 31 jul. 2022.

CLIMATE-DATA.ORG - Clima Boa Vista (Brasil). Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/roraima/boa-vista-3894/>. Acesso em: 31 jul. 2022.

CORDEIRO, A. C. C.; ALVES, A. B.; MACIEL, F. C. da. **Informações Técnicas para a Implantação de Lavoura de Dendê em Roraima**. Boa Vista: Embrapa Roraima, 2009.

COSTA, J. S. da. **Biomassa residual para uso energético no estado do Pará**. 2018. 68f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2018.

CRUZ, N. C.; SILVA, F. C.; TARELHO, L. A. C.; RODRIGUES, S. M.; RODRIGUES, S. M. Critical review of key variables affecting potential recycling applications of ash produced

at large-scale biomass combustion plants. **Resources Conservation and Recycling**, v. 150, 2019.

CUNDIFF, J. S.; DIAS, N.; SHERALI, H. D. A linear programming approach for designing a herbaceous biomass delivery system. **Bioresource Technology**, v. 57, p. 47-55, 1997.

DEMIRBAS, A. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. **Progress in energy and combustion Science**, v. 31, p. 171-192, 2005.

DO PRADO, A. C. P.; BLOCK, J. M. Palm and Palm Kernel Oil Production and Processing in Brazil. In: LAI, O.; TAN, C.; AKOH, C. C. **Palm Oil**, AOCS Press, [S.I.], p. 251-274, 2012.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Balanco Energético Nacional 2021**: Ano base 2020/Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2022.

EISELT, H. A.; SANDBLOM, C. L. **Linear Programming and its Applications**. Berlin-Heidelberg-New York: Springer, 2007.

FASSINO, W. F.; STEENE, L. V. de; TOURE, S.; MARTIN, E. What correlation is appropriate to evaluate biodiesels and vegetable oils higher heating value (HHV)? **Fuel**, v. 90, p. 3398-3403, 2011.

FERRETI, I. Optimization of the Use of Biomass Residues in the Poplar Plywood Sector. **Procedia Computer Science**, [S.I.], v. 180, p. 714-723, 2021.

GEOGRAFIA. **Governo de Roraima**, 2019. Disponível em: [https://www.portal.rr.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=33:empresas-e-profissionais-de-comunicacao&catid=25#:~:text=O%20clima%20C3%A9%20equatorial%20E2%80%93%20quente,%20C3%ADndice%20de%20chuvas%20C3%A9%20menor](https://www.portal.rr.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=33:empresas-e-profissionais-de-comunicacao&catid=25#:~:text=O%20clima%20C3%A9%20equatorial%20E2%80%93%20quente,%20C3%ADndice%20de%20chuvas%20C3%A9%20menor.). Acesso em: 24 mar. 2022.

KOLMAN, B.; BECK, R. **Elementary Linear Programming with Applications**. 2 ed. London: Academic Press, 1995. 449p.

KRÁLÍK, T.; KNÁPEK, J.; DVOŘÁČEK, L.; VÁVROVÁ, K. Impact of pelleting cost on competitiveness of intentionally grown biomass for local space heating: case example of the Czech Republic. **Energy reports**, [S.I.], v. 6, p. 732-737, 2020.

KUILA, A.; MUKHOPADHYAY, M. (Ed.). **Biorefinery Production Technologies for Chemicals and Energy**. 1 ed. Beverly: Wiley-Scrivener, 2020. 379p.

KUMAR, R. P.; BHARATHIRAJA, B.; KATAKI, R.; MOHOLKAR, V. S. (Ed.). **Biomass Valorization to Bioenergy**. 1 ed. Singapore: Springer, 2020, 219p.

KUMAR, S.; KUMAR, M.; HANDA, A. Combating hot corrosion of boilers tubes – A study. **Engineering Failure Analysis**, v. 94, p. 379-395, 2018.

KUSS, V. V.; KUSS, A. V.; DA ROSA, R. G.; ARANDA, D. A. G.; CRUZ, Y. R. Potential of biodiesel production from palm oil at Brazilian Amazon. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.I.], v. 50, p.1013-1020, 2015.

LACHMAN, J.; BALÁŠ, M.; LISÝ, M.; LISÁ, H.; MILČÁK, P.; ELBL, P. An overview of slagging and fouling indicators and their applicability to biomass fuels. **Fuel Processing Technology**, [S.I.], v. 217, n. 1, 2021.

LIMA, F. E. de. **Otimização do uso de bagaço de cana-de-açúcar para produção de energia**. 2014. 111 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

LIU, W.; LIU, C.; GOGOI, P.; DENG, Y. Overview of Biomass Conversion to Electricity and Hydrogen and Recent Developments in Low-Temperature Electrochemical Approaches. **Engineering**, [S.I.], v. 6, p. 1351–1363, 2020.

LORA, E. S.; ANDRADE, R. V. Biomass as energy source in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.I.], v. 13, p. 777-788, 2009.

MANDØ, M. Direct combustion of biomass. *In*: ROSENDAHL, L. **Biomass Combustion Science, Technology and Engineering**. Woodhead Publishing, Elsevier, [S.I.], p. 61-83, 2013.

MATOUŠEK, J.; GÄRTNER, B. **Understanding and Using Linear Programming**. 1 ed. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2007, 229p.

MEESTERS, K.; WOLTER, E.; VAN DER HOOGT, P.; HRISTOV, H. Biomass pre-treatment for bioenergy. Case study 5: Leaching as a biomass pre-treatment method for herbaceous biomass. Sugar cane trash and palm oil mill residues. **IEA Bioenergy**, 2018. Disponível em: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/11/CS5-Leaching-as-a-biomass-pre-treatment-method-for-herbaceous-biomass.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2022.

MILTNER, A.; BECKMANN, G. FRIEDL, A. Preventing the chlorine-induced high temperature corrosion in power boilers without loss of electrical efficiency in steam cycles. **Applied Thermal Engineering**, [S.I.], v. 26, p. 2005-2011, 2006.

MONITORAMENTO Brasil. Disponível em: <https://clima1.cptec.inpe.br/monitoramentobrasil/pt>. Acesso em: 31 jul. 2022.

MORAES, T. DOS S.; SILVA, L. T. DA; BARGOS, D. C.; TEIXEIRA, D. L. S.; GRILO, L.; SOUZA, I. R. **Determinação do potencial para sequestro de carbono equivalente no INPE de Cachoeira Paulista com o uso de geotecnologias**, 2019. Disponível em: <http://www.ccst.inpe.br/publicacao/determinacao-do-potencial-para-sequestro-de-carbono-equivalente-no-inpe-de-cachoeira-paulista-com-o-uso-de-geotecnologias/>. Acesso em: 11 mar 2023.

MORAN M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D.; BAILEY, M. B. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2014.

MÜLLER, A. A. **A cultura do dendê**. Belém: EMBRAPA-CPATU, 1980.

NARNAWARE, S. L.; PANWAR, N. L. Biomass gasification for climate change mitigation and policy framework in India: A review. **Bioresource Technology Reports**, v. 17, 2022.

NASCIMENTO, S. Embrapa lança cultivar de capim-elefante de 5 metros de altura. **Globo Rural**, 30 nov. 2016. Disponível em: <https://revistagloborural.globo.com/Colunas/sebastiao-nascimento/noticia/2016/11/embrapa-lanca-cultivar-de-capim-elefante-de-5-metros-de-altura.html>. Acesso em: 10 mai. 2021.

NG, W. P. Q.; HOW, B. S.; LIM, C. H.; NGAN, S. L.; LAM, H. L. Biomass supply chain synthesis and optimization. *In*: YUSUP, S.; RASHIDI, N. A. **Value-Chain of Biofuels: Fundamentals, Technology, and Standardization**. 1 ed. Elsevier, p. 445-479, 2022.

NIENOW, S.; MCNAMARA, K. T.; GILLESPIE, A. R. Assessing plantation biomass for co-firing with coal in northern Indiana: A linear programming approach. **Biomass and Bioenergy**, [S.I.], v. 18, p. 125-135, 2000.

NUNES, L. J. R.; CAUSER, T. P.; CIOLKOSZ, D. Biomass for energy: A review on supply chain management models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 120, 2020.

ORDOÑEZ-FRÍAS, E. J.; AZAMAR-BARRIOS, J. A.; MATA-ZAYAS, E.; SILVÁN-HERNÁNDEZ, O.; PAMPILLÓN-GONZÁLEZ, L. Bioenergy potential and technical feasibility assessment of residues from oil palm processing: A case study of Jalapa, Tabasco, Mexico. **Biomass and Bioenergy**, v. 142, 2020.

PAES, C. E.; GANDELMAN, D. A.; FIRMO, H. T.; BAHIENSE, L. The power generation expansion planning in Brazil: Considering the impact of greenhouse gas emissions in an Investment Decision Model. **Renewable Energy**, v. 184, p. 225-238, 2022.

PALM OIL 2021. **Palm Oil Explorer**. Disponível em: <https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=4243000/>. Acesso em: 12 ago. 2021.

PAOLUCCI, N.; BEZZO, F.; TUGNOLI, A. A two-tier approach to the optimization of a biomass supply chain for pyrolysis processes. **Biomass and Bioenergy**, v. 84, 2016.

PEDROSO, L. L. de A. **Análise da bionergia no Brasil com enfoque na biomassa do capim-elefante**. 2018. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Candido Mendes, Campos dos Goytacazes, 2018.

PHYLLIS2, the physico-chemical composition of (treated) lignocellulosic biomass, micro- and macroalgae, various feedstocks for biogas production and biochar. **Phyllis**. Disponível em: <https://phyllis.nl/>. Acesso em: 03 fev. 2022.

PINTO, T. P.; DE LIMA, C. Z.; ESTEVAM, C. G.; PAVÃO, E. M.; ASSAD, E. D. Panorama das emissões de metano e implicações do uso de diferentes métricas. **Observatório de Conhecimento e Inovação em Bioeconomia**, Fundação Getúlio Vargas - FGV-EESP, São Paulo-SP, Brasil, 2022. Disponível em: <https://eesp.fgv.br/centros/observatorios/bioeconomia>. Acesso em: 11 mar. 2023.

POTENZA, R. F.; QUINTANA, G. de O.; CARDOSO, A. M.; TSAI, D. S.; CREMER, M. dos S.; SILVA, F. B. E.; CARVALHO, K.; COLUNA, I.; SHIMBO, J.; SILVA, C.; SOUZA, E.; ZIMBRES, B.; ALENCAR, A.; ANGELO, C.; AZEVEDO, T. **SEEG – Análise das**

emissões brasileiras de e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 – 2020, 2021. Disponível em: https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG_9/OC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf. Acesso em: 17 set. 2022.

QUEIROZ, A. G.; FRANÇA, L.; PONTE, M. X. The life cycle assessment of biodiesel from palm oil ("dendê") in the Amazon. **Biomass and Bioenergy**, [S.l.], v. 36, p. 50-59, 2012.

RAJPUT, S. P.; JADHAV, S. V.; THORAT, B. N. Methods to improve properties of fuel pellets obtained from different biomass sources: Effect of biomass blends and binders. **Fuel Processing Technology**, Oxford, v. 199, 2020.

RENDEIRO, G. (Coord.). **Combustão e gasificação de biomassa sólida**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

RENEWABLES - Fuels & Technologies - IEA. **Data browser**. Disponível em: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/renewables>. Acesso em: 15 abr. 2022.

RENTIZELAS, A. A. Biomass supply chain. *In*: ROSENDAHL, L. **Biomass Combustion Science, Technology and Engineering**. Woodhead Publishing, Elsevier, [S.I.], p. 9-35, 2013.

RENTIZELAS, A. A.; TOLIS, A. J.; TATSIPOULOS, I. P. Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 887-894, 2009.

REZA, M. T.; LYNAM, J. G.; UDDIN, M. H.; CORONELLA, C. J. Hydrotherma, carbonization: Fate of inorganics. **Biomass&Bioenergy**, [S.I.], v. 49, p. 86-97, 2013.

ROCCO, C. D.; MORABITO, R. Um modelo de otimização para as operações de produção de vapor em caldeiras industriais. **Revista Gestão & Produção**, São Carlos, v. 19, n. 2, p. 273-286, 2012.

ROCHA, J. R. do A. S. de C.; MACHADO, J. C.; CARNEIRO, P. C. S.; CARNEIRO, J. da C.; RESENDE, M. D. V.; PEREIRA, A. V.; CARNEIRO, J. E. de S. Elephant grass ecotypes for bioenergy production via direct combustion of biomass. **Industrial Crops and Products**, [S.I.], v. 95, p. 27-32, 2017.

SAGHAEI, M.; GHADERI, H.; SOLEIMANI, H. Design and optimization of biomass electricity supply chain with uncertainty in material quality, availability and market demand. **Energy**, [S.I.], v. 197, 2020.

SAIDUR, R.; ABDELAZIZ, E. A.; DEMIRBAS, A.; HOSSAIN, M. S.; MEKHILEF, S. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.I.], v. 15, p. 2262-2289, 2011.

SAJID, Z. A dynamic risk assessment model to assess the impact of the coronavirus (COVID-19) on the sustainability of the biomass supply chain: A case study of a U.S. biofuel industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 151, 2021.

SANDLER, S. I. **Chemical, Biochemical, and Engineering Thermodynamics**. 5 ed. Hoboken: Wiley, 2016.

SCHNORF, V.; TRUTNEVYTE, E.; BOWMAN, G.; BURG, V. Biomass transport for energy: Cost, energy and CO₂ performance of forest wood and manure transport chains in Switzerland. **Journal of Cleaner Production**, [S.I.], v. 293, 2021.

SIKKEMA, R.; PROSKURINA, S.; BANJA, M.; VAKKILAINEN, E. How can solid biomass contribute to the EU's renewable energy targets in 2020, 2030 and what are the GHG drivers and safeguards in energy- and forestry sectors? **Renewable Energy**, [S.I.], v.165, p. 758-772, 2021.

SILVA, E. da. **Biomassa cultivada para Produção de Energia**: Estudo Comparativo entre Capim Elefante e Eucalipto com a incorporação da Energia Solar na Secagem. 2012. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

SILVA, J. P.; TEIXEIRA, S.; GRILO, E.; PETERS, B.; TEXEIRA, J. C. Analysis and monitoring of the combustion performance in a biomass power plant. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 5, 2021.

SMIL, V. **Biomass energies**: resources, links, constraints. 1 ed. New York: Plenum Press, 1983. 453 p.

SOWLATI, T. Modeling of forest and wood residues supply chains for bioenergy and biofuel production. *In*: HOLM-NIELSEN, J. B.; EHIMEN, E. A. **Biomass Supply Chains for Bioenergy and Biorefining**. 1 ed. Woodhead Publishing, Elsevier, p. 167-190, 2016.

SPEIGHT, J. G. **Encyclopedia of Renewable Energy Hardcover**. 1 ed. Beverly: Wiley-Scrivener, 2022, 1264p.

THENGANE, S. K. Advances in carbon capture through thermochemical conversion of biomass. *In*: SIKDAR, S. K.; PRINCIOTTA, F. **Advances in Carbon Management Technologies: Biomass Utilization, Manufacturing, and Electricity Management**, v. 2. 1 ed. CRC Press, p. 97-111, 2021.

VAN LOO, S.; KOOPEJAN, K. **The Handbook of Biomass Combustion & Co-firing**. 2 ed. London: Earthscan, 2008.

WANG, Y.; WANG, J.; SCHULER, J.; HARTLEY, D.; VOLK, T.; EISENBIES, M. Optimization of harvest and logistics for multiple lignocellulosic biomass feedstocks in the northeastern United States. **Energy**, [S.I.], v. 197, 2020.

WIDELL, H. Industrial- scale biomass combustion plants: engineering issues and operation. *In*: ROSENDAHL, L. **Biomass Combustion Science, Technology and Engineering**. Woodhead Publishing Elsevier, [S.I.], p. 225-277, 2013.

WU, J.; ZHANG, J.; YI, W.; CAI, H.; LI, Y.; SU, Z. Agri-biomass supply chain optimization in north China: Model development and application. **Energy**, v. 239 (D), 2022.

YAHYA, N. S. M.; NG, L. Y.; ANDIAPPAN, V. Optimisation and planning of biomass supply chain for new and existing power plants based on carbon reduction targets. **Energy**, v. 237, 2021.

YUE, D.; YOU, F. Biomass and biofuel supply chain modeling and optimization. *In: HOLM-NIELSEN, J. B.; EHIMEN, E. A. Biomass Supply Chains for Bioenergy and Biorefining.* Woodhead Publishing, Elsevier, p. 149-166, 2016.

ZAHRAEE, S. M.; SHIWAKOTI, N.; STASINOPOULOS, P. Biomass supply chain environmental and socio-economic analysis: 40-Years comprehensive review of methods, decision issues, sustainability challenges, and the way forward. **Biomass and Bioenergy**, v. 142, 2020.

ZANFER, G. **Entenda o Acordo de Paris, assinado por 196 países e discutido na COP27.** CNN Brasil [online], São Paulo, 20 out. 2022. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/entenda-o-acordo-de-paris-assinado-por-196-paises-e-discutido-na-cop27/>. Acesso em: 11 mar. 2023.

ZHANG, Y.; JI, Y.; QIAN, H. Progress in thermodynamic simulation and system optimization of pyrolysis and gasification of biomass. **Green Chemical Engineering**, v. 2, 2021.

ZHU, Y.; NIU, Y.; TAN, H.; WANG, X. Short review on the origin and countermeasures of biomass slagging in grate furnace. **Frontiers in energy research**, [S.I.], v. 2, 2014.

ANEXO A – APRESENTAÇÃO PARCIAL DO ALGORITMO DE MODELAGEM

+ Código + Markdown | ▶ Executar Tudo | ≡ Limpar Todas as Saídas | ↺ Reiniciar | 📄 Variáveis | 📄 Estrutura de tópicos ... Python 3.10.10

Programação Linear - OTIMIZAÇÃO USO DE BIOMASSA

```
[1] ✓ 0.9s #Parâmetros usados: c1_ftc, c2_ftg, c3_cp, c4, c5, cap1_gt, cap2, cap3, d_ft, o_ftc, dens_cp, tes_cp, tpt_cp, pci_cp, dem_t. Python
```

Biblioteca que realiza o print das células markdown usando formato LaTeX

```
[2] ✓ 1.2s import sympy as sp
import numpy as np # Utilizei para poder utilizar Heavside()
sp.init_printing(use_latex="mathjax") # Para imprimir em LaTeX Python
```

Bibliotecas para Gerenciamento de Tabelas de Excel ou LibreCalc

```
[3] ✓ 1.3s import pandas as pd
from pandas_ods_reader import read_ods
import os
import glob
from openpyxl import Workbook
from openpyxl import load_workbook Python
```

+ Código + Markdown | ▶ Executar Tudo | ≡ Limpar Todas as Saídas | ↺ Reiniciar | 📄 Variáveis | 📄 Estrutura de tópicos ... Python 3.10.10

```
[3] ✓ 1.3s import os
import glob
from openpyxl import Workbook
from openpyxl import load_workbook Python
```

Bibliotecas que Realizam a Estruturação do Problema Linear - PYOMO

```
[4] ✓ 0.9s from pyomo.environ import *
import pyomo.environ as pyo
from pyomo.core.base.objective import Objective
from pyomo.core.base.PyomoModel import ConcreteModel Python
```

Biblioteca do Python para usar serviços do Windows

```
[5] ✓ 0.0s import ctypes Python
```

Declarando o Modelo

```
[6] ✓ 0.0s model = pyo.ConcreteModel()
model.clear() Python
```

...

```

# Definindo o solver a ser utilizado.
solvername='glpk'
solverpath_folder='w64'
solverpath_exe='w64\glpsol'
optimizer = SolverFactory(solvername, executable=solverpath_exe)

# se tee definido como True, o log do processo de resolução é mostrado.
results = optimizer.solve(model, tee=True)

```

[44] ✓ 0.3s Python

```

... GLPSOL: GLPK LP/MIP Solver, v4.65
Parameter(s) specified in the command line:
--write C:\Users\ranie\AppData\Local\Temp\tmpej2eix6c.glpk.raw --wglp C:\Users\ranie\AppData\Local\Temp\tmpc34nhf94.glpk.glp
--cpxlp C:\Users\ranie\AppData\Local\Temp\tmpyz0d92oq.pyomo.lp
Reading problem data from 'C:\Users\ranie\AppData\Local\Temp\tmpyz0d92oq.pyomo.lp'...
1517 rows, 2289 columns, 8529 non-zeros
17248 lines were read
Writing problem data to 'C:\Users\ranie\AppData\Local\Temp\tmpc34nhf94.glpk.glp'...
15515 lines were written
GLPK Simplex Optimizer, v4.65
1517 rows, 2289 columns, 8529 non-zeros
Preprocessing...
672 rows, 824 columns, 3688 non-zeros
Scaling...
A: min|aij| = 1.149e-03 max|aij| = 1.981e+04 ratio = 1.723e+07
GM: min|aij| = 7.077e-01 max|aij| = 1.413e+00 ratio = 1.997e+00
EQ: min|aij| = 5.008e-01 max|aij| = 1.000e+00 ratio = 1.997e+00
Constructing initial basis...
Size of triangular part is 672
0: obj = 0.000000000e+00 inf = 1.150e+08 (96)
336: obj = 1.330364285e+13 inf = 7.567e-09 (0) 2
* 541: obj = 3.486895870e+06 inf = 3.909e-08 (0) 1
OPTIMAL LP SOLUTION FOUND
Time used: 0.0 secs
Memory used: 2.4 Mb (2519652 bytes)
Writing basic solution to 'C:\Users\ranie\AppData\Local\Temp\tmpej2eix6c.glpk.raw'...
3815 lines were written

```

```

#Status diz como foi a execução
status = results.solver.status
solution = results
print("Status: ", status)
print("Solução: ", solution)

```

[45] ✓ 0.0s Python

```

... Status: ok
Solução:
Problem:
- Name: unknown
  Lower bound: 3486895.87015795
  Upper bound: 3486895.87015795
  Number of objectives: 1
  Number of constraints: 1517
  Number of variables: 2289
  Number of nonzeros: 8529
Solver:
- Status: ok
  Termination condition: optimal
  Statistics:
  Branch and bound:
    Number of bounded subproblems: 0
    Number of created subproblems: 0
  Error rc: 0
  Time: 0.1213524341583252
Solution:
- number of solutions: 0
  number of solutions displayed: 0

```

```

model.pprint()

```

[46] ✓ 0.3s Python

... Output exceeds the [size limit](#). Open the full output data [in a text editor](#)

Fonte: o algoritmo foi escrito por um membro da equipe, o mestrando Lucas Henrique Biuk, no quadro de desenvolvimento de sua dissertação (em andamento) de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa (UTFPR)/PR, 2023.