

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**HÍDILA SOUZA TEIXEIRA DA SILVA**

**ESTUDO DA QUEIMA DE DIFERENTES ESPÉCIES DO SORGO PARA GERAÇÃO  
DE ENERGIA: SIMULAÇÃO E ANÁLISE ECONÔMICA**

**VIÇOSA – MINAS GERAIS**

**2021**

**HÍDILA SOUZA TEIXEIRA DA SILVA**

**ESTUDO DA QUEIMA DE DIFERENTES ESPÉCIES DO SORGO PARA  
GERAÇÃO DE ENERGIA: SIMULAÇÃO E ANÁLISE ECONÔMICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, para obtenção do título *Magister Scientiae*.

Orientador: Fábio de Ávila Rodrigues

Coorientador: André Gustavo Sato

**VIÇOSA – MINAS GERAIS**

**2021**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de Viçosa - Campus Viçosa

T

S586e  
2021  
Silva, Hídila Souza Teixeira da, 1994-  
Estudo da queima de diferentes espécies do sorgo para geração de energia : simulação e análise econômica / Hídila Souza Teixeira da Silva. - Viçosa, MG, 2021.  
76 f. : il. ; 29 cm.

Orientador: Fábio de Ávila Rodrigues.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f. 70-76.

1. Biomassa vegetal. 2. Energia - Fontes alternativas.  
3. Reaproveitamento (Tecnologia química). 4. Aspen plus (Software).  
5. Energia elétrica e calor - Cogeração. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. II. Título.

CDD 22. ed. 333.9539

HÍDILA SOUZA TEIXEIRA DA SILVA

**ESTUDO DA QUEIMA DE DIFERENTES ESPÉCIES DO SORGO PARA GERAÇÃO  
DE ENERGIA: SIMULAÇÃO E ANÁLISE ECONÔMICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, para obtenção do título *Magister Scientiae*.

APROVADA: 23 de fevereiro de 2021.

Assentimento:



Hídila Souza Teixeira da Silva  
Autora



Fábio de Ávila Rodrigues  
Orientador

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, não primeiramente, mas por tudo, pois foi Ele quem me deu pais amorosos que mesmo com dificuldade me apoiaram e incentivaram a ser cada dia melhor. Em especial a minha mãe que, orou, chorou e comemorou comigo para que este dia chegasse e mais do que isso, abdicou dos seus sonhos em prol dos meus.

Agradeço a Deus, pelo namorado que Ele me trouxe nessa cidade, homem que, me apoia com seu amor, cuidado, confiança e carinho e me dá motivos para querer começar novos caminhos em sua companhia e vencer obstáculos com a sua ajuda.

Agradeço a Deus, pelos amigos que deixei para trás, mas que continuaram em meu coração, que mesmo à distância não foi capaz de esfriar nem desfazer os laços afetivos que construímos por anos. Agradeço a Ele, também, pelos amigos que fiz e levarei comigo sempre, pois passaram por um dos momentos mais importantes e impactantes da minha vida, amigos que fizeram rir, que choraram comigo e ajudaram a fortalecer a minha fé.

Agradeço a Deus, pelo orientador e coorientador que me acompanharam ao longo desses dois anos de universidade e todas as oportunidades que pudemos conquistar e desfrutar juntos, oportunidades essas que me impulsionaram na minha vida acadêmica, profissional e pessoal. Além dos demais professores e técnicos do DEQ e UFV, que tiveram papel importante ao me acrescentar conhecimentos acadêmicos e pessoais.

Por isso, agradeço a Deus por tudo, pois sei que foi através da permissão d'Ele que essas pessoas passaram em minha vida, e que é por Ele que estou concluindo esse ciclo, e que é pela força d'Ele que estou terminando essa caminhada.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Eu posso fazer tudo o que eu quero, mas nem tudo me convém.” (1 Coríntios, 6:12) Porque para Ele e por Ele, são todas as coisas.

## RESUMO

SILVA, Hídila Souza Teixeira da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2021. **Estudo da queima de diferentes espécies do sorgo para geração de energia: simulação e análise econômica.** Orientador: Fábio de Ávila Rodrigues. Coorientador: André Gustavo Sato.

O desenvolvimento econômico de um país está diretamente ligado ao consumo e produção de energia, com isso, o mercado de eletricidade sofre algumas transformações trazida pela demanda da economia digital e veículos elétricos. Deste modo, diferentes rotas tecnológicas são estabelecidas com a finalidade de promover o desenvolvimento de novas fontes renováveis. O uso da bioenergia oriunda de biomassa, por exemplo, é considerado uma opção estratégica de produção de energia, pois é considerada uma técnica de baixo carbono renovável. Diferentes recursos podem ser aplicados na transformação da biomassa para fins energéticos, para isso, essa dissertação tem como objetivo avaliar e simular o efeito termoquímico de diferentes espécies do sorgo. Para simulação, foi utilizado o programa computacional Aspen Plus V11.0, onde os princípios fundamentais da modelagem incluem a 1ª e 2ª leis da termodinâmica e equações da mecânica dos fluidos. O ciclo Rankine foi proposto operando em diferentes condições de pressão e temperatura e foi validado por meio da comparação dos resultados obtidos no simulador com dados obtidos experimentalmente disponível na literatura. A partir dessa validação, foi possível verificar que a espécie BD 5404 apresentou a maior potência de energia gerada. Após realizar uma análise econômica, foi verificado que preço de venda sugerido para essa espécie é de USD 0,13, USD 0,14 e USD 0,15 nas configurações de operação da caldeira à 40 bar, 70 bar e 140, respectivamente, deste modo o presente estudo confirmou a potencialidade do uso do sorgo para geração de energia, utilizando a rota termoquímica.

**Palavras-chave:** Biomassa. Bioenergia. Reaproveitamento. Cogeração. AspenPlus. Modelagem.

## ABSTRACT

SILVA, Hídila Souza Teixeira da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February , 2021. **Study of the burning of different sorghum species for energy generation: simulation and economic analysis.** Adviser: Fábio de Ávila Rodrigues. Co-adviser: André Gustavo Sato.

The economic development of a country is directly linked to the consumption and production of energy, with that, the electricity market undergoes some transformations brought about by the demand of the digital economy and electric vehicles. In this way, different technological routes are established in order to promote the development of new renewable sources. The use of bioenergy from biomass, for example, is considered a strategic option for energy production, as it's considered a renewable low carbon technique. Different resources can be applied in the transformation of biomass for energy purposes, for this purpose, this dissertation aims to evaluate and simulate the thermochemical effect of different sorghum species. For simulation, the software Aspen Plus V11.0 was used, where the fundamental principles of modeling include the 1st and 2nd laws of thermodynamics and equations of fluid mechanics. The Rankine cycle was proposed operating under different conditions of pressure and temperature and was validated by comparing the results obtained in the software with data obtained experimentally available in the literature. From this validation, it was possible to verify that the BD 5404 species presented the highest power of generated energy. After carrying out an economic analysis, it was verified that the suggested selling price for this species is USD 0.13, USD 0.14 and USD 0.15 in the boiler operating configurations at 40 bar, 70 bar and 140, respectively, of this Thus, the present study confirmed the potential of using sorghum to generate energy, using the thermochemical route.

**Keywords:** Biomass. Bioenergy. Reuse. Cogeneration. AspenPlus. Modeling.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Oferta de energia na matriz energética mundial. ....	15
Figura 2. Oferta de Energia Elétrica Brasileira. ....	17
Figura 3. Emissão de gases poluentes dos anos 90 até 2017.....	18
Figura 4. Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa.....	20
Figura 5. Ciclo de Carnot em um diagrama TS.....	25
Figura 6. Ciclo Rankine.....	26
Figura 7. Diagrama do ciclo Rankine ideal .....	26
Figura 8. Diagrama de blocos do processo da geração de energia por meio da biomassa lignocelulósica. ....	39
Figura 9. Esquema da simulação do calorímetro para determinação do PCS. ....	42
Figura 10. Fluxograma das etapas envolvidas na simulação.....	47
Figura 11. Conjunto de operações unitárias que representam a caldeira do processo.....	48
Figura 12. Turbina do processo. ....	49
Figura 13. Etapa referente ao condensador do processo. ....	49
Figura 14. Etapa com o bombeamento e reciclo do processo. ....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Repartição da OIE com a variação Mtep.....	16
Tabela 2. Poder Calorífico Superior e Inferior de diferentes matérias primas para aplicação como biomassa .....	23
Tabela 3. Composição química de diferentes génotipos de sorgo.....	35
Tabela 4. Especificações técnicas dos equipamentos para pressão de operação da caldeira a 40 bar. ....	37
Tabela 5. Especificações técnicas dos equipamentos para pressão de operação da caldeira a 70 bar. ....	38
Tabela 6. Especificações técnicas dos equipamentos para pressão de operação da caldeira a 140 bar. ....	38
Tabela 7. Composição do sorgo inseridas no simulador. ....	39
Tabela 8. Teor de umidade da matéria prima inserida no simulador. ....	40
Tabela 9. Balanço de massa e energia à 40 bar. ....	51
Tabela 10. Balanço de massa e energia à 70 bar. ....	51
Tabela 11. Balanço de massa e energia à 140 bar. ....	52
Tabela 12. Trabalho teórico e eficiência à 40 bar.....	53
Tabela 13. Trabalho teórico e eficiência à 70 bar.....	53
Tabela 14. Trabalho teórico e eficiência à 140 bar.....	53
Tabela 15. Montante anual de energia elétrica gerada. ....	54
Tabela 16. Valores de PCS para a celulose .....	55
Tabela 17. Determinação da potência teórica e experimental a 40 bar e 450°C. ....	57
Tabela 18. Determinação da potência teórica e experimental a 70 bar e 530°C. ....	58
Tabela 19. Determinação da potência teórica e experimental a 140 bar e 540°C. ....	59
Tabela 20. Custos de equipamentos sistema à 40 bar.....	60
Tabela 21. Custos de equipamentos sistema à 70 bar.....	61
Tabela 22. Custos de equipamentos sistema à 140 bar.....	61
Tabela 23. Custos anuais de matéria prima á 40 bar. ....	62
Tabela 24. Custos anuais de matéria prima á 70 bar. ....	62
Tabela 25. Custos anuais de matéria prima á 140 bar .....	62
Tabela 26. Capital de investimentos para as diferentes pressões de operação.....	63
Tabela 27. Valores totais dos investimentos. ....	63

Tabela 28. Dados necessários para cálculo do CTP .....	64
Tabela 29. Fluxo de caixa da espécie BD 5407 .....	66
Tabela 30. Valor de venda da energia elétrica no processo à 40 bar.....	67
Tabela 31. Valor de venda da energia elétrica no processo à 70 bar.....	67
Tabela 32. Valor de venda da energia elétrica no processo à 140 bar.....	67

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	12
2. OBJETIVOS .....	14
2.1. Objetivo geral .....	14
2.2. Objetivos específicos .....	14
3. ESTADO DA ARTE .....	15
3.1. As fontes de energia no brasil e no mundo.....	15
3.2. Problemas ambientais .....	17
3.3. Bioenergia.....	18
3.4. Energia de biomassa .....	19
3.5. Composição da biomassa .....	20
3.6. Sorgo.....	22
3.7. Cogeração de energia.....	23
3.8. Ciclos termodinâmicos .....	23
3.9. Modelos termodinâmicos .....	29
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
4.1. Programa computacional .....	34
4.1.1. Inserção de componentes no simulador.....	34
4.1.2. Definição da composição da matéria prima .....	34
4.1.3. Inserção de componentes da biomassa .....	35
4.2. Determinação dos parâmetros utilizados na simulação.....	36
4.2.1. Especificações técnicas.....	36
4.2.2. Simulação .....	38
4.2.3. Verificação do poder calorífico .....	41
4.2.4. Verificação da potência teórica e experimental.....	42
4.3. Análise econômica.....	43
4.3.1. Estudo da viabilidade econômica do processo .....	44

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	46
5.1. Simulação .....	46
5.2. Validação da simulação .....	54
5.2.1. Determinação do poder calorífico. ....	55
5.2.2. Determinação da potência teórica e experimental .....	56
5.3. Análise econômica.....	60
5.3.1. Custo de equipamentos .....	60
5.3.2. Custo da matéria prima.....	61
5.3.3. Capital fixo investido e capital de giro .....	62
5.3.4. Custo anual do produto.....	63
5.3.5. Viabilidade econômica do processo .....	65
6. CONCLUSÃO .....	69
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	70

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico de um país está diretamente ligado ao consumo e produção de energia, com isso, o mercado de eletricidade sofre algumas transformações trazida pela demanda da economia digital e veículos elétricos. Estima-se que, a demanda por energia deve crescer mais de 25% até 2040, exigindo mais de US\$ 2 trilhões por ano de investimento em novo fornecimento de energia, uma vez que o mercado do petróleo está entrando em um período de instabilidade, conseqüentemente, apresentando custos elevados. Com isso, os renováveis aparecem como soluções para auxiliar essa demanda (STOLARSKI, et. al., 2020; AIE, 2018a).

As fontes de energia renováveis, dentre elas a bioenergia oriunda de biomassa, é a proposta que têm surgido como uma alternativa de custo competitivo para auxiliar a matriz energética mundial, uma vez que, estima-se que as rotas sustentáveis corresponderão por aproximadamente 2/3 da capacidade energética global até 2040, isso se dá por baixos custos relacionados a sua produção e às políticas governamentais de apoio (AIE, 2018a). Essa expansão da bioenergia, traz, sobretudo, benefícios ambientais sobre condições climáticas contemporâneas, que visa manter a temperatura média global abaixo dos 2°C, promovendo uma redução dos Gases Causadores do Efeito Estufa (GEE) (HARPER, et. al., 2018; GRISCOM, et al. 2017).

A combustão direta da biomassa é um caminho para usar tecnologia de *Bio-energy with carbon capture and storage* (BECCS) que tem como consequência neutralizar a emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera (TANG e YOU, 2018; CORMOS, 2012; AIE, 2018a). Porém, conhecer a propriedade da biomassa pode ser fundamental, uma vez que, existem diferentes tipos de conversão térmica e isso pode estar limitado a disponibilidade de recursos como água, terra e agroquímicos (CALVO-SERRANO, et al. 2019; ROCHA, et al. 2015).

Considerar as propriedades fundamentais da biomassa é importante para estabelecer qual conversão termoquímica será utilizada, os teores umidade, lignina, celulose, e produtividade são considerados um dos fatores primordiais (ROCHA, et al. 2015). O *Sorghum bicolor* é uma alternativa de matéria prima para conversão de biomassa em energia. Considerado o quinto grão de cereal mais plantado e colhido no mundo, pode ser modificado

geneticamente, e adaptado para diferentes aplicações (ROONEY, et al., 2007). Seus cultivares são conhecidos por serem resistentes a pragas, bom crescimento, tolerância a seca e apresentarem alto rendimento (ROONEY, et al., 2007; ZEGADA-LIZARAZU E MONTI, 2012; HAO et al., 2014; PANNACCI, E BARTOLINI, 2016).

Portanto, buscando técnicas eficazes que apresentem custos competitivos, essa dissertação teve como proposta, avaliar diferentes espécies do sorgo para fins energéticos, utilizando a simulação como um recurso de avaliação. Para isto, foi utilizado a versão 11.0 do Aspen Plus para representar uma usina térmica, operando com um sistema de cogeração de energia.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1.Objetivo geral**

O principal objetivo será avaliar por meio da simulação e análise econômica a geração de energia elétrica, a partir da conversão de genótipos de biomassas lignocelulósicas utilizando o programa computacional Aspen Plus®.

### **2.2.Objetivos específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Simular o processo da queima do bagaço de diferentes espécies do sorgo para a geração de energia elétrica, utilizando o programa computacional Aspen Plus
- Avaliar a viabilidade do uso do sorgo como matéria prima para geração de energia elétrica;
- Validar os resultados obtidos no presente trabalho, correlacionando com dados obtidos experimentalmente;
- Realizar uma variação paramétrica da composição do sorgo e analisar sua essa influência no processo.

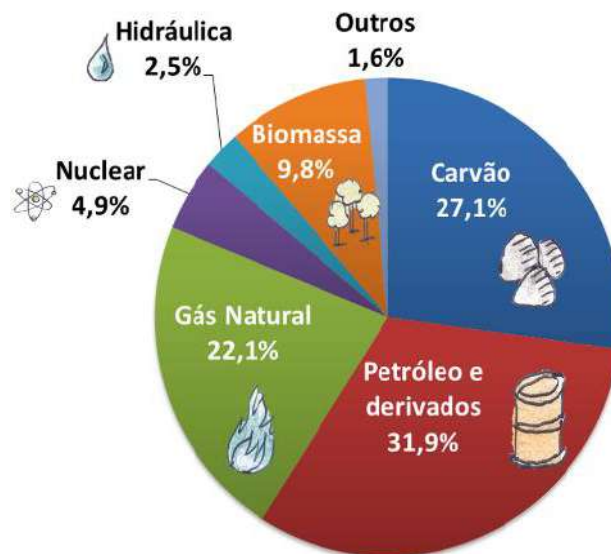


### 3. ESTADO DA ARTE

#### 3.1.As fontes de energia no brasil e no mundo

As fontes de energia hidráulica, biomassa e nuclear representa aproximadamente 17 % da matriz energética mundial. Estima-se que até 2023 haverá um crescimento de até 40% da sua utilização, onde o setor de eletricidade será responsável por até 1/3 da geração total. Isso se deve fortemente as políticas governamentais de apoio (AIE, 2018b). A divisão da matriz da oferta mundial de energia, possui o petróleo como uma das principais fontes de matérias primas, cerca de 31,9%, seguido pelo carvão 27,1%, o gás natural 22,1%, a biomassa 9,8%, nuclear 4,9%, hidráulica 2,5% e outros 1,6% que incluem a energia solar, eólica e geotérmica. A Figura 1 representa a divisão da oferta mundial da matriz energética.

**Figura 1.** Oferta de energia na matriz energética mundial.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2018a.

O Brasil, em 2017, registrou 292,1 milhões de tonelada equivalente de petróleo (Mtep), de oferta interna de energia (OIE) disponibilizada no país, registrando um aumento de 1,3% em relação à 2016, e equivalente a 2,12% da energia mundial. Se tratando apenas de energia elétrica, também foi notório um avanço de 0,7% em relação a 2016, gerando 4,6 TWh (terawatt-hora). Devido às condições hidrológicas desfavoráveis, houve redução de 3,4% da energia

hidráulica disponibilizada em relação ao ano anterior. Apesar da menor oferta hídrica, a participação de renováveis na matriz elétrica atingiu 80,4% em 2017, fato explicado pelo avanço da geração eólica (EPE, 2018b).

Já em 2018, OIE atingiu 288,4 Mtep, registrando uma redução de 1,7% em relação ao ano anterior. Isso se deu pelo recuo da demanda de energia nos setores de alimentos e bebidas (- 17,4%), não ferrosos e outros da metalurgia (-20,2) e rodoviário (-1,2%), que reduziram as ofertas internas de gás natural (-5,4%) e de petróleo e derivados (-6,5%) (EPE, 2019). Tratando apenas das fontes de energias renováveis, essas subiram 2,3 pontos percentuais na matriz energética brasileira quando comparadas ao ano de 2017, havendo uma participação de 82,9% na matriz. Dentro desses resultados a energia solar, por exemplo, cresceu aproximadamente 298%, seguida pela eólica 14,4%, hidráulica 4,1% e bioenergia 2,4% (MME, 2019). A Tabela 1 compara a oferta interna de energia nos anos de 2017 e 2018.

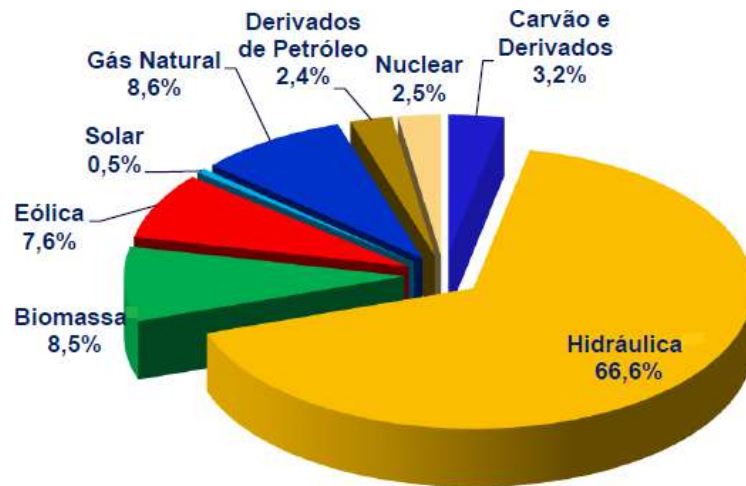
**Tabela 1.** Repartição da OIE com a variação Mtep

Fonte	2017 (Mtep)	2018 (Mtep)	$\Delta$ (18/17)
<b>Renováveis</b>	<b>126,2</b>	<b>130,5</b>	<b>3,4%</b>
Energia hidráulica	35,0	36,5	4,1%
Biomassa da cana	49,8	50,1	0,7%
Lenha e carvão vegetal	24,0	24,1	0,6%
Eólica	3,6	4,2	14,4%
Solar	0,1	0,3	316,1%
Lixívia e outras renováveis	13,8	15,4	11,8%
<b>Não renováveis</b>	<b>167,0</b>	<b>157,9</b>	<b>-5,5%</b>
Petróleo e derivados	106,3	99,3	-6,5%
Gás natural	37,9	35,9	-5,4%
Carvão mineral	16,8	16,6	-0,9%
Nuclear (urânio U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	4,2	4,2	-0,5%
Outras não renováveis	1,8	1,8	-0,1%

Fonte: Adaptado de Empresa de Pesquisa Energética, 2019.

Com uma grande aplicação de renováveis, quando falamos apenas de energia elétrica, cerca de 66% da eletricidade produzida no Brasil, é proveniente de hidrelétrica que gerou no ano de 2018 aproximadamente 388.971 GWh (gigawatt-hora), seguido pelo gás natural (8,6%), biomassa (8,5%). A divisão da potência instalada é representada na Figura 2 (EPE, 2019).

**Figura 2.** Oferta de Energia Elétrica Brasileira.

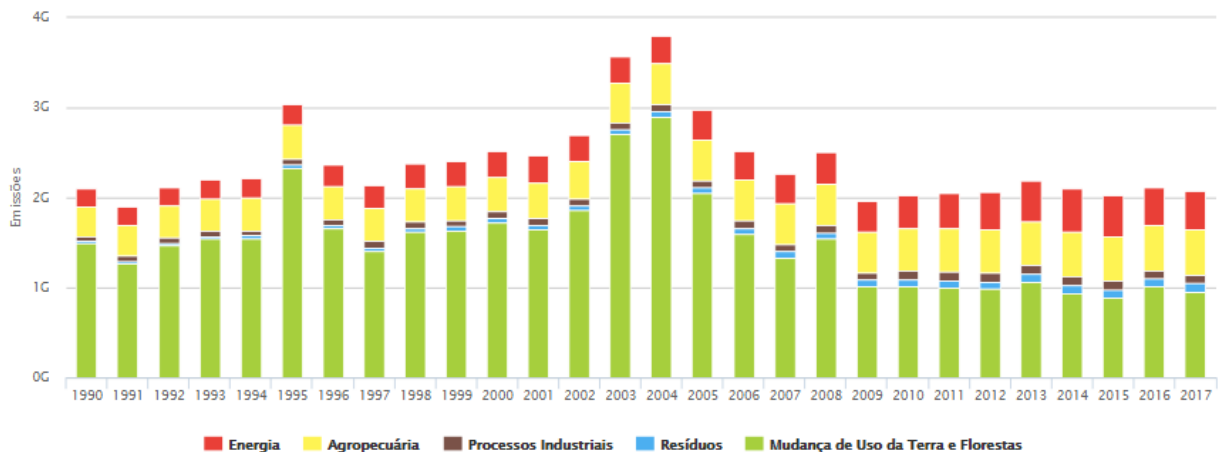


Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2019.

### 3.2.Problemas ambientais

O uso de combustíveis fósseis cresceu significativamente desde o avanço do setor industrial, com isso, o consumo desses combustíveis tem sido associado como fatores relacionados com as mudanças climáticas, como a emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) (HARRISON e HESTER, 2003). Além desses fatores, o petróleo e seus derivados (carvão, gás) são matérias primas finitas e à medida em que as reservas de obtenção desse combustível forem se esgotando, custos elevados serão associados à sua produção. Em consequência disso, muitos países têm desenvolvido programas que favorecem uma produção energética oriunda de recursos sustentáveis (HIMMEL et. al., 2007) (GOLDEMBERG, 2007; AIE, 2018a).

No Brasil, em 2017, o setor energético ficou como o terceiro maior emissor de gases totais, sendo responsável por 20% das emissões, ficando atrás apenas do setor de mudança de uso da terra e florestas (46%) e agropecuária (23%) (SEEG, 2018). A Figura 3 demonstra a variação de emissão de gases poluentes no país ao longo de 27 anos.

**Figura 3.** Emissão de gases poluentes dos anos 90 até 2017.

Fonte: Sistema de Estimativas de Emissões de Gases (SEEG), 2018.

Esses resultados se dão sobretudo ao emprego de termelétricas que queimam combustíveis fósseis para compensar a utilização de outras fontes que não conseguem suprir a necessidade energética, fornecendo uma flexibilidade operativa ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Porém, em razão das características econômicas e técnicas envolvidas na sua utilização, o acionamento dessas usinas térmicas acarreta um custo elevado na sua produção e uma maior geração de gases poluentes (TOLMASQUIM, 2016).

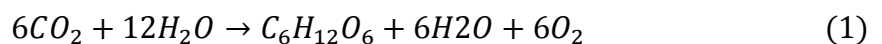
### 3.3. Bioenergia

Para manter a temperatura média global abaixo de 2°C, apoios governamentais foram estabelecidos a fim de promover a bioenergia como uma alternativa sustentável, fomentando a pesquisa na área (AIE, 2018a; GRISCOM, et al. 2017). A busca de fontes renováveis que sejam capazes de auxiliar as fontes energéticas já existentes, requer o uso de tecnologias razoavelmente avançadas, que conciliem a ideia de energia renovável com eficiência energética (ROSILLO-CALLE et al 2007). O processo de bioenergia se dá com a energia solar armazenada nos componentes das ligações químicas que compõe a estrutura da matéria orgânica. Quando essas ligações são submetidas à quebra, há a liberação da energia química armazenada (MCKENDRY, 2002).

A flexibilidade da aplicação é uma das vantagens da bioenergia em comparação com outras energias renováveis (eólica, solar, hídrica ou maré) pois fornece diferentes técnicas de geração de energia, tais como: térmica (combustão), termoquímica (gaseificação, pirólise, torrefação), bioquímica (fermentação, digestão anaeróbica), e conversão química (transesterificação) (RÖDER e THORNLEY, 2016). Nesse sentido, a bioenergia desempenha um papel fundamental de equilibrar o sistema de fornecimento de energia, não atuando como uma “solução única”, mas apresentando uma versatilidade e flexibilidade da sua aplicação como fonte renovável nos países em desenvolvimento, uma vez que, países em desenvolvimento podem aumentar sua necessidade energética (AIE, 2018a).

### 3.4. Energia de biomassa

A biomassa poder ser obtida por meio da matéria orgânica oriunda de fontes vegetais e animais, os materiais lenhosos, tal como a madeira, os não lenhosos que seriam os resíduos agrícolas, urbanos e industriais, bem como os biofluidos, óleo de soja e mamona (CORTEZ, 2008). A produção de biomassa, depende essencialmente da energia solar e da presença de água e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que pode ser expressa na Equação 1, em que água e gás carbônico se combinam para a formação de uma molécula de glicose, que é um açúcar simples, e oxigênio.

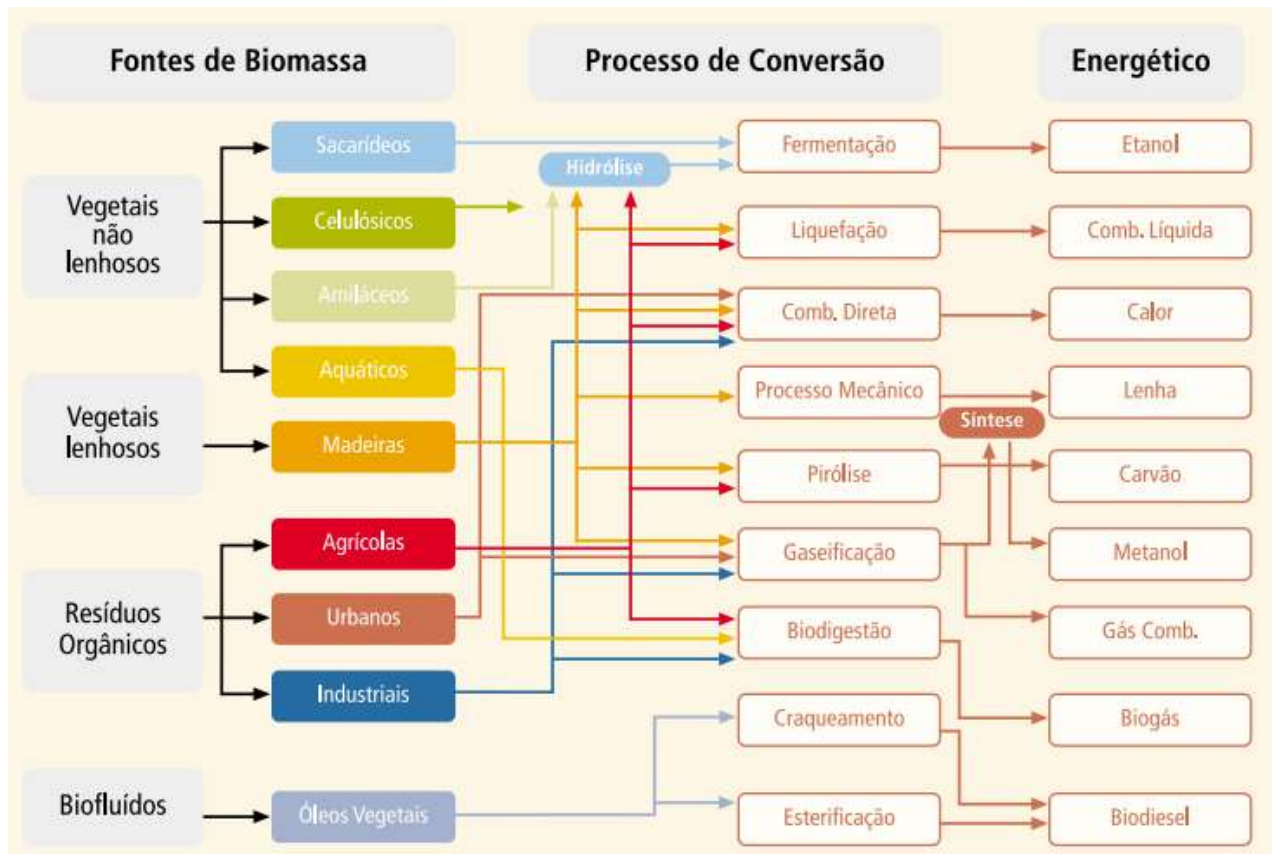


A conversão de biomassa em energia é considerada uma técnica de baixo carbono renovável, como no processo de fotossíntese, a partir do desenvolvimento da biomassa há uma retenção de  $\text{CO}_2$ , no entanto quando essa é queimada sob qualquer forma, libera  $\text{CO}_2$  novamente para atmosfera, ou seja, existe uma remoção de carbono no crescimento/desenvolvimento das plantas e uma liberação desse mesmo carbono quando há a conversão de energia. A metodologia pode ser considerada cíclica, porque o  $\text{CO}_2$  liberado está novamente disponível para integrar novas biomassas (RÖDER e THORNLEY, 2016).

Diferentes recursos podem ser aplicados na transformação da biomassa para fins energéticos (KHESHGI, PRINCE e MARLAND, 1999). E para essa aplicação, é importante estabelecer a disponibilidade da biomassa em uma determinada região, além de considerar os

aspectos econômicos (viabilidade) e ecológicos (preservação do meio ambiente) (NOGUEIRA, et al. 2003). A Figura 4 ilustra as principais tecnologias da conversão da biomassa em bioprodutos.

**Figura 4.** Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa.



Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2017.

Neste contexto, considerar as propriedades fundamentais da biomassa é importante para estabelecer qual processo de conversão termoquímica será utilizada. Os teores umidade, lignina, celulose, capacidade calorífica e produtividade são considerados um dos fatores importantes (ROCHA, et al. 2015).

### 3.5. Composição da biomassa

As biomassas de origens vegetais possuem características lignocelulósicas que contêm uma matriz multifuncional da classe dos biopolímeros: celulose, hemicelulose e lignina (RINALDI et. al., 2016). Bem como outras espécies menores como os compostos alifáticos e fenólicos. Diferentemente dos derivados do petróleo, a biomassa é um hidrocarboneto que possui átomos de oxigênio em sua estrutura química. A presença desse oxigênio, faz com que sua aplicação como combustível requeira menos oxigênio do ar, sendo menos poluente, porém, reduz a quantidade de energia liberada consequentemente reduzindo seu Poder Calorífico (PC), quando comparados com combustíveis de origens fósseis (RENDEIRO et. al., 2008).

O PC é a quantidade de energia liberada por um combustível na ocorrência da combustão completa e possui duas classificações: o Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI), onde PCS determinado em base seca é dado como uma das principais características da biomassa. Já o PCI só pode ser determinado quando o PCS é conhecido por meio da diferença da energia de condensação da água no calor da reação (RENDEIRO et. al., 2008).

A celulose é o componente dominante na composição da biomassa cerca de 40-60%. É um polímero linear da celobiose (dímero glicose-glicose) onde apresenta ligações de pontes de hidrogênio o que atribuem uma característica de um polímero rígido (HAMELINCK, HOOIJDONK e FAAIJ, 2005). A hemicelulose compõe cerca de 20-40% da biomassa, apresenta natureza amorfa e cadeias ramificadas de diferentes açúcares (*L-arabinose*, *D-galactose*, *D-glicose*, *D-manose* e *D-xilose*). A hemicelulose também apresenta quantidades menores de componentes não açucarados, como grupos acetil e devido à essa variedade, apresentam uma estrutura química complexa (LYND, WYMAN e GERNGROSS, 1999). A lignina está presente em todas as células lignocelulósica, cerca de 10–25% da composição da parece celular vegetal. Um polímero orgânico com estrutura complexa dos grupos fenilpropano e metoxi (HAMELINCK, HOOIJDONK e FAAIJ, 2005).

Outro fator importante é o teor de umidade que compõe as matérias primas oriundas de biomassas vegetais, uma vez que, a umidade influencia diretamente no PCS, consequentemente, gerando custos adicionais para a evaporação da água e diminuindo a eficiência do processo de conversão (RESENDE et al., 2013).

### 3.6.Sorgo

O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), é um cereal nativo da África, sendo considerado o quinto mais plantado no mundo, ficando atrás somente do trigo, arroz, milho e a cevada. É um cereal, que possui uma cultura adaptada para as zonas áridas e semi-áridas por possuir uma grande adaptabilidade a climas tropicais e temperados devido a sua eficiência no aproveitamento de água e a resistência a condições de baixa pluviosidade (ROONEY, et al., 2007; ZEGADA-LIZARAZU E MONTI, 2012; HAO et al., 2014; PANNACCI, E BARTOLINI, 2016).

O desenvolvimento floral do sorgo inicia apenas quando os dias possuem 12h e 20min (ROONEY e AYDIN, 1999), onde no Brasil, compreende o período entre 21 de março à 22 de setembro. Porém, quando o sorgo biomassa é produzido nos meses entre outubro a dezembro, período em que o fotoperíodo é superior a 12h e 20min, o florescimento da gema ocorrerá somente a partir de março do ano seguinte, ampliando a produção de hectare/ciclo (PARRELLA et al., 2010).

Devido a isso, a produtividade do sorgo está relacionada com a escolha do período do plantio, onde é aconselhável que seja efetuada no mês de novembro, aumentando seu período vegetativo já que a semeadura tardia pode afetar o potencial produtivo desse híbrido, implicando na umidade, conseqüentemente inviabilizando sua aplicação como combustível para geração de energia (EMBRAPA, 2015a). Existem 5 grupos de sorgo, com diferentes aplicações, são eles: o sorgo granífero (grão para alimentação animal), sorgo sacarino (silagem, açúcar, etanol de 1ª e 2ª geração, cogeração de energia), sorgo vassoura (vassoura), sorgo forrageiro (silagem) e sorgo biomassa ou lignocelulósicos (produção de energia) (EMBRAPA, 2015b).

Estudos realizado pela EMBRAPA Milho e Sorgo revelam que o sorgo biomassa possui características promissoras para produção de energia, podendo ser utilizados em usinas térmicas em sistemas de cogeração, por apresentar PC similar ao bagaço da cana-de-açúcar, do eucalipto e do capim elefante. Por produzir um montante em um curto intervalo de tempo, possui características econômicas favoráveis. Além de ser vigoroso, é resistente a doenças e pragas



(EMBRAPA, 2013a). A Tabela 2 apresenta a comparação do PCS e PCI de diferentes matérias primas.

**Tabela 2.** Poder Calorífico Superior e Inferior de diferentes matérias primas para aplicação como biomassa

<b>Material</b>	<b>PCS (kJ/kg)</b>	<b>PCI (kJ/kg)</b>
Capim Elefante	16985,3664	14129,5353
Bagaço cana-de-açúcar	18384,1612	16985,3664
Sorgo Biomassa	17984,5056	16685,6246

Fonte: Adaptado de EMBRAPA, 2013a.

Com 50% de umidade, os valores do PCS e PCI do sorgo biomassa, em base seca, está entre 4.300 kcal/kg e 3.900 kcal/kg de massa seca, respectivamente. Caracterizando-o como uma biomassa promissora para produzir energia por meio da queima direta em caldeira, ou em fornos (PARRELLA et al 2014).

### **3.7. Cogeração de energia**

Cogeração é um termo utilizado para nomear processos de produção conjunta de energia térmica e energia elétrica ou mecânica a partir de uma única fonte combustível, apresentando maior eficiência que aquela obtida em sistemas de geração exclusiva de vapor ou potência (WALTER, 1994). Os sistemas de cogeração que operam nas usinas, geralmente, utilizam biomassa residual como combustível para geração de energia elétrica. Estes sistemas são baseados na 1ª e 2ª lei da termodinâmica, onde os ciclos termodinâmicos são empregados. Neste processo há a queima/combustão da biomassa nas caldeiras e o vapor gerado é expandido em turbinas, gerando energia mecânica. Na sessão 3.8 o sistema de cogeração movido à esses ciclos é detalhado.

### **3.8. Ciclos termodinâmicos**

Os princípios conceituais que fundamentam a modelagem aqui empregada incluem a 1ª e 2ª leis da termodinâmica e equações da mecânica dos fluidos, que serão os elementos cruciais para calcular as propriedades termodinâmicas nos pontos de entrada e saída dos equipamentos

do sistema térmico, sendo possível aproximar os valores encontrados nas equações com valores em situações reais.

Para ciclos termodinâmicos, sistemas abertos, onde as variações de energias cinéticas e potenciais são desprezíveis e o sistema operando em regime permanente, a 1ª lei da termodinâmica é expressa na equação 2. Os índices 1 e 2 referem-se a entrada e saída do sistema, respectivamente.

$$\sum \dot{m}_1 \cdot h_1 - \sum \dot{m}_2 \cdot h_2 = \dot{W}_{vc} - \dot{Q}_{vc} \quad (2)$$

E as variáveis são:

$\dot{m}$ : taxa de massa que atravessa o volume de controle, em kg/s;

$h$ : entalpia do fluido nos pontos de entrada e de saída do volume de controle, em J/kg;

$\dot{W}_{vc}$ : trabalho realizado no tempo, ou potência, que atravessa as fronteiras do volume de controle, em J/s, ou W;

$\dot{Q}_{vc}$ : calor trocado nas fronteiras do volume de controle em J/s.

### 3.8.1. Ciclo de Carnot

Os ciclos térmicos reversíveis apresentam referência ao ciclo de Carnot que opera em condições isentrópicas e isotérmicas, estabelecendo a eficiência térmica de operação de qualquer ciclo. A Equação 3 apresenta essa eficiência térmica.

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (3)$$

$\eta$ : é o rendimento em %;

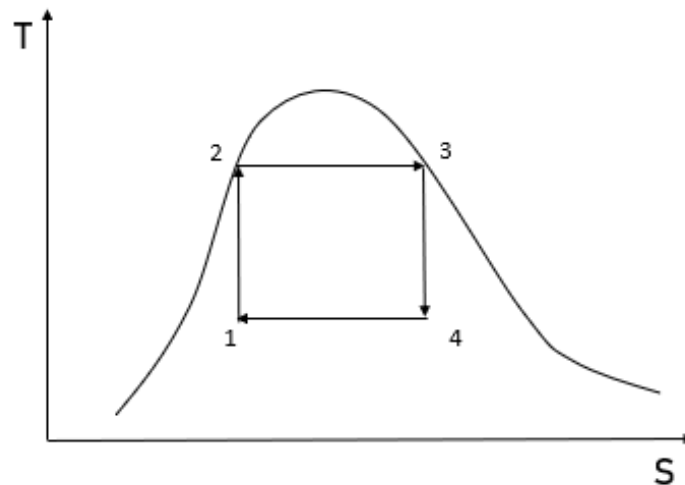
$\dot{Q}_H$ : Calor entregue para o ciclo pelo reservatório à temperatura  $T_H$  (temperatura superior), em J/s ou W;

$\dot{Q}_L$  Calor rejeitado pelo ciclo para um reservatório à temperatura  $T_L$  (temperatura inferior), em J/s ou W;

$W$ : Valor útil de trabalho produzido pelo sistema, em J/s ou W

Porém, o ciclo de Carnot apresenta dificuldade prática de operação. A Figura 5 ilustra as etapas de operação desse ciclo. Turbinas alimentadas (ponto 3) com vapor saturado geram correntes de saída com uma grande quantidade de líquido o que gera problemas de cavitação, o mesmo se estende às bombas, que quando alimentada por uma mistura líquido vapor (ponto 4), gera uma corrente de saída de líquido saturado (ponto 1).

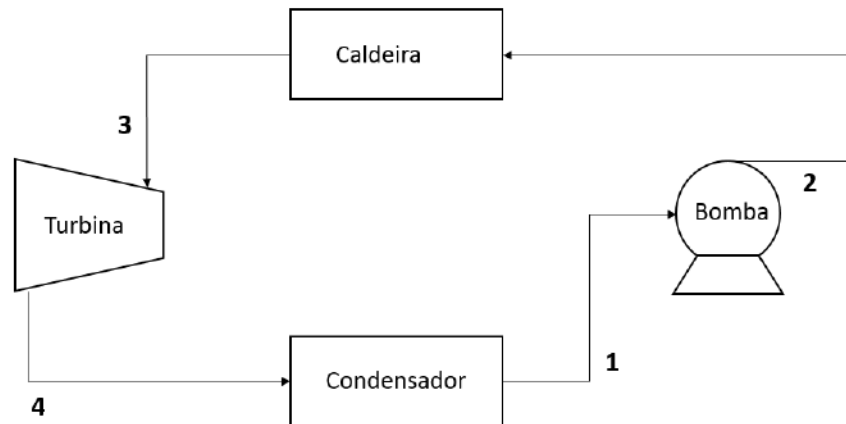
**Figura 5.** Ciclo de Carnot em um diagrama TS.



Fonte: Adaptado de Smith, et. al., 2004.

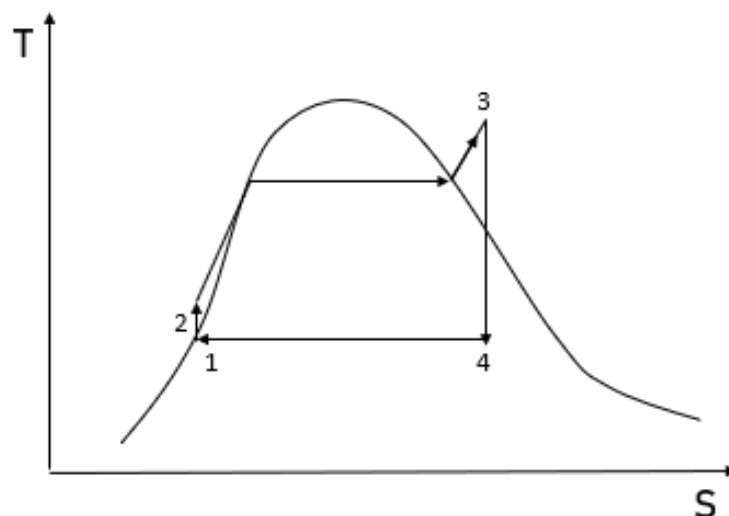
### 3.8.2. Ciclo Rankine

O ciclo Rankine é proposto para efetuar a simulação, pois tem como base quatro processos que operam no regime estacionário e o fluido de trabalho (água) apresenta mudança de fase entre as etapas ocorrendo à pressão constante, como representado na Figura 6.

**Figura 6.** Ciclo Rankine.

Fonte: Traduzido pelo autor de Smith et. al., 2004.

O que difere o ciclo de Carnot para o ciclo Rankine são as etapas (3-4) em que a combustão completa do combustível é realizada em uma caldeira ou um gerador de vapor, onde produz um vapor superaquecido que é enviado para uma turbina onde há a transformação da energia mecânica em elétrica. E a etapa 4-1, onde há uma condensação completa gerando líquido saturado para ser bombeado novamente na caldeira. Para o ciclo Rankine ideal, as perdas de pressão na caldeira e no condensador são desprezíveis e a bomba e turbina são considerados isentrópicos, ou seja, o fluido se expande reversivelmente e adiabaticamente. A Figura 7 representa o ciclo em um diagrama temperatura *versus* entropia.

**Figura 7.** Diagrama do ciclo Rankine ideal

Fonte: Adaptado de Smith, et. al., 2004.

Na etapa 1-2 há um bombeamento adiabático e reversível (isentrópico) até a pressão do evaporador, produzindo líquido sub-resfriado. O cálculo do trabalho nessa etapa é dado pela Equação 4.

$$W_e = \Delta H \quad (4)$$

$W_e$ : trabalho isentrópico em J/s, ou W;

$\Delta H$ : variação da entalpia.

Entretanto, para cálculo do trabalho são necessários os valores de entalpia do líquido sub-resfriado, porém, esses valores nem sempre estão disponíveis, então uma relação fundamental para o processo isentrópico é dada por meio da Equação 5.

$$dH = VdP \quad (5)$$

Combinando a Equação 4 com a 5 temos:

$$W_e(\text{isentrópico}) = (\Delta H)_S = \int_{P_1}^{P_2} VdP \quad (6)$$

$W_e(\text{isentrópico})$ : trabalho isentrópico em J/s, ou W;

$(\Delta H)_S$ : variação da entalpia do sistema isentrópico;

$\int_{P_1}^{P_2}$  : integral da pressão do ponto 1 até pressão 2;

$V$ : volume do sistema;

$dP$ : diferencial da pressão.

Para líquidos bem afastados do ponto crítico, se considera uma hipótese usual em que  $V$  é independente de  $P$ , então a integração da Equação 7 pode ser representada pela Equação 7.

$$W_e(\text{isentrópico}) = (\Delta H)_S = V (P_2 - P_1) \quad (7)$$

Onde:

$P_2$ : Pressão no ponto 3 e

$P_1$ : Pressão no ponto 1.

Na etapa 2-3 há um aquecimento a pressão constante dentro da caldeira ou gerador de vapor. Essa etapa recebe água líquida sub-resfriada e o gera vapor superaquecido até uma temperatura bem acima da temperatura de saturação. A Equação 8 calcula a quantidade de calor dessa etapa.

$$q_{in} = h_3 - h_2 \quad (8)$$

$q_{in}$ : calor que entra no sistema;

$h_3$ : entalpia do ponto 3;

$h_2$ : entalpia do ponto 2.

Na etapa 3-4 há uma expansão adiabática e reversível do vapor em uma turbina até a pressão de entrada do condensador. Essa etapa pode produzir uma exaustão úmida, embora a quantidade de umidade não seja muito grande. As equações 9 e 10 calculam o trabalho gerado na turbina.

$$\dot{W}_e = \dot{m} \Delta H = \dot{m}(H_3 - H_4) \quad (9)$$

$$\dot{W}_e = \Delta H = (H_3 - H_4) \quad (10)$$

Geralmente as condições da alimentação  $T_4$  e  $P_4$  e a saída  $P_3$  são fixas, dessa forma somente  $H_4$  é conhecida, então o cálculo do trabalho pela equação de energia não seria possível. Porém como o fluido no interior da turbina se expande adiabaticamente e reversivelmente, o processo é isentrópico, ou seja,  $S_3 = S_4$ , fixando o estado final do fluido e determinando o  $H_3$ . Então o trabalho pode ser calculado pela Equação 11.

$$W_e(\text{isentrópico}) = (\Delta H)_S = H_3 - H_4 \quad (11)$$

Na etapa 4-1 há uma condensação a temperatura e pressão constantes para produzir líquido saturado que retorna para a caldeira. Esse calor gerado é calculado por meio da Equação 12.

$$q_{out} = h_4 - h_1 \quad (12)$$

Onde:

$q_{out}$ : calor que sai no sistema;

$h_4$ : entalpia do ponto 3;

$h_2$ : entalpia do ponto 2.

### 3.9. Modelos termodinâmicos

A modelagem apresentada nos itens 3.8.1 e 3.8.2 baseiam-se em propriedades da tabela de vapor d'água e funciona como cálculos teóricos na predição dos cenários apresentados (ciclo Rankine). Para os cálculos de balanço de massa e energia, o Aspen Plus utiliza um conjunto de operações unitárias e as equações de estado disponíveis em seus bancos de dados.

Para fundamentar e modelar o processo, as equações de estado cúbicas serão utilizadas para descrever as propriedades dos fluidos e sólidos sob um dado conjunto de condições físicas. Para esse projeto, os modelos termodinâmicos IAPWS-95 e Peng-Robinson serão utilizados como recurso para calcular o balanço de massa e energia.

### 3.9.1. IAPWS-95

Conhecido como *International Association for the Properties of Water and Steam* na tradução Associação Internacional para as Propriedades da Água e Vapor esse modelo termodinâmico é oferecido no banco de dados Aspen Plus. É recomendado para o cálculo das propriedades termodinâmicas da água pura em suas fases fluidas, incluindo o equilíbrio líquido vapor, com base na tabela das propriedades de água e vapor.

A formulação do modelo IAPWS-95 está na forma de uma equação fundamental explícita na energia livre de Helmholtz. A parte residual da energia livre de Helmholtz foi ajustada às seguintes propriedades:

- A. Propriedades térmicas da região monofásica e a fase líquida incluindo o equilíbrio de fase (relações de Maxwell) e
- B. Propriedades calóricas - capacidade térmica isocórica específica, capacidade térmica isobárica específica, velocidade do som, diferenças na entalpia específica e na energia interna específica, coeficiente de Joule-Thomson e coeficiente de aceleração isotérmico.

O modelo IAPWS-95 é válido para a faixa de temperatura de 251,2 K à 1273 K e pressões de 209,9 MPa à 1000 MPa. Em toda essa faixa esse modelo representa os dados mais precisos dentro da incerteza experimental.

Na região de fluido estável, a formulação da IAPWS-95 pode ser extrapolada além dos limites de validade listados acima. O modelo se comporta razoavelmente bem quando extrapolado para pressões de até 2000 MPa e temperaturas de até 3000 K, desde que as condições estejam na região do fluido (menor que a pressão de fusão na temperatura especificada e maior que a temperatura de fusão na pressão especificada).



### 3.9.2. Peng-Robinson

A equação de estado padrão de Peng-Robinson (PR) é recomendada para hidrocarbonetos, como processos de processamento de gás, refinaria e petroquímica. Seus resultados são comparáveis aos dos métodos de propriedade que usam a equação de estado padrão de Redlich-Kwong-Soave (RKS). A Equação 13 representa a pressão em função do volume e temperatura.

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{\alpha a}{v(v+b)+b(v-b)} \quad (13)$$

Onde:

$$a: \frac{0,45747 R^2 T_c^{2,5}}{P_c}$$

$$\alpha: (1 + (0,48 + 1,574 \omega - 0,17613 \omega^2)(1 - T_r^{0,5}))^2$$

$$T_r: \frac{T}{T_c}$$

$$b: \frac{0,07780 R T_c}{P_c}$$

$P$ : Pressão;

$P_c$ : Pressão crítica

$R$ : Constante universal dos gases;

$T$ : Temperatura;

$T_c$ : Temperatura crítica;

$T_r$ : Temperatura reduzida;

$a$ : Parâmetro da equação do estado cúbica;

$v$ : Volume;

$b$ : Parâmetro da equação do estado cúbica e

$\omega$ : Fator de acêntrico

Considerando a derivada parcial da pressão em função da temperatura a volume constante.

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V = \frac{R}{V-b} \quad (14)$$

Onde:

$\partial P$  = Derivada parcial em função do volume;

$\partial T$  = Derivada parcial em função da temperatura.

As relações fundamentais das propriedades úteis para cálculo de entalpia a partir das equações de estado partem de uma equação geral em que a entalpia é representada em função da temperatura e pressão.

$$dH = \underbrace{\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P}_{I} dT + \underbrace{\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T}_{II} dP \quad (15)$$

Onde:

$dH$  = Diferencial da entalpia;

$dT$  = Diferencial da temperatura;

$dP$  = Diferencial da pressão.

Onde o termo I é igual à  $C_p$  e o termo II é simplificada pelo critério de Maxwell se reduzindo a:

$$dH = C_p dT + \left[ V - T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \right] dP \quad (16)$$

Onde:

$C_p$  = Capacidade calorífica a pressão constante.

Para entropia:

$$dS = C_p \frac{dT}{T} + \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P dP \quad (17)$$

Onde:

$dS$  = Diferencial da entropia.

Considerando a entalpia em função da temperatura e volume temos:

Onde:

$$dH = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_V dT + \left( \frac{\partial H}{\partial V} \right)_T dV \quad (18)$$

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1. Programa computacional**

O Aspen Plus é o simulador de processos mais utilizado no mundo e também em várias indústrias pois realiza estimativa de custos, fornece o balanço de material e energético do processo e possui operações unitárias que proporciona representar o processo de forma bem realista. Além disso, apresenta um pacote de propriedades termodinâmicas e métodos de estimativas bem completo (ASPEN, 2019).

O Aspen Plus V. 11, foi o simulador utilizado neste trabalho. Nas próximas seções, serão detalhadas como as simulações foram desenvolvidas.

#### **4.1.1. Inserção de componentes no simulador**

A programa computacional Aspen Plus apresenta em seu banco de dados os componentes lignocelulósicos que podem representar a biomassa, além de outros componentes importantes para representar o processo de produção de energia elétrica. Porém, para a inserção dos componentes no simulador deve levar em conta a complexidade da matéria prima.

Por ser um híbrido que pode ser submetido a processos de melhoramento na EMBRAPA milho e sorgo, essa matéria prima apresenta composição variável, sendo afetada por condições de clima, safra, solo, entre outros. Na seção 4.1.2 serão apresentadas as frações das composições do sorgo biomassa que serviram como referencial para simular o processo.

#### **4.1.2. Definição da composição da matéria prima**

As características mais importantes da biomassa para o processo de produção de eletricidade são os teores de fibras, PCS e PCI. Visto que a composição do sorgo biomassa pode variar de acordo com as condições de clima e solo e da região (EMBRAPA, 2013b). De acordo com estudos realizados pelo programa de melhoramento de sorgo da EMBRAPA, diferentes

genótipos de sorgo possuem potencial energético, e para essa finalidade, materiais com maiores teores de lignina aumentam o poder calorífico da biomassa (EMBRAPA, 2013b).

Na Tabela 3 é apresentado a composição química de diferentes espécies do sorgo.

**Tabela 3.** Composição química de diferentes genótipos de sorgo.

Genótipo	Espécie	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)
Biomassa	BD 7607	20,44	30,57	6,70
	BRS 716	22,10	35,65	7,91
Sacarino	BD 5404	23,12	32,93	7,89
	BRS 511	25,98	31,96	6,7
Forrageiro	BD 1615	24,46	34,61	6,11
	BRS 655	19,13	37,37	5,79

Fonte: Adaptado de Pimentel, et. al, 2017.

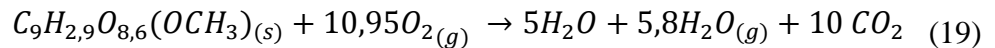
Essas composições foram obtidas experimentalmente por Pimentel, et. al, (2017) e serviram como referencial para alimentar o banco de dados do simulador.

#### 4.1.3. Inserção de componentes da biomassa

A composição elementar dos componentes presente no Aspen Plus utiliza a base de dados de elementos da biomassa desenvolvida pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável (LNER) (WOOLEY e PUTSCHE, 1996). Sendo assim, os dados de composição da celulose e hemicelulose que representam a biomassa já estavam cadastrados no simulador, porém, a composição que representa a lignina no simulador, apresenta fórmula ( $C_9H_{10}O_2$ ) semelhante a lignina da madeira.

Deste modo, foi necessário buscar na literatura, informações sobre lignina que se aproximassem da lignina do sorgo biomassa. De acordo com Marabezi (2008) a fórmula que melhor representa a lignina presente na cana-de-açúcar é dada por  $C_9O_{2,9}H_{8,6}(OCH_3)$ , então, essa foi utilizada como parâmetro para inserir no simulador, uma vez que a não foi encontrado dados referentes a lignina do sorgo na literatura, porém, o Aspen Plus, requer alguns parâmetros para a inserção de novos componentes, como peso molecular e entalpia de formação.

A nova lignina foi introduzida como sólido e para determinar o valor de entalpia de formação com o novo peso molecular, foi considerado o PCS/entalpia de combustão da lignina do bagaço da cana-de-açúcar apresentado por Stanmore, 2010 com valor de 27000 kJ/kg. Os cálculos foram realizados utilizando a reação de combustão da lignina na presença de oxigênio por meio da equação da variação da entalpia representada nas Equações 19 e 20, respectivamente.



$$\Delta H = H_p^f - H_R^f \quad (20)$$

Onde:

$H_p^f$  = Entalpia de formação dos produtos e

$H_R^f$  = Entalpia de formação dos reagentes.

A Equação 20 se resume a:

$$\Delta H_{\text{combustão lignina}} = (H_{H_2O}^f + H_{CO_2}^f) - H_{lignina}^f \quad (21)$$

Os cálculos foram realizados utilizando os dados da entalpia de formação da água e do dióxido de carbono retirados da literatura (SANDLER, 1989).

## 4.2.Determinação dos parâmetros utilizados na simulação

### 4.2.1. Especificações técnicas

Importante destacar, que é inexistente um ciclo que alcance um rendimento térmico,  $\eta$ , superior ao do ciclo de Carnot, nas mesmas condições de temperatura. Para um aumento de temperatura, o processo se inviabilizaria, pois seria necessário utilizar equipamentos construídos com ligas especiais. Geralmente, a temperatura média do vapor é aproximadamente

é 560 °C, deste modo, foi estabelecido que para este trabalho a temperatura máxima alcançada seria 540°C.

Na intenção de aumentar a eficiência do ciclo, uma alternativa é trabalhar com caldeiras operando em altas pressões. Este aumento de pressão é obtido por meio da quantidade de calor direcionada ao gerador de vapor em virtude da necessidade de uma maior vazão de vapor na alimentação da turbina. Neste trabalho, simulou-se a planta operando com pressões elevadas, nos valores de 40, 70 e 140 bar.

As simulações foram realizadas de acordo com as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante de equipamentos. As especificações técnicas estão apresentadas nas Tabelas 4, 5 e 6.

**Tabela 4.** Especificações técnicas dos equipamentos para pressão de operação da caldeira a 40 bar.

ACIONAMENTO	GERADOR			
	Pontos de operação	1	2	Unidades
Potência nos bornes do gerador	27280	20346		kW/h
Pressão de vapor de entrada	40	40		bar
Temperatura de vapor de entrada	450	450		°C
Vazão de vapor de entrada	108000	84000		kg/h
Pressão de vapor na saída	0,11	0,11		bar
Temperatura de vapor na saída	47	47		°C
Vazão de vapor na saída	108000	84000		kg/h
Consumo específico	3,96	4,13		kg vap/kW h
Vazão de água de resfriamento (turbina, gerador e condensador)	6500	6500		m <sup>3</sup> /h
Vazão de água de reposição	195	195		m <sup>3</sup> /h
Rotação da turbina	6000	6000		rpm
Rotação do gerador	1800	1800		rpm

**Tabela 5.** Especificações técnicas dos equipamentos para pressão de operação da caldeira a 70 bar.

ACIONAMENTO Pontos de operação	GERADOR		Unidades
	1	2	
Potência nos bornes do gerador	31390	23426	kW/h
Pressão de vapor de entrada	70	70	bar(a)
Temperatura de vapor de entrada	530	530	°C
Vazão de vapor de entrada	108000	84000	kg/h
Pressão de vapor na saída	0,11	0,11	bar(a)
Temperatura de vapor na saída	47	47	°C
Vazão de vapor na saída	108000	84000	kg/h
Consumo específico	3,44	3,59	kg vap/kW/h
Vazão de água de resfriamento (turbina, gerador e condensador)	6500	6500	m <sup>3</sup> /h
Vazão de água de reposição	195	195	m <sup>3</sup> /h
Rotação da turbina	6000	6000	rpm
Rotação do gerador	1800	1800	rpm

**Tabela 6.** Especificações técnicas dos equipamentos para pressão de operação da caldeira a 140 bar.

ACIONAMENTO Pontos de operação	GERADOR		Unidades
	1	2	
Potência nos bornes do gerador	32986	24672	kW/h
Pressão de vapor de entrada	140	140	bar(a)
Temperatura de vapor de entrada	540	540	°C
Vazão de vapor de entrada	108000	84000	kg/h
Pressão de vapor na saída	0,11	0,11	bar(a)
Temperatura de vapor na saída	47	47	°C
Vazão de vapor na saída	108000	84000	kg/h
Consumo específico	3,27	3,4	kg vap/kW/h
Vazão de água de resfriamento (turbina, gerador e condensador)	6500	6500	m <sup>3</sup> /h
Vazão de água de reposição	195	195	m <sup>3</sup> /h
Rotação da turbina	6000	6000	rpm
Rotação do gerador	1800	1800	rpm

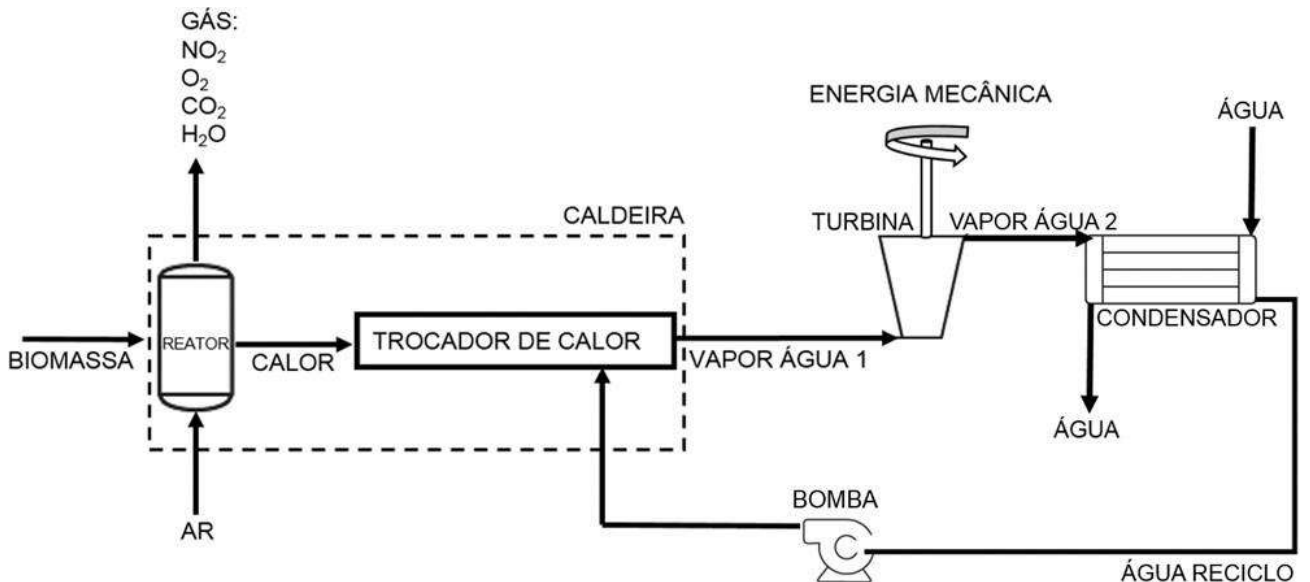
#### 4.2.2. Simulação

Determinado o pacote termodinâmico e conhecendo as especificações técnicas dos equipamentos, os parâmetros fundamentais para a simulação foram introduzidos no simulador



Aspen Plus®. Neste artigo, o processo simulado foi baseado do diagrama de blocos apresentado na Figura 8.

**Figura 8.** Diagrama de blocos do processo da geração de energia por meio da biomassa lignocelulósica.



Fonte. Amaral, 2018.

O Aspen Plus, permite cada equipamento opere utilizando separadamente um modelo termodinâmico, deste modo, para o reator foi utilizado o modelo Peng-Robinson e os demais, foram usados o modelo IAPWS-95. Uma vazão determinada como biomassa (sorgo) na Figura 8, foi alimentada um o reator com taxa de 22000 kg/h, baseando nas especificações técnicas dos equipamentos. A composição da biomassa inserida no programa encontra-se na Tabela 7 e foi representada por celulose, hemicelulose, lignina, cinzas em base seca.

**Tabela 7.** Composição do sorgo inseridas no simulador.

Genótipo	Espécie	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)
Biomassa	BD 7607	20,44	30,57	6,70	3,79
	BRS 716	22,10	35,65	7,91	6,50
Sacarino	BD 5404	23,12	32,93	7,89	6,23
	BRS 511	25,98	31,96	6,70	6,31
Forrageiro	BD 1615	24,46	34,61	6,11	6,49
	BRS 655	19,13	37,37	5,79	6,97

Fonte: Adaptado de Pimentel, et. al, 2017.

A quantidade de umidade contida na matéria prima foi inserida no simulador de acordo com a Tabela 8.

**Tabela 8.** Teor de umidade da matéria prima inserida no simulador.

Genótipo	Espécie	Umidade (%)
Biomassa	BD 7607	53,17
	BRS 716	59,01
Sacarino	BD 5404	55,76
	BRS 511	53,17
Forrageiro	BD 1615	57,01
	BRS 655	60,49

Fonte: Adaptado de Pimentel, et. al, 2017.

Paralelamente a biomassa, uma corrente de ar (21% oxigênio e 79% nitrogênio), foi adicionado no reator em 20% de excesso. Essas correntes foram direcionadas ao reator e este operando adiabaticamente e um rendimento de 100%.

A unidade geradora de vapor, foi representado no diagrama de blocos da Figura 8 como parte da caldeira, esse é quem produz o vapor necessário para o sistema. O vapor de água obtido na transferência de calor da queima da biomassa foi tido com pressões e temperaturas que variavam entre 40 a 140 bar, e 450 e 540 °C, respectivamente, baseando-se nas especificações técnicas cedidas pelo fabricante dos equipamentos envolvidos na produção de energia.

Após a conversão da energia interna (U) em trabalho no eixo, a corrente, identificado como vapor 2 na Figura 1, tem temperatura reduzida a aproximadamente 99°C. A turbina operou considerando eficiência de 85% pois levou-se em considerações as perdas de energia por atrito e transferência de calor.

O condensador foi projetado para operar com vazões especificadas pelo fabricante, que permite trabalhar com corrente de entrada elevada e baixas pressões, o que justifica o fluido liberado pelo condensador apresentar temperaturas próximas à ambiente.

A bomba alimentada com líquido resfriado, tem como função controlar a vazão de água no reciclo, que retorna ao trocador de calor, que interfere na eficiência do ciclo termodinâmico.

Com o auxílio do Aspen Plus®, foi obtido o balanço material e energético, potencial energético gerado por quilograma de biomassa bem como os custos associados a esse processo.

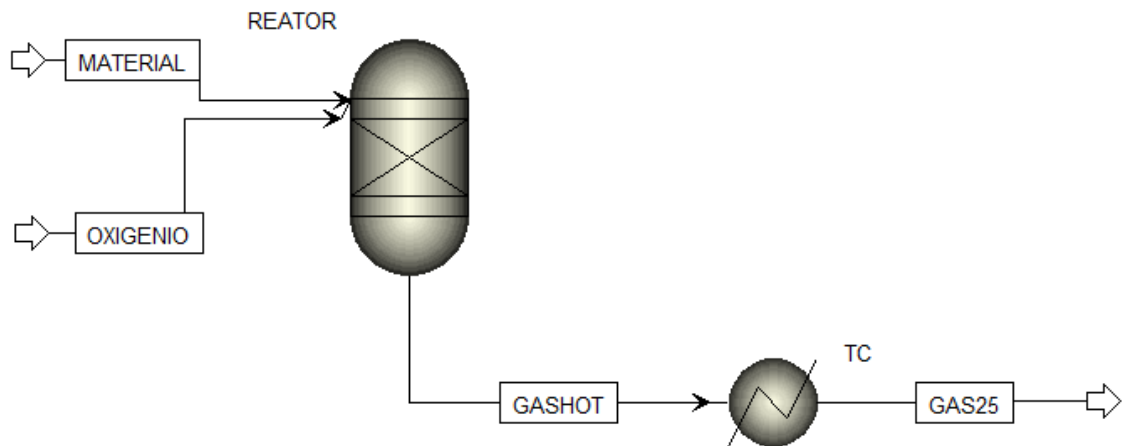
Para validar a simulação, foram realizados dois testes:

- A verificação do PCS do sorgo biomassa, com dados obtidos da literatura e valores obtidos no programa computacional Aspen Plus e
- A validação da potência teórica e experimental, que foi dada por meio da comparação do trabalho obtido na simulação.

#### 4.2.3. Verificação do poder calorífico

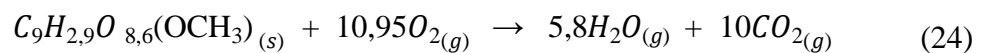
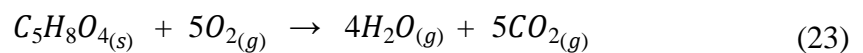
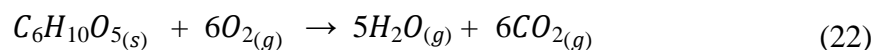
Com o objetivo de representar um calorímetro e validar a simulação, foi calculado o PCS do combustível. Para isso, foi considerado os mesmos parâmetros estudados por Dias, 2011. O material foi submetido a um reator estequiométrico considerando uma conversão de 100%, onde 1kg/s desse material foi queimado. A Figura 9 representa a simulação do calorímetro realizada do Aspen Plus.

**Figura 9.** Esquema da simulação do calorímetro para determinação do PCS.



Fonte. Aspen Plus, 2020.

Os produtos da reação (gases gerados na combustão) foram direcionados a um trocador de calor (TC) onde foram resfriados até uma temperatura de 25°C. A energia liberada no TC corresponde ao PCS do material queimado. Esse esquema foi realizado para os 3 principais componentes do sorgo biomassa (celulose, hemicelulose e lignina) considerando a estequiometria das reações representada nas Equações 22, 23 e 24 respectivamente.



#### 4.2.4. Verificação da potência teórica e experimental

A validação por meio da verificação da potência teórica e experimental foi dada a partir do confronto dos resultados obtidos no Aspen, intitulado trabalho teórico, por meio da Equação 25 e com dados obtidos na literatura a partir de dados experimentais, este, que nessa dissertação

foi intitulado trabalho experimental. Estes cálculos foram realizados utilizando valores de entalpia de entrada e saída da turbina encontrados na simulação, utilizando dados da tabela de vapor d'água encontradas na literatura, além disso, também foram utilizadas as vazões mássicas do processo.

O Trabalho teórico, operando adiabaticamente, foi calculado por meio da Equação 25.

$$W_{teórico} = \Delta H \dot{m} \quad (25)$$

$W_{teórico}$  = Trabalho teórico, em MW;

$\Delta H$  = Variação de entalpia, em MW;

$\dot{m}$  = Vazão mássica, em kg/h.

#### 4.3. Análise econômica

A análise econômica foi avaliada levando em consideração o custo de capital para construção da fábrica, o custo operacional da fábrica, análise de rentabilidade do processo proposto, análise e seleção do melhor processo para geração do produto final, valor de venda e análise do potencial econômico do produto no mercado.

Assim, a análise econômica nesse trabalho será baseada na proposta de PETERS, TIMMERHAUS e WEST (2003), que separa a análise econômica por sessões conforme os parâmetros listados a seguir:

- Os custos do equipamento serão adquiridos na sessão "*Equipment Costs*";
  
- Todo capital (capital fixo e de giro) envolvido com compra dos equipamentos envolvidos no processo serão calculados na sessão "*Capital Inv*";

- Na sessão “*Material & Labor*”, foram informados os preços dos produtos e matérias-primas, além da mão-de-obra requerida;
- Na Sessão “*Utilities*”, foi informado as quantidades de utilidades anuais necessárias com as unidades apropriadas;
- Na sessão “*anual total product cost*”, foi calculado o custo total anual do produto;
- Na sessão “*Evaluation*”, foi estabelecido o fluxo de caixa e calcular as medidas de rentabilidade comum, tais como, tempo de pagamento, retorno do investimento e retorno líquido.

#### 4.3.1. Estudo da viabilidade econômica do processo

O estudo da viabilidade econômica, foi baseado na montagem de um fluxo de caixa considerando os recursos necessários para a implantação e operação da planta de eletricidade (despesas) e os recursos disponíveis para o pagamento destes custos (receitas).

A planta foi considerada operando 24 horas por dia e 330 dias por ano, sendo um total de 7920 horas de operação por ano. A taxa de imposto foi considerada de 28% e 10 anos foi o tempo de vida útil estabelecido da planta, para atingir um retorno de investimento de 15% ao ano, com um tempo de retorno de 3,6 anos e um valor presente líquido igual a zero, conforme proposto por PETERS, IMMERHAUS e WEST, 2003. As medidas de rentabilidade de retorno de investimento, tempo de retorno e valor presente líquido, foram calculados de acordo com as equações 25, 26 e 27 respectivamente.

$$\text{Retorno de investimento} = \frac{100 \cdot \text{lucro líquido anual}}{(\text{Tempo}_{(\text{ano})}) \cdot \text{capital de investimento total}} \quad (26)$$

$$\text{Tempo de retorno} = \frac{\frac{\text{Capital fixo de investimento}}{\text{Fluxo de caixa operacional anual}}}{\text{Tempo}_{(\text{ano})}} \quad (27)$$

$$\text{Retorno liq.} = \frac{\text{Lucro liq anual}}{\text{Tempo}_{(\text{ano})}} + \text{Capital total de investimeto}$$

$$* \% \text{desconto de composição anual} \quad (28)$$

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Simulação

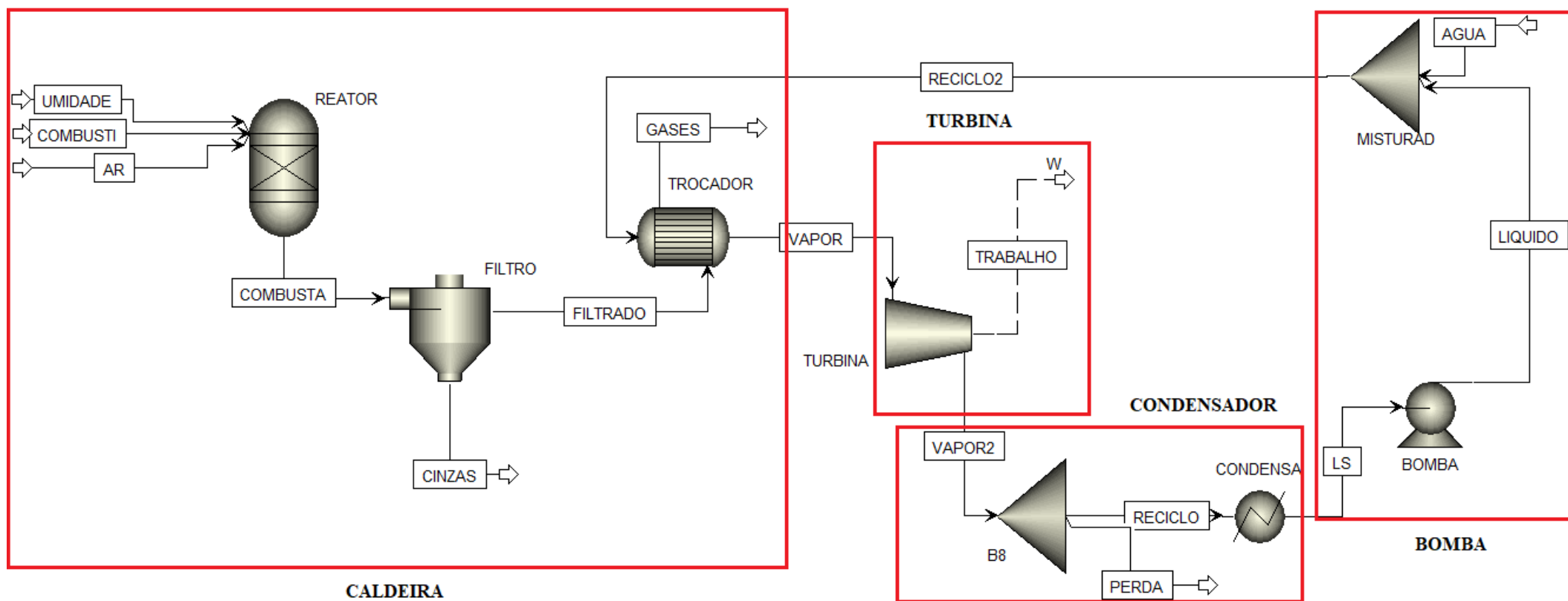
Para a execução da simulação no Aspen Plus e construção do diagrama de fluxo de processo (DFP) de conversão de biomassa em energia elétrica, o processo foi dividido em etapas baseadas no ciclo Rankine. A Figura 10 ilustra o DFP realizado no programa computacional Aspen Plus.

As etapas do processo estão descritas a seguir:

- CALDEIRA: Representa a alimentação da biomassa e é onde ocorre a sua combustão, tendo por objetivo a formação de vapor;
- TURBINA: Etapa onde há a conversão da energia interna em trabalho no eixo;
- GERADOR: Etapa onde irá ocorrer a conversão de energia mecânica em energia elétrica;
- CONDENSADOR: Etapa onde há o resfriamento do vapor e ocorre a formação de líquido saturado e
- BOMBA: Etapa onde o líquido saturado é devolvido ao processo, por meio do reciclo.



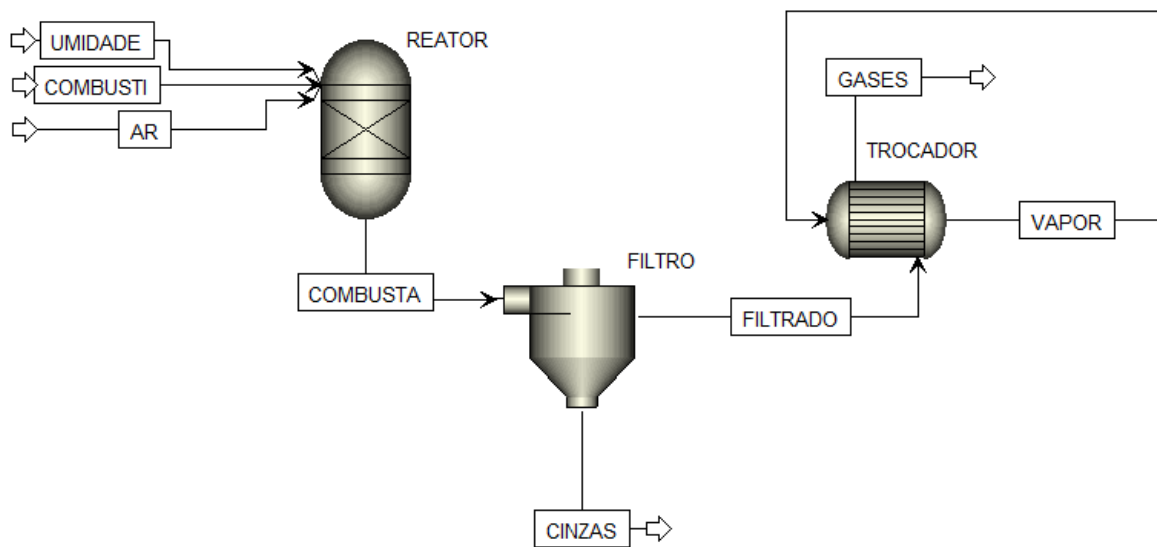
**Figura 10.** Fluxograma das etapas envolvidas na simulação.



Fonte: Aspen Plus, 2020.

O Aspen Plus não apresenta em seu banco de dados um único equipamento que represente separadamente as etapas do processo, desse modo, foi necessário um conjunto de operações unitárias para representar o processo. A etapa que representa a Caldeira é demonstrada na Figura 11.

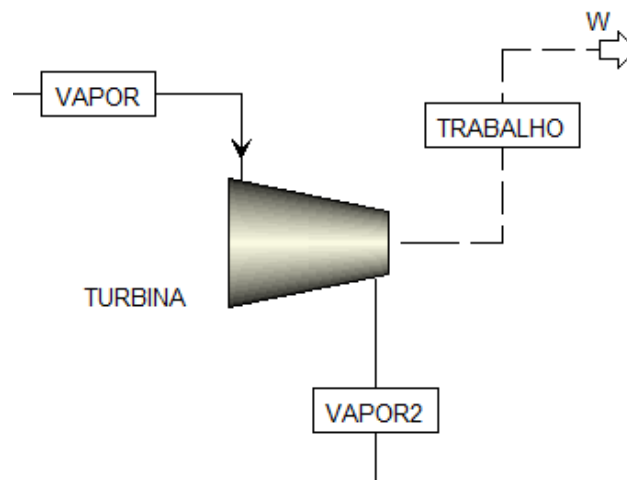
**Figura 11.** Conjunto de operações unitárias que representam a caldeira do processo.



Fonte: Aspen Plus, 2020.

Um reator foi alimentado com uma corrente de combustível (matéria prima), umidade (presente na biomassa) e uma quantidade de ar, com oxigênio em excesso. Nesse reator ocorre a queima da biomassa, e esse é direcionado para um filtro onde há a separação das cinzas. O filtrado é conduzido ao trocador de calor, onde o produto resultante da queima da biomassa aquece a água até na sua fase vapor, para a formação do vapor superaquecido, esse vapor é encaminhado para turbina. Essa etapa é demonstrada na Figura 12. Os gases gerados após a troca de temperatura são descartados na atmosfera.

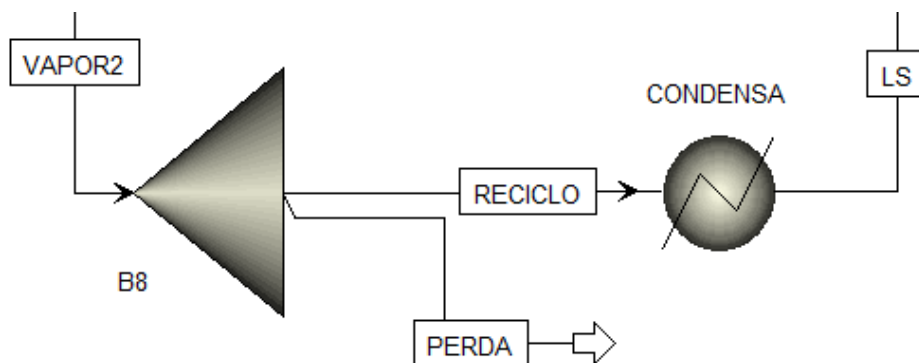
**Figura 12.** Turbina do processo.



Fonte: Aspen Plus, 2020.

A turbina é alimentada pelo vapor super aquecido, na pressão e temperatura especificada conforme Tabela 4, 5 e 6 na sessão 4.2.1. O trabalho realizado pela turbina é dado por meio conversão da energia cinética em energia mecânica que foi aplicada nas palhetas móveis do equipamento. Dado o aumento de velocidade das paletas, há uma redução da entalpia, da pressão e da temperatura do vapor. Em valores absolutos, a velocidade de saída da corrente denominada “vapor2” é menor que a velocidade de entrada da corrente “vapor”. A corrente “vapor2” com título de 90% é direcionada a etapa do condensador, que possui um separador, onde uma há uma perda de 10% de vapor, o restante (90%) é resfriado até a formação líquido subresfriado. A Figura 13 ilustra essa etapa.

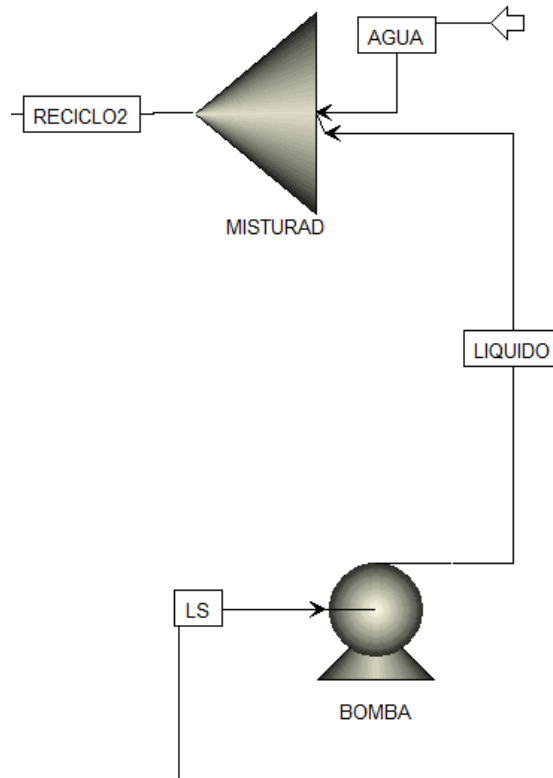
**Figura 13.** Etapa referente ao condensador do processo.



Fonte: Aspen Plus, 2020.

A corrente “líquido” subresfriado é direcionado, por meio de um reciclo, para o trocador de calor juntamente com uma corrente de água fria a fim de garantir a continuidade do processo em ciclo fechado. A Figura 14 representa a etapa de bombeamento e reciclo do processo.

**Figura 14.** Etapa com o bombeamento e reciclo do processo.



Fonte: Aspen Plus, 2020.

As simulações foram executadas de acordo com as condições de temperatura, pressão, vazão, composição e outros cedidos pelos fornecedores. Os dados de vazão e fração mássica, temperatura e pressão das correntes encontram-se dispostos nas Tabelas 9, 10 e 11, para a espécie BD 5404 em diferentes condições de temperatura e pressão.





Após feita as simulações, foram coletados os dados de trabalho teórico e eficiência do processo. As simulações foram realizadas para as 6 espécies do sorgo, nas pressões de 40 bar, 70 bar e 140 bar, como pode ser observado nas Tabelas 12, 13 e 14.

**Tabela 12.** Trabalho teórico e eficiência à 40 bar.

Espécie	Trabalho Teórico (MW/h)	Eficiência (%)
BD 7607	17,67	20,34
BRS 716	17,55	20,35
<b>BD 5404</b>	<b>17,77</b>	<b>20,42</b>
BRS 511	17,48	20,37
BD 1615	17,27	20,44
BRS 655	17,12	20,41

**Tabela 13.** Trabalho teórico e eficiência à 70 bar.

Espécie	Trabalho Teórico (MW/h)	Eficiência (%)
BD 7607	20,48	23,66
BRS 716	20,41	23,74
<b>BD 5404</b>	<b>20,58</b>	<b>23,74</b>
BRS 511	20,26	23,69
BD 1615	19,93	23,69
BRS 655	19,77	23,66

**Tabela 14.** Trabalho teórico e eficiência à 140 bar.

Espécie	Trabalho Teórico (MW/h)	Eficiência (%)
BD 7607	22,68	26,46
BRS 716	22,50	26,43
<b>BD 5404</b>	<b>22,78</b>	<b>26,52</b>
BRS 511	22,43	26,48
BD 1615	22,06	26,47
BRS 655	21,92	26,49

Após a análise dos resultados obtidos é importante destacar a influência das condições de operações sob o processo, uma vez que, quanto maior é submetida a pressão do vapor na

alimentação da turbina, maior é a quantidade de trabalho gerado por essa turbina, conseqüentemente, a eficiência do processo é aumentada.

Pimentel, et. al, 2017, afirma em seus estudos que a espécie BRS 716 é a mais indicada para fins energéticos devido ao teor de lignina, porém, nesse estudo, ao serem realizadas as simulações, notou-se que há pouca diferença da potência gerada entre as espécies estudadas, deste modo, é necessário que novos estudos avaliem quais propriedades são mais influentes na geração de eletricidade.

De acordo com o EPE (2020), o consumo de energia médio nas residências brasileiras em 2019 foi de aproximadamente 0,162 MW/mês, em valores anuais, esse consumo é de aproximadamente 1,94 MW. Considerando que uma residência possui aproximadamente 5 pessoas, a quantidade de energia anual gerada pela espécie BD 5404, na configuração de operação da caldeira á 40 bar, representada na Tabela 15, pode atender aproximadamente 370 mil pessoas por ano, cidades como Volta Redonda – RJ (270 mil habitantes), Governador Valadares – MG (282 mil habitantes), Uberaba – MG (290 mil habitantes), Ribeirão das Neves – MG (340 mil habitantes)<sup>1</sup>.

**Tabela 15.** Montante anual de energia elétrica gerada.

Espécie	Trabalho gerado (MWh/ano)		
	40 bar	70 bar	140 bar
BD7607	139.955,74	162.206,60	179.590,03
BRS716	139.033,40	161.629,09	178.169,39
BD5404	140.747,09	163.022,82	180.384,74
BRS511	138.474,54	160.496,67	177.643,08
BD1615	136.741,38	157.839,19	174.677,30
BRS655	135.578,48	156.549,89	173.631,19

## 5.2. Validação da simulação

<sup>1</sup> Dados de população de acordo com o IBGE, 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>



Após a elaboração e execução do processo de conversão do sorgo em energia elétrica, foi realizada a validação da simulação, com a finalidade verificar se os modelos computacionais escolhidos apresentam um cenário próximo ao real.

A validação executada neste trabalho foi realizada de duas formas, por meio da verificação do PCS e por meio da verificação da potência teórica e experimental.

### 5.2.1. Determinação do poder calorífico.

Para determinar o PCS do combustível, a composição elementar do sorgo foi submetida à queima direta em um reator estequiométrico considerando uma conversão de 100%. O produto gerado na queima é direcionado ao um TC, conforme apresentado na Figura 9 da sessão 4.2.5 Verificação do poder calorífico, a energia liberada neste trocador de calor corresponde ao PCS do material queimado e foi comparado com dados da literatura.

Para a celulose a energia encontrada no TC foi de 17368716 W, então:

$$17368716 \frac{J}{s} = \frac{17368716 \frac{J}{s}}{1 kg/s} = 17368716 \frac{J}{kg} = 17368,7162 \frac{kJ}{kg} = 4151,22 \frac{kcal}{kg} \quad (29)$$

O valor encontrado para o poder calorífico superior da celulose foi de 4152,22 kcal/kg. Dias, 2011 em seu estudo, afirma que PCS encontrado para a celulose nas mesmas condições de temperatura (25°C) foi de 4131,825 kcal/kg. A Tabela 16 apresenta valores de PCS encontrados para a celulose, por diferentes autores, em diferentes condições.

**Tabela 16.** Valores de PCS para a celulose

Autor	Temperatura (°C)	PCS (kJ/kg)	Fonte/tipo da celulose
Dias, 2011	25	17299,12	cana-de-açúcar
Domalski et al. (1986)	28	17340,76	avicel
Domalski et al. (1986)	30	17426,00	algodão
Domalski et al. (1986)	30	17455,00	madeira

Para a hemicelulose, a energia liberada no trocador de calor foi de 17756805 W, deste modo, o valor encontrado para PCS foi de 17756,80 kJ/kg. Na literatura, Dias, 2011 apresenta

um valor de 17719 kJ/kg para o PCS da hemicelulose. Deste modo, assumiu-se que o calorímetro foi bem representado no simulador.

No caso da lignina, antes de calcular o poder calorífico, foi necessário calcular a entalpia de formação, por meio da Equação 21 da sessão 4.1.3 Inserção dos componentes da biomassa. O resultado encontrado foi de -2588700,92 cal/mol, e este, foi inserido banco de dados do simulador, juntamente com o valor de 194,01 g/mol referente a Massa Molecular (MM). A energia liberada no TC foi de 27095500 W; logo, o PCS da nova lignina foi de 27095 kJ/kg. Na literatura, Dias, 2011 afirma que o valor do PCS da lignina nas mesmas condições é de 26924,596 kJ/kg, deste modo, o resultado encontrado para a nova lignina é satisfatório, uma vez que os dados encontrados estão bem próximos aos dados da literatura.

#### 5.2.2. Determinação da potência teórica e experimental

Utilizando as temperaturas de entrada e saída da turbina, obteve-se as entalpias necessárias no SMITH, VAN NESS e ABBOTT, M. M (2004). As entalpias consultadas nas diferentes condições de pressão e temperatura, foram introduzidas na Equação 24 para o cálculo do Trabalho Experimental

Os resultados encontrados nas diferentes condições de temperatura e pressão são apresentados nas Tabela 17, 18 e 19.

**Tabela 17.** Determinação da potência teórica e experimental a 40 bar e 450°C.

Espécie	Vazão mássica (kg/h)	Entalpia entrada (kJ/kg)	Entalpia saída (kJ/kg)	$\Delta H$ (kJ/kg)	Trabalho Experimental (MW)	Trabalho Teórico (MW)	Teórico / Experimental
BD 7607	97942,20	3292,49	2675,50	-616,99	-16,79	-17,67	5%
BRS 716	96942,79	3312,54	2675,50	-637,04	-17,15	-17,56	2%
BD 5404	97942,20	3293,75	2675,50	-618,25	-16,82	-17,77	6%
BRS 511	96942,79	3276,21	2675,50	-600,71	-16,18	-17,48	8%
BD 1615	94943,97	3321,61	2675,50	-646,11	-17,04	-17,27	1%
BRS 655	94444,26	3303,63	2675,50	-628,13	-16,48	-17,12	4%

**Tabela 18.** Determinação da potência teórica e experimental a 70 bar e 530°C.

Espécie	Vazão Vapor 2 (kg/h)	Entalpia entrada (kJ/kg)	Entalpia saída (kJ/kg)	$\Delta H$ (kJ/kg)	Trabalho Experimental (MW)	Trabalho teórico (MW/h)	Teórico / Experimental
BD 7607	92231,23	3543,96	2675,50	-868,46	-22,54	-20,48	9%
BRS 716	91538,71	3581,07	2675,50	-905,57	-23,25	-20,41	12%
BD 5404	92304,23	3559,04	2675,50	-883,54	-22,93	-20,58	10%
BRS 511	91117,73	3533,91	2675,50	-858,41	-22,04	-20,26	8%
BD 1615	89626,13	3532,12	2675,50	-856,62	-21,64	-19,93	8%
BRS 655	89025,53	3518,22	2675,50	-842,72	-21,17	-19,77	7%

**Tabela 19.** Determinação da potência teórica e experimental a 140 bar e 540°C.

Espécie	Vazão mássica (kg/h)	Entalpia entrada (kJ/kg)	Entalpia saída (kJ/kg)	$\Delta H$ (kJ/kg)	Trabalho Experimental (MW)	Trabalho Teórico (MW)	Teórico / Experimental
BD 7607	88727,04	3459,24	2675,50	-783,74	-20,67	-22,68	10%
BRS 716	88141,36	3459,24	2675,50	-783,74	-20,56	-22,50	9%
BD 5404	88801,94	3459,24	2675,50	-783,74	-20,67	-22,78	10%
BRS 511	87657,63	3459,24	2675,50	-783,74	-20,45	-22,43	10%
BD 1615	86226,13	3459,24	2675,50	-783,74	-20,13	-22,06	10%
BRS 655	85609,62	3459,24	2675,50	-783,74	-19,96	-21,92	10%

Nota-se que a diferença máxima entre o trabalho teórico e o experimental não passou de 10%. Essa diferença se deu, sobretudo, aos dados utilizados na tabela de vapor d'água, pois a mesma não apresentava valor um absoluto para as diferentes configurações do sistema (40 bar, 70 bar, 140 bar e 450°C, 530°C, 540°C) sendo necessário – em alguns casos – fazer interpolação para encontrar valores próximos aos reais. Mesmo assim, os dados são satisfatórios, por não apresentar uma diferença significativa entre o trabalho experimental com o trabalho teórico.

### 5.3. Análise econômica

A finalidade desta seção é informar os dados referentes aos custos de produção que podem ser associados ao processo e avaliar economicamente o uso das diferentes espécies do sorgo como combustível para geração de energia elétrica. Os valores são expressos em Dólar americano (USD) e foi considerado uma cotação de R\$5,50 para a conversão desses valores. Esta análise econômica foi realizada em etapas e pode ser observada nas próximas sessões.

#### 5.3.1. Custo de equipamentos

Os valores referentes à compra do gerador completo (sistema de condensação, unidade hidráulica, painel de controle, acessórios, serviços de supervisão de instalação, comissionamento e partida para as três configurações de processo) foram cedidos por fornecedores. É importante salientar-se que, à medida que as configurações do processo modificam (pressão de operação), os custos relacionados a esses equipamentos aumentam. Isso se deve ao fato, do aumento da capacidade de geração de eletricidade. As Tabelas 20, 21 e 22 apresentam os custos referentes aos equipamentos.

**Tabela 20.** Custos de equipamentos sistema à 40 bar.

Produto	Valor
Gerador completo (sistema de condensação, unidade hidráulica, painel de controle, acessórios, serviços de supervisão de instalação, comissionamento e partida).	USD 3.181.818
Caldeira (110 Ton/h, 40bar, 450°C)	USD 4.545.455
Valor Total	USD 7.727.273

Fonte: Fornecedor.

**Tabela 21.** Custos de equipamentos sistema à 70 bar.

Produto	Valor
Gerador completo (sistema de condensação, unidade hidráulica, painel de controle, acessórios, serviços de supervisão de instalação, comissionamento e partida).	USD 3.272.727
Caldeira (110 Ton/h, 70bar, 530°C)	USD 6.363.636
Valor Total	USD 9.636.364

Fonte: Fornecedor.

**Tabela 22.** Custos de equipamentos sistema à 140 bar.

Produto	Valor
Gerador completo (sistema de condensação, unidade hidráulica, painel de controle, acessórios, serviços de supervisão de instalação, comissionamento e partida).	USD 3.345.455
Caldeira (110 Ton/h, 140bar, 540°C)	USD 8.545.455
Valor Total	USD 11.890.909

Fonte: Fornecedor.

### 5.3.2. Custo da matéria prima

A precificação para sorgo praticamente não existe pois o mercado é incipiente. De modo geral, a comercialização de bagaço, seja do sorgo ou até mesmo de cana, é fraco devido às usinas utilizarem no próprio sistema de cogeração e a venda ocorre na prática da energia elétrica. Então, como a aplicação é para fins de geração de energia elétrica, neste trabalho foi utilizado, como referencial, o preço do bagaço da cana-de-açúcar, que apresenta um valor aproximado de USD 4,50/ton. Para o custo do ar utilizou-se o valor proposto por PETERS, TIMMERHAUS e WEST, 2003. A Tabela 23, 24 e 25 apresenta os custos relacionados à essas matérias primas, para as diferentes configurações do processo.

**Tabela 23.** Custos anuais de matéria prima á 40 bar.

Material	Preço	Quantidade anual	Custo (milhões de USD/ano)
Água	0,530 (USD/m <sup>3</sup> )	0,078 (m <sup>3</sup> /ano)	4,11E-02
Ar	0,450 (USD/m <sup>3</sup> )	1,220 (m <sup>3</sup> /ano)	5,49E-01
Sorgo	0,045 (USD/kg)	0,174 (kg/ano)	6,00E-04

**Tabela 24.** Custos anuais de matéria prima á 70 bar.

Material	Preço	Quantidade anual	Custo (milhões de USD/ano)
Água	0,530 (USD/m <sup>3</sup> )	0,074 (m <sup>3</sup> /ano)	3,92E-02
Ar	0,450 (USD/m <sup>3</sup> )	1,220 (m <sup>3</sup> /ano)	5,49E-01
Sorgo	0,045 (USD/kg)	0,174 (kg/ano)	6,00E-04

**Tabela 25.** Custos anuais de matéria prima á 140 bar

Material	Preço	Quantidade anual	Custo (milhões de USD/ano)
Água	0,530 (USD/m <sup>3</sup> )	0,075 (m <sup>3</sup> /ano)	3,98E-02
Ar	0,450 (USD/m <sup>3</sup> )	1,220 (m <sup>3</sup> /ano)	5,49E-01
Sorgo	0,045 (USD/kg)	0,174 (kg/ano)	6,00E-04

### 5.3.3. Capital fixo investido e capital de giro

Para a instalação dos equipamentos a e operação da planta é necessário o investimento de recursos financeiros, e esses são chamados capital fixo investido (FCI) e capital de giro, respectivamente. O somatório desses dois capitais é denominado de investimento de capital total (TCI). Dentro do FCI há é subdividido em procedimentos que envolve custos diretos e indiretos (PETERS, TIMMERHAUS e WEST, 2003). Esses valores são expressos nas Tabelas 26 e 27.



**Tabela 26.** Capital de investimentos para as diferentes pressões de operação.

Serviços	40 bar	70 bar	140 bar
Custos diretos (milhões USD)			
Compra dos equipamentos	7,70	9,60	11,89
Entrega/Frete	0,77	0,96	1,19
Instalação dos equipamentos	3,30	4,12	5,10
Instrumentação e controle	2,20	2,75	3,40
Tubulação	2,63	3,27	4,05
Elétrica	0,85	1,06	1,31
Construção civil	2,46	3,06	3,79
Terreno e Jardinagem	1,02	1,27	1,57
Instalações dos serviços	4,66	5,81	7,19
<b>Total Custos diretos</b>	<b>25,58</b>	<b>31,89</b>	<b>39,50</b>
Custos indiretos (milhões USD)			
Engenharia e supervisão	2,71	3,38	4,19
Despesas de construção	2,88	3,59	4,45
Pagamentos com empreiteiras	0,34	0,42	0,52
Taxa contrato	1,61	2,01	2,49
Contingências	3,13	3,91	4,84
<b>Total Custos indiretos</b>	<b>10,67</b>	<b>13,31</b>	<b>16,48</b>

A Tabela 27, apresenta os valores investimento de capital fixo e capital de giro, para as diferentes configurações de operações da planta. Esses dados tem como base os custos diretos e indiretos e custos relacionados a compra e entrega dos equipamentos. Nota-se que quanto maior o custo dos equipamentos, maior é o investimento e o capital de giro (WC) e o investimento de capital total (TCI).

**Tabela 27.** Valores totais dos investimentos.

Despesas (milhões USD)	40 bar	70 bar	140 bar
Capital Fixo Investido (FCI)	36,25	45,20	55,98
Capital de Giro (WC)	6,35	7,92	9,81
<b>Investimento de Capital Total (TCI)</b>	<b>42,60</b>	<b>53,12</b>	<b>65,79</b>

#### 5.3.4. Custo anual do produto

Nesta sessão é demonstrada como foi calculado o custo total/anual do produto (CTP). A Tabela 28, apresenta as informações que foram utilizadas para esses cálculos. Esses cálculos foram realizados, baseando-se em dados dos custos de equipamentos, custos da matéria prima e o capital fixo e capital investido, calculados nas sessões anteriores.

As despesas relacionadas diretamente com a operação e fabricação da planta é chamada de manufatura. Essas despesas foram calculadas e divididas em 3 classificações: custos diretos (CD), que são os custos relacionados diretamente com a manutenção e operação da planta, os encargos fixos (CF), que são as despesas que permanecem fixas boa parte do ano e não variam muito de acordo com as taxas de produção, e despesas da planta (DP), que incluem serviços como férias, previdência social, instalações para recreação, serviços médicos e etc. Os dados representados na Tabela 28 para cálculo do CTP, são referentes a variedade da espécie BD 5404 por essa ser o de maior potencial energético, e a pressão de operação na caldeira igual a 40 bar.

**Tabela 28.** Dados necessários para cálculo do CTP

<b>Custos Diretos (CD)</b>			
Matéria Prima	N/A	N/A	0,59
Mão de Obra	N/A	N/A	0,88
Supervisão	0,15	0,88	0,13
Utilidades	N/A	N/A	0
Manutenção e reparos	0,06	1,49	0,09
Suprimentos	0,15	0,09	0,01
Laboratórios	0,15	0,88	0,13
Royalties	0,01	3,08	0,03
Catalisadores e Solventes	0	N/A	0
Total (CD)			1,87
<b>Encargos Fixos (CF)</b>			
Taxas	0,02	1,49	0,03
Financiamento	0	1,49	0
Seguro	0,01	1,49	0,01
Aluguel	0	1,49	0
Depreciação	Foi calculado separadamente		
Total (CF)			0,04
Despesas da Planta (DP)	0,6	1,11	0,66
Custo de Manufatura (CD+CF+DP)			2,58
<b>Despesas Gerais (DG)</b>			
Administração	0,2	1,11	0,22
Distribuição e vendas	0,05	3,08	0,15

		<i>Continuação...</i>	
Pesquisa e desenvolvimento	0,04	3,08	0,12
Total (DG)			0,5
<b>Custo total sem depreciação (Manufatura + DG)</b>			<b>3,08</b>

### 5.3.5. Viabilidade econômica do processo

Nesta sessão é representado a estrutura do fluxo de caixa utilizada para avaliar economicamente o processo.

Para realizar a representação da viabilidade econômica do processo, foi considerado 10 anos para a vida útil da planta, onde os anos -3,-2,-1 foram reservados para investimento, onde ocorre a fabricação e preparação para a operação da mesma. No ano 0 foi considerado o início das atividades, onde já foi considerada a depreciação dos equipamentos.

Essa estrutura é demonstrada na Tabela 29, onde os valores exibidos são para a espécie que apresentou o melhor potencial energético, BD 5404, utilizando a configuração de operação na caldeira à 40 bar.

**Tabela 29.** Fluxo de caixa da espécie BD 5407

Itens / Tempo (ano)	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total
1. Terra, USD10 <sup>6</sup>		0	0	0										0	0
2. Investimento de capital fixo, USD10 <sup>6</sup>		-5,44	-12,94	-18,86											-37,24
3. Capital de giro, USD10 <sup>6</sup>				-6,53										6,53	0,00
4. Valor do salvamento, USD10 <sup>6</sup>														0	0
5. Investimento de capital total, USD10 <sup>6</sup>		-5,44	-12,94	-25,38											-43,76
6. Investimento anual, USD10 <sup>6</sup>					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7. Custo de início, USD10 <sup>6</sup>					-3,72										
8. Taxa de operação					0,50	0,90	1	1	1	1	1	1	1	1	
9. Vendas anuais, USD10 <sup>6</sup>					9,30	16,73	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	174,75
10. Custo total anual do produto (s/ depreciação), USD10 <sup>6</sup>					-2,28	-3,13	-3,40	-3,47	-3,54	-3,61	-3,68	-3,76	-3,83	-3,91	-34,61
11. Fator de depreciação, 1/ano					0,20	0,32	0,19	0,12	0,12	0,06					
12. Desvalorização anual, USD10 <sup>6</sup> /ano					7,45	11,92	7,15	4,29	4,29	2,14					37,24
13. Lucro bruto anual, USD10 <sup>6</sup>					-4,15	1,68	8,04	10,83	10,76	12,83	14,91	14,83	14,76	14,68	99,17
14. Lucro líquido anual, USD10 <sup>6</sup>					-4,15	1,21	5,79	7,80	7,75	9,24	10,73	10,68	10,63	10,57	70,24
15. Fluxo de caixa operacional anual, USD10 <sup>6</sup>					3,30	13,13	12,94	12,09	12,04	11,39	10,73	10,68	10,63	10,57	107,48
16. Total do fluxo de caixa anual, USD10 <sup>6</sup>	0	-5,44	-12,94	-25,38	3,30	13,13	12,94	12,09	12,04	11,39	10,73	10,68	10,63	10,57	63,71
17. Posição de caixa acumulada, USD10 <sup>6</sup>	0	-5,44	-18,38	-43,76	-40,47	-27,34	-14,40	-2,32	9,72	21,11	31,84	42,52	53,14	63,71	

Após do fluxo do caixa, representado na tabela 28, foi possível determinar os preços de venda, para comercialização energia gerada é apresentado nas Tabelas 30, 31 e 32. Para essa determinação foi considerado as medidas de rentabilidade mencionado na sessão 4.3.1. Estudo da viabilidade econômica do processo. Uma taxa de imposto de renda de 28% foi considerada. Esses cálculos foram reproduzidos para todas as espécies do sorgo em todas as configurações de operação da caldeira.

**Tabela 30.** Valor de venda da energia elétrica no processo à 40 bar.

Espécie	Trabalho gerado (kWh/ano)	Preço (USD/kW)
BD 7607 -	139.955.743,22	0,13
BRS 716 -	139.033.404,58	0,13
BD 5404 -	140.747.092,99	0,13
BRS 511 -	138.474.537,70	0,13
BD 1615 -	136.741.377,17	0,13
BRS 655 -	135.578.479,61	0,13

**Tabela 31.** Valor de venda da energia elétrica no processo à 70 bar.

Espécie	Trabalho gerado (kWh/ano)	Preço (USD/kW)
BD 7607 -	162.206.595,144	0,14
BRS 716 -	161.629.087,752	0,14
BD 5404 -	163.022.821,632	0,14
BRS 511 -	160.496.671,104	0,14
BD 1615 -	157.839.189,552	0,14
BRS 655 -	156.549.889,584	0,14

**Tabela 32.** Valor de venda da energia elétrica no processo à 140 bar.

Espécie	Trabalho gerado (kWh/ano)	Preço (USD/kW)
BD 7607 -	179.590.027,320	0,15
BRS 716 -	178.169.389,992	0,15
BD 5404 -	180.384.739,920	0,15
BRS 511 -	177.643.083,816	0,15
BD 1615 -	174.677.302,800	0,15
BRS 655 -	173.631.194,352	0,15

De acordo com o ranking das tarifas divulgado pela Aneel em 2020, a tarifa convencional (não considera as bandeiras verde, amarela ou vermelha nem impostos) da concessionária light, que atende as cidades do estado do Rio de Janeiro, foi de R\$ 0,663, em dólar USD (considerando 1 USD = 5,50 R\$), essa tarifa seria aproximadamente 0,12 USD, apresentando valor próximo ao preço de venda encontrado na configuração do processo à 40bar (ANEEL, 2020).

## 6. CONCLUSÃO

O processo de geração de energia elétrica a partir do sorgo estudado no Aspen Plus®, com dados de composição obtidos na literatura, apresentou resultados onde foi possível comprovar o programa é uma boa ferramenta de análise para casos de produção de energia elétrica utilizando a queima de biomassa como fonte de energia.

Ao efetuar a verificação dos valores de PCS do material que compõe a biomassa, concluiu-se que o calorímetro é bem representado no simulador, com os resultados sendo corroborados com dados da literatura. Ao verificar a relação entre potência teórica e experimental, notou-se que os resultados foram próximos, validando a simulação.

O presente estudo confirmou a potencialidade do uso do sorgo para geração de energia, utilizando a rota termoquímica. Ao realizar a simulação da queima do sorgo em caldeira para geração de vapor, verificou-se que dentro das espécies estudadas, a espécie BD 5404 apresentou a maior quantidade de potência gerada na configuração de 40bar, porém, a diferença entre as demais espécies avaliadas, não são significativas, onde é sugerido para trabalhos futuros que diferentes cenários, como ciclo Rankine regenerativo, sejam avaliados. Deste modo, é necessário que novos estudos avaliem quais propriedades são mais influentes na geração de eletricidade

Após realizar a análise econômica, concluiu-se que, a caldeira operando a 40 bar, apresentou a melhor viabilidade econômica. O preço para venda do produto final após pagar o investimento é de aproximadamente USD 0,13 por kWh, o que demonstra ser competitivo no mercado de energia, quando comparados à tarifa convencional no estado do Rio de Janeiro.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA – 2018a, World Energy Outlook 2018, IEA, Paris. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>. Acesso em: 21/02/2020

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA – AIE, 2018b, Renewables 2018, AIE, Paris. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2018>. Acesso em: 21/02/2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. (ANEEL) 2017. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa\(2\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf) Acesso em: 21/02/2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. (ANEEL) 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>. Acesso em: 21/02/2021.

AMARAL, R. A., Simulação e estimativas de custos da geração de energia elétrica a partir de genótipos do capim elefante. Dissertação (Mestrado) UFV, Viçosa, 2018.

Angewandte Chemie International Edition. Engl. 55, 8164–8215 (2016).

ASPENTECH. Aspen Plus, v.9. (2017).

CALVO-SERRANO, R., GUO, M., POZO, C., et. al, Biomass Conversion into Fuels, Chemicals, or Electricity? A Network-Based Life Cycle Optimization Approach Applied to the European Union. ACS Sustainable Chemistry & Engineering. 7, 12, 10570–10582 (2019).

CORMOS, C.-C. Hydrogen and Power Co-Generation Based on Coal and Biomass/Solid Wastes Co-Gasification with Carbon Capture and Storage. International Journal of Hydrogen Energy 37, 5637–5648 (2012).

CORTEZ, L. A. B., LORA, E. E. S. e GÓMEZ, E. I., Biomassa para energia. Editora UNICAMP. São Paulo (2008).



DIAS, M. O. S., Desenvolvimento e otimização de processos de produção de etanol de primeira e segunda geração e eletricidade a partir da cana-de-açúcar. Tese (doutorado) UNICAMP, São Paulo, 2011.

DOMALSKI, E.S.; JOBE, TL.; MILNE, T.A. Thermodynamic data for biomass conversion and waste incineration. Golden, CO, (1986).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DE MILHO E SORGO. Cultivo do Sorgo Biomassa para a Cogeração de Energia Elétrica. Boletim técnico EMBRAPA Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 2013b.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DE MILHO E SORGO. Sorgo Biomassa para a Cogeração de Energia. Circular Técnica Embrapa Milho e Sorgo. Sete Lagoas, MG, 2015a.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DE MILHO E SORGO. Sorgo biomassa: cultura promissora para geração de energia. Embrapa, 2013a.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DE MILHO E SORGO. Sorgo: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Embrapa. 1ª ed. Brasília, DF, 2015b.

Empresa de pesquisa energética EPE, 2018a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em 11/11/2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA EPE, 2018b, Balanço Energético Nacional: Ano base 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA EPE, 2019, Balanço Energético Nacional: Ano base 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA EPE, 2020, Resenha Mensal do Mercado de Energia Ano XIII, Número 148, janeiro de 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites->

pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-153/topico-510/Resenha%20Mensal%20-%20Janeiro%202020\_v4.pdf. Acesso em 25/01/2020.

GOLDEMBERG, J., Ethanol for a Sustainable Energy Future. *Science* Vol. 315, Issue 5813, pp. 808-810 (2007).

GRISCOM B.W., ADAMS, J., ELLIS, P.W., et al. Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences. (PNAS) USA*. 2017; 114: 11645-11650 (2017).

HAMELINCK, C. N., HOOIJDONK, G. V., FAAIJ, A. P.C., Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term. *Biomass and Bioenergy* 28, 384–410 (2005).

HAO, B.; XUE, Q.; BEAN, B. W.; ROONEY, W. L.; BECKER, J. D., Biomass Production, Water and Nitrogen Use Efficiency in Photoperiod-Sensitive Sorghum in the Texas High Plains. *Biomass Bioenergy* 62, 108–116 (2014).

HARPER, A.B., POWELL, T., COX, P.M. et al. Land-use emissions play a critical role in land-based mitigation for Paris climate targets. *Nature Communications* 9, 2938 (2018).

HARRISON, R. M. e HESTER, R. E., Sustainability and Environmental Impact of Renewable Energy Sources. *Issues in Environmental Science and Technology*, Editora RSC. N 19 (2003).

HIMMEL, M. E., DING, S. Y., JOHNSON, D. K., ADNEY, W. S., NIMLOS, M. R. e BRADY, J. W.; Biomass Recalcitrance: Engineering Plants and Enzymes for Biofuels Production. *Science*, Vol. 315, No. 5813, pp. 804-807 (2007)

KHESHGI, H. S., PRINCE, R. C, e MARLAND, G., The Potential of Biomass Fuels in the Context of Global Climate Change: Focus on Transportation Fuels. *Annual Review of Environment and Resources* p. 200 (1999).

KORETSKY, M.D., Engineering and Chemical Thermodynamics. 2nd Ed. Editora: John Wiley & Sons. (2013).

LYND, L.R., WYMAN, C.E., GERNGROSS, T.U., Biocommodity engineering. Biotechnology Progress. 15, p777–793 New Hampshire USA (1999).

MARABEZI, K. Estudo sistemático das reações envolvidas na determinação dos teores de lignina e holocelulose em amostras de bagaço e palha de cana-de-açúcar. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Química. Universidade de São Paulo, São Carlos (2008).

MCKENDRY, P., Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. BioResource Technology p.37–46. Reino Unido (2002).

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, MME, 2019. Disponível em: [http://www.mme.gov.br/web/guest/todas-as-noticias/-/asset\\_publisher/pdAS9IcdBICN/content/fontes-renovaveis-sobem-2-3-pontos-percentuais-na-matriz-energetica-brasileira-de-2018/pop\\_up?\\_101\\_INSTANCE\\_pdAS9IcdBICN\\_viewMode=print&\\_101\\_INSTANCE\\_pdAS9IcdBICN\\_languageId=pt\\_BR](http://www.mme.gov.br/web/guest/todas-as-noticias/-/asset_publisher/pdAS9IcdBICN/content/fontes-renovaveis-sobem-2-3-pontos-percentuais-na-matriz-energetica-brasileira-de-2018/pop_up?_101_INSTANCE_pdAS9IcdBICN_viewMode=print&_101_INSTANCE_pdAS9IcdBICN_languageId=pt_BR). Acesso em 11/11/2020.

NOGUEIRA, L. A. H. e LORA, E.S., Dendroenergia: fundamentos e aplicações. 2. ed. Rio de Janeiro. Interciência, Vol. 1. p 199 (2003).

PANNACCI, E.; BARTOLINI, S., Evaluation of Sorghum Hybrids for Biomass Production in Central Italy. Biomass Bioenergy 88, 135–141 (2016).

PARRELLA, R. A. C., RODRIGUES, J. A. S., TARDIN, F. D., DAMASCENO, C. M. B., SCHAFFERT, R. E. Desenvolvimento de híbridos de sorgo sensíveis ao fotoperíodo visando alta produtividade de biomassa. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (2010).

PETERS M. S., TIMMERHAUS K.D., WEST R. E., Plant Design and Economics for Chemical Engineers. 5 ed. McGraw-Hill Education. Colorado. (2002).

PIMENTEL, L. D.; BATISTA, V. A. P.; BARROS, A. F.; TEOFILLO, R. F.; DIAS, L. A. S. Chemical and bioenergetic characterization of sorghum agronomic groups1. *Pesquisa Agropecuaria Tropical* (Online), v. 47, p. 424-431 (2017).

RENDEIRO, G., NOGUEIRA, M. F. M., BRASIL, A.C.M., CRUZ, D.O.A., GUERRA, D.R.S., MACÊDO, E.N., ICHIHARA, J.A., *Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida Soluções Energéticas para a Amazônia*. Ministério de Minas e Energia 1ªed p 52-63 Brasília (2008).

RESENDE, Á.V., MAY, A., SILVA, D.D., SANTOS, F.C., COTA, L.V., OLIVEIRA, P.A., MENDES, S.M., PARELLA, R.A.C., COSTA, R.V., MIRANDA, R.A., *Cultivo do Sorgo Biomassa para a Cogeração de Energia Elétrica*. Embrapa Milho e Sorgo. Sete Lagoas, MG (2013).

RINALDI, R., JASTRZEBSHI, R., CLOUGH, M.T., RALPH, J., KENNEMA, M., BRUIJNINCX, P.C.A., WECKHUYSEN, B.M., *Paving the way for lignin valorisation: Recent advances in bioengineering, biorefining and catalysis*. *Angewandte Chemie International Edition*, 55, 8164–82 (2016).

ROCHA, E.P.A., GOMES, F.J.B., SERMYAGINA, E., et. al, *Analysis of Brazilian Biomass Focusing on Thermochemical Conversion for Energy Production*. *ACS Energy Fuels*, 29, 12, 7975–7984 (2015).

RÖDER M. e THORNLEY P., *Bioenergy as climate change mitigation option within a 2°C target – uncertainties and temporal challenges of bioenergy systems*. *Energy Sustain Society* (2016).

ROONEY, W. L.; BLUMENTHAL, J.; BEAN, B.; MULLET, J. E., *Designing Sorghum as a Dedicated Bioenergy Feedstock*. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 1, 147–157, (2007).

ROSILLO-CALLE, F., GROOT, P., HEMSTOCK, S. L. e WOODS, J., Bioenergy for a Sustainable Environment. The Biomass Assessment Handbook. Editora Earthscan UK e USA, (2007).

SANDLER, S.I. Chemical and Engineering Thermodynamics. New York: John Wiley and Sons, Inc., (1989).

SEEG Brasil - Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Disponível em: [http://plataforma.seeg.eco.br/total\\_emission](http://plataforma.seeg.eco.br/total_emission). Acesso em 12/11/2019

SMITH, J. M., VAN NESS, H. C., ABBOTT, M. M., Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics – 7th ed. Editora: McGraw-Hill Education (2004).

STANMORE, B.R. Generation of energy from sugarcane bagasse by thermal treatment. Waste Biomass Valor, v. 1, p. 77 89 (2010).

STOLARSKI, M. J., WARMIŃSKI, K., KRZYŻANIAK, M., et al. Bioenergy technologies and biomass potential vary in Northern European countries. Renewable and Sustainable Energy Reviews 133, 110238, (2020).

TANG, Y. AND YOU, F. Multicriteria Environmental and Economic Analysis of Municipal Solid Waste Incineration Power Plant with Carbon Capture and Separation from the Life-Cycle Perspective. ACS Sustainable Chemistry & Engineering 16, 3, (2018).

TOLMASQUIM, M. T., Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear. EPE. Rio de Janeiro (2016).

URNS, S.R. An Introduction to Combustion – Concepts and Applications. New York: McGraw Hill (2000).

WOOLEY, R. J., PUTSCHE, V., Development of an ASPEN PLUS Physical Property Database for Biofuels Components. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado 80401-3393, April (1996).

ZEGADA-LIZARAZU, W.; MONTI, A. Are We Ready to Cultivate Sweet Sorghum as a Bioenergy Feedstock? A Review on Field Management Practices. *Biomass Bioenergy*, 40, 1–12 (2012).