UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VICTÓRIA OLIVEIRA DIAZ DE LIMA

APROVEITAMENTO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA CAMA DE AVIÁRIO POR PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO

PALOTINA

2021

VICTÓRIA OLIVEIRA DIAZ DE LIMA

APROVEITAMENTO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA CAMA DE AVIÁRIO POR PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia de Energia, Setor Palotina, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia

Orientadora: Prof.ª Dra. Adriana Ferla de Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Lucas Konrad Burin

PALOTINA

2021

TERMO DE APROVAÇÃO

VICTÓRIA OLIVEIRA DIAZ DE LIMA

APROVEITAMENTO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA CAMA DE AVIÁRIO POR PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia de Energia, Setor Palotina, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenheira de Energia.

_____

Prof.ª Dr.ª Adriana Ferla de Oliveira
Orientadora – Departamento de Engenharia e Exatas, UFPR

_____

Prof. Dr. Joel Gustavo Teleken
Departamento de Engenharia e Exatas, UFPR

_____

Prof. Dr. Maurício Romani
Departamento de Engenharia e Exatas, UFPR

Palotina, 30 de novembro de 2021.

Dedico esse estudo a minha mãe, Vanessa, e a minha Vó, Neusa (*in memorian*), por sempre estarem ao meu lado me incentivado, apoiando e compreendendo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, primeiramente, pelo dom da vida, por todas as bênçãos concedidas, por sempre ter iluminado meu caminho e que assim continue sendo.

Agradeço à Universidade Federal do Paraná - Setor Palotina e a todos os meus professores pela oportunidade de um ensino de qualidade ao longo de toda a graduação.

Agradeço pela infraestrutura e disponibilidade de uso do Laboratório de Química Orgânica e aos membros técnicos envolvidos no mesmo que possibilitaram o desenvolvimento do estudo. Além disso, agradeço a técnica de laboratório Sandra Forneck e ao Prof. Dr. Américo Fróes Garcez Neto pelas análises de poder calorífico realizadas.

A minha orientadora Prof.° Dr.ª Adriana Ferla de Oliveira e ao meu coorientador Prof. Dr. Eduardo Lucas Konrad Burin, meus mais sinceros agradecimentos por toda orientação, dedicação e apontamentos para com o trabalho.

Um agradecimento ao Prof. Dr. Joel Gustavo Teleken, responsável pela disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, pelo acompanhamento e sugestões para a pesquisa.

Agradeço a banca, Prof. Dr. Joel Gustavo Teleken e Prof. Dr. Maurício Romani por todos os apontamentos e considerações realizados, os quais ajudaram a enriquecer o trabalho.

Agradeço a Andressa, ao André, ao Felipe e a Maria por todo suporte e conhecimentos passados.

Agradeço também aos meus amigos Aline, Fernanda, Júlia, Natália, Nathan e Thiago que permaneceram ao meu lado sempre me apoiando e incentivando. Um agradecimento em especial a Débora e dona Rosinei por todo apoio, suporte e família que me proporcionaram ao longo desses anos.

Agradeço à toda minha família pelo apoio e respaldo.

Minha eterna gratidão a minha vó, Neusa, a minha mãe, Vanessa, e ao meu irmão, Julio Cesar, por todo suporte, incentivo, amor, confiança e, acima de tudo, pela compreensão. Eu amo vocês.

Agradeço ao Matheus por todo apoio, companheirismo, auxílio, compreensão e amor durante esse período.

Por fim, agradeço a todos que estiveram comigo nesse período.

But there's a hope that's waiting for you in the dark. You should know you're beautiful just the way you are. And you don't have to change a thing, the world could change its heart. No scars to your beautiful, we're stars and we're beautiful.

(Alessia Cara).

RESUMO

O ramo avícola é caracterizado por uma elevada geração de resíduos, com considerável potencial energético, e por possuir alto consumo de energia. A expansão da atividade avícola impulsionada pelo aumento do consumo da carne de frango levou a ampliação do número de instalações para atender a elevada demanda pelo produto. Nesse sentido, houve uma maior geração de resíduos vinculados com o setor e, nesse sentido, destaca-se a cama de aviário por se apresentar em grande volume. Devido as principais aplicações para esse resíduo estarem associadas com problemas de restrições sanitárias, propagação de doenças, redução da produtividade agrícola, entre outros, surgiu a preocupação pela busca por práticas de manejos e destinações alternativas. Desse modo, tem-se a gaseificação como uma possibilidade de destinação, a qual se torna interessante por, através de elevadas temperaturas, converter a biomassa em um gás combustível (*syngas)*. O *syngas* gerado pelo processo é constituído, majoritariamente, por H_2, CO e CO_2 e pode ser utilizado para geração de eletricidade, para a obtenção de produtos químicos, para a produção de biocombustíveis e em células a combustível. Diante desses fatores, o presente estudo teve como objetivo principal conhecer e avaliar as características físico-químicas de camas de aviário do processo de produção de ovos (CAO) e do processo de recria (CAR) em matrizeiros localizados na cidade de Palotina e, além disso, avaliar o potencial energético da CAO para aplicação em processo de gaseificação em substituição ao GLP, gás atualmente utilizado para a atendimento da demanda térmica dos matrizeiros de recria, devido a mesma se encontrar em maior disponibilidade nas unidades. O conhecimento das características físico-químicas do resíduo se deu pelo desenvolvimento de pesquisas bibliográficas, de análises imediata e de poder calorífico, seguindo as normas ASTM E871-82, ASTM E872-82, ASTM D1102-84, ASTM E870-82 e ASTM D5865 nos Laboratórios de Química Orgânica e Nutrição. Para verificação do potencial de geração de *syngas* da CAO adotou-se uma modelagem matemática de equilíbrio químico implementada no software *Engineering Equation Solver*, a qual reproduziu o processo de gaseificação. Os resultados para os teores de voláteis, cinzas e carbono fixo foram 62,69 %, 28,09 % e 9,36 % para a CAO e de 60,72 %, 27,09 % e 12,19 % para a CAR, enquanto, que o poder calorífico superior foi de 10,9 $MJ.kg^{-1}$ e 13,22 $MJ.kg^{-1}$, respectivamente. Por meio da simulação foi estimada a composição do *syngas* de 20,22 %, 15,17 %, 13,95 % e 49,95 % para H_2, CO, CO_2 e N_2, a qual se apresentou dentro do indicado em literatura para gaseificação de biomassas lignocelulósicas e mostrou-se semelhante a dados experimentais para o mesmo tipo de resíduo. Os valores de poder calorífico superior e inferior e eficiência a frio do *syngas* obtidos foram de 4,7 $MJ.Nm^{-3}$, 4,3 $MJ.Nm^{-3}$, 79% sendo tais valores próximos ou superiores a dados para gás de síntese gerado por meio de biomassas frequentemente utilizadas para geração de energia. Além disso, o *syngas* obtido supriria integralmente a demanda térmica da unidade e sua energia excedente poderia ser destinada a outra demanda dos matrizeiros.

Palavras-chave: Processo termoquímico. Gás de síntese. Cama de Aviário. Alternativa Energética. Modelagem de Equilíbrio Químico da Gaseificação.

ABSTRACT

The poultry industry characterized by high waste generation, with considerable energy potential, and high-energy consumption. The expansion of the poultry activity boosted by the increased consumption of chicken meat has led to an increase in the number of facilities to meet the high demand for the product. In this sense, there has been a greater generation of waste linked to the sector and, in this sense, poultry litter stands out because it presents a large volume. Because the main applications for this waste are associated with problems of sanitary restrictions, spread of diseases, reduction of agricultural productivity, among others, the concern for the search for management practices and alternative destinations has arisen. Thus, there is gasification as a possible destination, which is interesting because, through high temperatures, it converts biomass into a fuel gas (syngas). The syngas generated by the process consists mostly of H_2, CO and CO_2 and can be used to generate electricity, to obtain chemicals, to produce biofuels and in fuel cells. Given these factors, this study aimed to know and evaluate the physical-chemical characteristics of poultry litter from the egg production process (CAO) and the rearing process (CAR) in hatcheries located in the city of Palotina. In addition, to evaluate the energy potential of CAO for application in gasification process to replace LPG, currently used to meet the thermal demand of rearing houses, due to its greater availability in the units. The knowledge of the physical-chemical characteristics of the residue was obtained through bibliographic research, immediate analysis and calorific value analysis, according to ASTM E871-82, ASTM E872-82, ASTM D1102-84, ASTM E870-82 and ASTM D5865 standards in the Organic Chemistry and Nutrition Laboratories. To verify the syngas generation potential of the CAO a chemical equilibrium mathematical modeling implemented in Engineering Equation Solver software was adopted, which reproduced the gasification process. The results for volatiles, ash and fixed carbon contents were 62.69 %, 28.09 % and 9.36 % for the OWC and 60.72 %, 27.09 % and 12.19 % for the MBR, while the high heating value was 10.9 $MJ.kg^{-1}$ and 13.22 $MJ.kg^{-1}$, respectively. Through simulation the syngas composition was estimated to be 18.55 %, 13.92 %, 12.8 % and 45.83 % for H2, CO, CO^2 and N2, which was within the range indicated in the literature for gasification of lignocellulosic biomass and was similar to experimental data for the same type of waste. The higher and lower calorific values and cold efficiency of syngas obtained were 4.7 $MJ.Nm^{-3}$, 4.3 $MJ.Nm^{-3}$, 79% being such values close or superior to data for syngas generated from biomasses frequently used for energy generation. In addition, the syngas obtained would fully supply the thermal demand of the unit and its excessive energy could be destined to another demand of the matrices.

Keywords: Thermochemical Process. Synthesis Gas. Poultry Litter. Energy Alternative. Gasification Chemical Equilibrium Modeling.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1– COLOCAÇÃO DO BRASIL NO MERCADO MUNDIAL DE CARNE DE FRANGO EM MIL TONELADAS.....19
FIGURA 2 – CAMA DE AVIÁRIO.....20
FIGURA 3 - ROTAS DE DESTINAÇÃO DA BIOMASSA 25
FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE REATOR DE GASEFICAÇÃO GENÉRICO.....28
FIGURA 5 – CLASSIFICAÇÃO DOS REATORES.....29
FIGURA 6 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM REATOR CONCORRENTE...30
FIGURA 7 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DO REATOR CONTRACORRENTE..31
FIGURA 8 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DO REATOR DE FLUXO CRUZADO 31
FIGURA 9 – ILUSTRAÇÕES ESQUEMÁTICAS DOS REATORES DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE E CIRCULANTE.....33
FIGURA 10 – POSSIBILIDADES DE APLICAÇÕES DO SYNGAS 34
FIGURA 11 – CAMA DE AVIÁRIO COLETADA.....37
FIGURA 12 – FLUXOGRAMA ESQUEMÁTICO DO PASSO-A-PASSO DA ROTINA DE PROGRAMAÇÃO DA SIMULAÇÃO 39
FIGURA 13 – COMPORTAMENTO DO *SYNGAS* EM FUNÇÃO DA RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA OBTIDO POR FUZIKI (2017) PARA CASCA DE ARROZ 48

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – COMPOSIÇÃO DO *SYNGAS* EM RELAÇÃO A RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA.....47
GRÁFICO 2 – INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO DE TEMPERATURA SOBRE O *SYNGAS* ESTIMADO 48

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – VALORES DE ANÁLISE IMEDIATA DE CAMAS DE AVIÁRIO ENCONTRADOS NA LITERATURA 22
TABELA 2 – VALORES MÉDIOS DE ANÁLISE ELEMENTAR DE CAMAS DE AVIÁRIO EM BASE SECA ENCONTRADOS NA LITERATURA 23
TABELA 3 – VALORES DE PODER CALORÍFICO DE CAMAS DE AVIÁRIO ENCONTRADOS NA LITERATURA 24
TABELA 4 – PARÂMETROS E METODOLOGIAS DE ANÁLISE 38
TABELA 5 – COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DA CAMA DE AVIÁRIO EM LITERATURA LIVRE DE CINZAS 38
TABELA 6 – PARÂMETROS DE ENTRADA NA SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO DO PRESENTE ESTUDO. 40
TABELA 7 – INFORMAÇÕES PARA O ESTUDO DE CASO DO MATRIZERIO DE AVES 41
TABELA 8 – TEOR DE UMIDADE DAS CAMAS DE AVIÁRIO ESTUDADAS 42
TABELA 9 – ANÁLISE IMEDIATA EM BASE SECA DAS CAMAS DE AVIÁRIO COMPARADAS COM A LITERATURA 42
TABELA 10 – PODER CALORÍFICO DAS CAMAS AVALIADAS EM BASE SECA COMPARADOS COM A LITERATURA 44
TABELA 11 – PREDIÇÃO DA COMPOSIÇÃO DO SYNGAS EM BASE SECA 45
TABELA 12 – PREDIÇÃO DOS VALORES PARA PODER CALORÍFICO SUPEIOR E INFERIOR E EFICIÊNCIA DO *SYNGAS* JUNTO A DADOS DA LITERATURA 46
TABELA 13 – PARÂMETROS DE ENTRADA NA SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO PARA RESÍDUOS DE CICUTA E CAMA DE AVIÁRIO 62
TABELA 14 – COMPARATIVO ENTRE A SIMULAÇÃO REPLICADA UTILIZANDO PARÃMETROS DE ENTRADA REPORTADOS PELOS AUTORES Li *et al.,* (2004) E Denim *et al.* (2020) E SEUS RESULTADOS 62

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

C - Carbono

CAO - Cama de aviário obtida a partir do processo de produção de ovos

CAR - Cama de aviário obtida a partir do processo de recria

CO - Monóxido de Carbono

CO_2 - Dióxido de Carbono

CH_4 - Metano

E_f - Eficiência a frio do gás

EES - *Engineering Equation Solver*

fv - Fração volumétrica dos componentes gasosos do *syngas*

H - Hidrogênio

H_2 - Gás Hidrogênio

H_2O - Água

N - Nitrogênio

N_2 - Gás nitrogênio

NO_X - Óxidos de Nitrogênio

O - Oxigênio

PC - Poder Calorífico

PCI - Poder Calorífico Inferior

PCS - Poder Calorífico Superior

Req - Razão de equivalência

S - Enxofre

SO_X - Óxidos de Enxofre

Syngas - Gás Combustível/Gás de Síntese

LISTA DE SÍMBOLOS

ξ - Razão de Equivalência

ω - Umidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16
1.1 JUSTIFICATIVA 17
1.2 OBJETIVOS 18
1.2.1 Objetivo geral 18
1.2.2 Objetivos específicos 18
2 REVISÃO DE LITERATURA 19
2.1 INDÚSTRIA AVÍCOLA 19
2.2 CAMA DE AVIÁRIO 20
2.2.1 Análise imediata de camas de aviário 22
2.2.2 Análise elementar de camas de aviário 23
2.2.3 Poder calorífico de camas de aviário 24
2.3 ROTAS DE DESTINAÇÃO DE BIOMASSAS 24
2.3.1 Tratamento físico-químico de biomassas 25
2.3.2 Tratamento biológico de biomassas 26
2.3.3 Tratamento termoquímico de biomassas 26
2.4 GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSAS 26
2.4.1 Etapas da gaseificação de biomassas 28
2.4.2 Tipos de reatores 29
2.4.2.1 Reatores de leito fixo 29
2.4.2.2 Reatores de leito fluidizado 32
2.4.3 Gás de síntese 33
2.5 MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO 34
2.5.1 Modelo cinético do processo de gaseificação 35
2.5.2 Modelo de equilíbrio do processo de gaseificação 35
3 MATERIAL E MÉTODOS 37
3.1 COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS DAS CAMAS DE AVIÁRIO 37
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DAS CAMAS DE AVIÁRIO 37
3.3 MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO 38
3.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA COMPOSIÇÃO DO *SYNGAS* ESTIMADO 40
3.5 ESTUDO DE CASO DA APLICAÇÃO DO POTENCIAL DO *SYNGAS* ESTIMADO PARA GERAÇÃO TÉRMICA EM UM MATRIZEIRO EM SUBSTITUIÇÃO AO GLP 41
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS 42

4.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DAS CAMAS DE AVIÁRIO.....42
4.2 ESTIMATIVA DA COMPOSIÇÃO DO *SYNGAS* 44
4.2.1 Análises de sensibilidade do perfil do s*yngas* estimado a partir da CAO.....47
4.3 ESTUDO DE CASO DA APLICAÇÃO DO POTENCIAL DO *SYNGAS* ESTIMADO PARA GERAÇÃO TÉRMICA EM UM MATRIZEIRO EM SUBSTITUIÇÃO AO GLP.50
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....51
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 51
REFERÊNCIAS.....53
1 APÊNDICE 1.....61
1.1 VALIDAÇÃO DA MODELAGEM MATEMÁTICA DE EQUILIBRIO QUÍMICO DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO REPRODUZIDO.....61

1 INTRODUÇÃO

A evolução e o crescimento da avicultura industrial, em diversas regiões do Brasil, estão relacionados à dinâmica do espaço rural afetada pelas necessidades comerciais e produtivas (BELUSSO; HESPANHOL, 2010). Além disso, o ramo passou por outra acelerada expansão desde sua criação. Isso se deve, ao aumento do consumo da carne de frango causado pela queda do preço da ave e pela melhoria da renda dos consumidores (TEIXEIRA; TEIXIERA, 2021). Em 2020, o setor apresentou um consumo de 45,3 kg.Hab.$^{-1}$, superando os valores obtidos desde 2011 (ABPA, 2021).

A produção avícola possui características de alto consumo de energia e geração de resíduos com considerável potencial energético (SANTOS; LUCAS JUNIOR, 2004). Os principais rejeitos vinculados com a avicultura são a cama de aviário e as carcaças de animais. A cama de aviário é constituída por excretas das aves, material absorvente, penas, restos de alimentos e secreções (BRUMANO, 2008). Com o acréscimo no consumo de frango houve um aumento na geração desses resíduos e, consequentemente, na preocupação com a destinação final deles.

A correta destinação da cama de aviário possibilita a geração de energia e a contribuição para o equilíbrio energético dos processos da atividade, devido ao seu relevante potencial energético (GALBIATTI *et al*., 2010).

Nesse sentido, a utilização da gaseificação como forma de destinação é uma alternativa interessante, pois, através da conversão da biomassa em altas temperaturas, obtém-se um gás combustível (gás de síntese), que pode ser utilizado na geração de eletricidade através da combustão direta, para a operação de células a combustível ou para a produção de biocombustíveis e produtos químicos (BARRIQUELLO, 2013; SILVA *et al*., 2017; ZANATTA, 2011).

O gás de síntese (*syngas)* gerado pelo processo de gaseificação, tem sua constituição baseada, principalmente, em H_2, CO, CH_4, CO_2 e H_2O. Essa composição pode variar de acordo com as condições de operação do processo, do tipo combustível e do agente gaseificador utilizado. Além disso, a concentração das espécies no produto gasoso afeta sua qualidade, dessa forma, é um fator importante a ser considerado, dependendo da finalidade a qual se destina (FUZIKI, 2017).

Sendo assim, o processo de gaseificação tornou-se uma importante alternativa, para a geração de energia associada a menores níveis de emissões de

poluentes atmosféricos, como óxidos de enxofre (SO_X) e óxidos de nitrogênio (NO_X) (LORA *et al*., 2012; WENDER, 1996).

1.1 JUSTIFICATIVA

O presente estudo foi motivado pela grande quantidade de resíduo de cama de aviário gerada, que se encontra entre 1,3 $kg.ave^{-1}$ a 2,6 $kg.ave^{-1}$. Em 2020, foram geradas 107,9 mil toneladas de resíduos de cama de aviário no Brasil, valor que desperta interesse na busca por formas de reutilização do material para que não seja destinado de forma inadequada (BELLAVER; PALHARES, 2003; ORTOLANI; BRITO, 2001; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL, 2021).

As principais formas de destinação desse resíduo tem sido o seu uso como fertilizante orgânico e o seu reaproveitamento dentro do processo da avicultura. Contudo, problemas relacionados a redução da produtividade agrícola, impactos na ciclagem de nutrientes, fertilidade do solo e restrição sanitária estão vinculados com essas destinações.

Uma alternativa para a utilização da cama é integrá-la a geração de energia, cujo processo pode ser realizado por diferentes rotas (CORRÊA; MIELE, 2011; DE BONA *et al.*, 2017). Nesse sentido, tem-se a biodigestão e a gaseificação como principais rotas. No entanto, a biodigestão desse resíduo seria prejudicada pela presença de material lignocelulósico no conteúdo, provocando assim uma atividade microbiana limitada.

O processo de gaseificação, por sua vez, se mostra uma rota de destinação vantajosa e promissora por apresentar as vantagens: diminuição das emissões de particulado, pois as cinzas e o material sólido rico em carbono (biochar) permanecem no gaseificador; elevada eficiência térmica; aumento da produção de hidrogênio e de monóxido de carbono e redução de dióxido de carbono, quando vinculada a catalisadores; e obtenção do *syngas* (ABREU *et al.*, 2010).

Junto a esses fatores somasse a importância da utilização de resíduos como fonte de geração de energia, pois contribuem para diversificação da matriz energética e para a redução dos impactos ambientais, tais como a poluição do solo e de recursos hídricos, proliferação de doenças e entre outros.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Conhecer e avaliar as características físico-químicas e o potencial energético da cama de aviário para aplicação em processo de gaseificação.

1.2.2 Objetivos específicos

a) Caracterizar experimentalmente as propriedades físico-químicas de dois tipos de cama de aviário, sendo uma proveniente dos processos de produção de ovos e outra de recria;
b) Implementar um modelo de equilíbrio químico para estimar a composição do gás de síntese estimado por meio da cama de aviário do processo de produção de ovos;
c) Analisar o perfil da composição do *syngas* estimado em função da variação dos parâmetros de razão de equivalência e temperatura;
d) Estimar o potencial energético do *syngas*;
e) Avaliar a aplicação do processo de gaseificação para aproveitamento energético da cama de aviário gerada em matrizeiros de aves.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 INDÚSTRIA AVÍCOLA

A avicultura é um ramo da pecuária responsável pela produção de alimentos através da criação de aves. Os principais produtos obtidos no setor são a carne de frango e os ovos, oriundos de aves de corte e de postura, respectivamente (LOPES, 2011).

A carne de frango é a segunda mais consumida em âmbito mundial, sendo ultrapassada apenas pela carne suína (RODIGHERI, 2012). Atualmente, o Brasil ocupa o terceiro lugar no ranking do mercado mundial de carne de frango (Figura 1), com uma produção de 13.845 mil toneladas em 2020, sendo superado apenas pelos Estados Unidos e pela China. O maior representante do país é o estado do Paraná, que responde por 35 % do abate de nacional de frango (ABPA, 2021).

FIGURA 1– COLOCAÇÃO DO BRASIL NO MERCADO MUNDIAL DE CARNE DE FRANGO EM MIL TONELADAS

FONTE: ABPA (2021).

O progresso científico do setor, as mudanças nos padrões alimentares da população, a globalização econômica e a qualificação das empresas agroindustriais são os principais motivos que tornaram o Brasil um dos países mais importantes na indústria avícola. Desse modo, houve redução dos custos e aumento do consumo e produção da carne de frango (COSTA; FERREIRA, 2011; WATANABE, 2016).

Para atender a alta demanda pela carne de frango, o número de instalações de aviários aumentou, o que ocasionou impactos ambientais com a elevada geração de resíduos atrelados a atividade, tais como a cama de aviário, as carcaças dos animais e água de lavagem (PINTO *et al.,* 2015; ULIANO, 2011). A forma incorreta de descarte desses materiais na natureza causa problemas ambientais (CORRÊA; MIELE, 2011).

2.2 CAMA DE AVIÁRIO

A cama de aviário, também conhecida como cama de frango, é caracterizada, originalmente, por uma camada de maravalha, cascas ou palhas, distribuída no aviário com objetivo de evitar o contato direto das aves com o piso, facilitar a absorção e evaporação das excretas e reduzir a oscilação de temperatura nas instalações de criação (SILVA *et al*., 2013). Devido ao contato contínuo entre as aves e a cama, exige-se que os materiais utilizados sejam de qualidade suficiente para alterar as características ambientais do local e proporcionar conforto aos animais (AVILA *et al.*, 2008). Após sua utilização, a cama é constituída pela maravalha incorporada de excretas, penas, pele e restos de ração como mostra a Figura 2 (HAHN, 2004).

FIGURA 2 – CAMA DE AVIÁRIO

FONTE: A autora (2021).

Levando em consideração o grande número de aves alojadas no país, como por exemplo em 2020, onde foram alojadas 55.334.975 aves de corte e 1.441.548 aves de postura, o reaproveitamento desse resíduo tornou-se um fator importante na busca de alternativas de descarte do material. Além disso, outro ponto significativo foi

a média de geração da cama de aviário que se encontra em 1,95 kg.ave^{-1} (BELLAVER; PALHARES, 2003; ORTOLANI; BRITO, 2001; ABPA, 2021).

Dessa forma, o volume produzido e as características físico-químicas da cama de aviário a tornam foco de estudos que visam determinar alternativas para o manejo e descarte adequados desse resíduo (FIOREZE *et al.,* 2020). Contudo, a composição da cama de aviário pode variar consideravelmente dependendo da origem da cama e das práticas de manejo da granja, logo, essas características devem ser estudadas para garantir a correta destinação do resíduo (FONT-PALMA, 2012).

Até o ano de 2004, a cama de aviário teve seu reaproveitamento vinculado a alimentação de ruminantes. Entretanto, o Ministério da Agricultura divulgou a Instrução Normativa nº 8 de 25/03/2004 que proíbe a atividade em virtude dos riscos sanitários, como por exemplo, a transmissão da encefalopatia espongiforme bovina e o botulismo. Nesse sentido, fez-se necessária a busca por outras formas de utilização desse resíduo (BRASIL, 2001).

Uma das alternativas encontradas foi a aplicação da cama de aviário como fertilizante orgânico, por ser uma boa fonte de nutrientes. No entanto, para isso é necessário ter-se conhecimento de todo o sistema agrícola envolvido, principalmente do solo, devido a sua aplicação inadequada ou uso excessivo representarem potenciais riscos ao meio ambiente, como por exemplo a dissipação de patógenos, emissões de gases de efeito estufa e compostos odoríferos. Além disso, o nitrogênio presente na cama pode ser convertido em amônia e nitratos (FONT-PALMA, 2012).

Outra possibilidade de utilização para esse resíduo é o seu reaproveitamento dentro do processo da avicultura, ou seja, em mais de um ciclo de produção. Entretanto, essa atividade implica em uma maior restrição do mercado perante aos riscos sanitários causados pelos grupos bacterianos presentes no material (SILVA *et al.,* 2007; PERSZEL, 2018). Por outro lado, pesquisas relacionadas a utilização da cama como alternativa para a geração de energia tem ganhado cada vez mais destaque, sendo que o processo de conversão pode ser realizado por meio de diferentes rotas, de acordo com as características do material e aplicação final (PAULA JUNIOR, 2014).

Nesse sentido, tem-se a biodigestão e a gaseificação como exemplo de processos de conversão. Contudo, para o processo de biodigestão faz-se necessário pesquisas, devido ao material ser seco e implicar em uma atividade microbiana limitada, tornando fundamental a mistura de água, inserção de inóculo ou codigestão

com outro substrato líquido de biomassa ativa para alimentação dos biodigestores (DE BONA *et al.*, 2017). Em alternativa, o processo de gaseificação tem tomado considerável destaque por ser mais limpo e resultar na diminuição das emissões de particulado e no *syngas* (DION *et al.*, 2013; ABREU *et al.*, 2010).

Assim sendo, para a utilização da cama de aviário como alternativa energética, torna-se importante o conhecimento de algumas características para melhor definição do processo de conversão, como exemplo: teor de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo, conteúdo de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre (S) e poder calorífico (PC) (MCKENDRY, 2002).

2.2.1 Análise imediata de camas de aviário

A análise imediata fornece resultados de umidade, teor de voláteis, cinzas e carbono fixo. Na Tabela 1 são listados exemplos de trabalhos disponíveis na literatura que trazem como resultado a análise imediata de amostras de cama de aviário.

TABELA 1 – VALORES DE ANÁLISE IMEDIATA DE CAMAS DE AVIÁRIO ENCONTRADOS NA LITERATURA

Autores	**Teor de Umidade (%)**	**Teor de Voláteis (%, base seca)**	**Teor de Cinzas (%, base seca)**	**Teor de Carbono Fixo (%, base seca)**
Pereira *et al*., (2019)	15,25	70,69	12,76	16,19
Neitzke, (2010)	17,00	75,59	15,98	8,43
Junqueira, (2014)	14,46	70,67	11,97	17,36
Steffler, (2019)	17,00	64,07	20,05	15,88

FONTE: A autora (2021)

O teor de umidade é um parâmetro importante a ser analisado por apresentar uma relação inversamente proporcional ao poder calorífico (JUNQUEIRA, 2014). Sendo assim, um alto teor de umidade dificulta a queima devido à redução do poder calorífico (BRAND, 2008; KLAUTAU, 2008). Além disso, esse teor varia de acordo com o tipo de material, o clima, o armazenamento, entre outros fatores relacionados ao processo e origem do resíduo (GARCIA, 2010). Ainda, é recomendado que o teor de umidade presente no material a ser gaseificado esteja na faixa de 8 - 20%

(NEITZKE, 2017). Os teores médios de umidade para camas de aviário encontrados em literatura foram de 14,46 – 17% (Tabela 1).

Em razão dos materiais voláteis degradarem com maior facilidade e colaborarem com a permanência da chama da combustão, eles desempenham um papel importante no processo de ignição e nas etapas iniciais da combustão da biomassa (CORTEZ *et al.*, 2008). De acordo com dados da literatura esse teor, para a cama de aviário, se encontra, aproximadamente, na faixa de 64,07 – 70,69 %.

Os valores médios para teores de carbono fixo e cinzas encontrados a partir de pesquisas bibliográficas foram de 8,43 – 17,36 % e 12,76 - 20,05%, respectivamente (Tabela 1). Um maior teor de carbono fixo no material aumenta o tempo de residência e, consequentemente, o poder calorífico. Por sua vez, teores elevados de materiais inorgânicos, ou seja, as cinzas, implicam na redução do poder calorífico pelo fato de não participarem do processo de combustão (CHAVES *et al.*, 2013; BRAND; MUNIZ, 2010).

2.2.2 Análise elementar de camas de aviário

A partir da análise elementar, é obtida a porcentagem em massa dos elementos que constituem a fração orgânica da amostra, como o Carbono (C), o Hidrogênio (H), o Oxigênio (O), o Nitrogênio (N) e o Enxofre (S). Dessa forma, representam a característica mais importante do combustível para a determinação dos volumes de ar, gases e entalpia nos processos de conversão (FERNANDES; SÁNCHEZ, 2003). Neitzke (2010), Egute (2010), Silva *et al.*, (2017), Junqueira (2014) e Steffler (2019), reportaram os valores médios dispostos na Tabela 2 para a caracterização elementar de camas de aviário diversas avaliadas nos respectivos estudos.

TABELA 2 – VALORES MÉDIOS DE ANÁLISE ELEMENTAR DE CAMAS DE AVIÁRIO EM BASE SECA ENCONTRADOS NA LITERATURA

Autores	**C (%)**	**H (%)**	**O (%)**	**N (%)**	**S (%)**
Neitzke, (2010)	37,53	5,26	35,69	2,36	2,32
Egute, (2010)	36,45	5,39	-	4,38	-
Silva *et al*., (2017)	36,41	5,56	-	3,10	1,48
Junqueira, (2014)	39,6	6,06	38,42	4,82	-
Steffler, (2019)	39,27	4,80	35,32	-	-

FONTE: A autora (2021)

A média para os teores de carbono e hidrogênio é de 37,85 % e 5,41 %. Por outro lado, a faixa para os teores de oxigênio, nitrogênio e enxofre se encontra de 35,32 – 38,42 %, de 2,36 – 4,82 %, e de 1,48 - 2,32 %.

2.2.3 Poder calorífico de camas de aviário

O poder calorífico representa a quantidade de energia por unidade de massa liberada na forma de calor durante a combustão do combustível (normalmente expressado em $MJ.kg^{-1}$) (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2008). Esse parâmetro é fortemente influenciado pela umidade da amostra, ou seja, quanto menor o teor de umidade no material uma maior quantidade de energia será liberada (SCHIRMER *et al*., 2017) e, além disso, pela água de formação obtida a partir da oxidação do hidrogênio do combustível. A faixa média de poder calorífico da cama de aviário, encontrada em literatura, Tabela 3, gira em torno de 14 $MJ.kg^{-1}$ (JUNQUEIRA, 2014; NIETZKE, 2010).

TABELA 3 – VALORES DE PODER CALORÍFICO DE CAMAS DE AVIÁRIO ENCONTRADOS NA LITERATURA

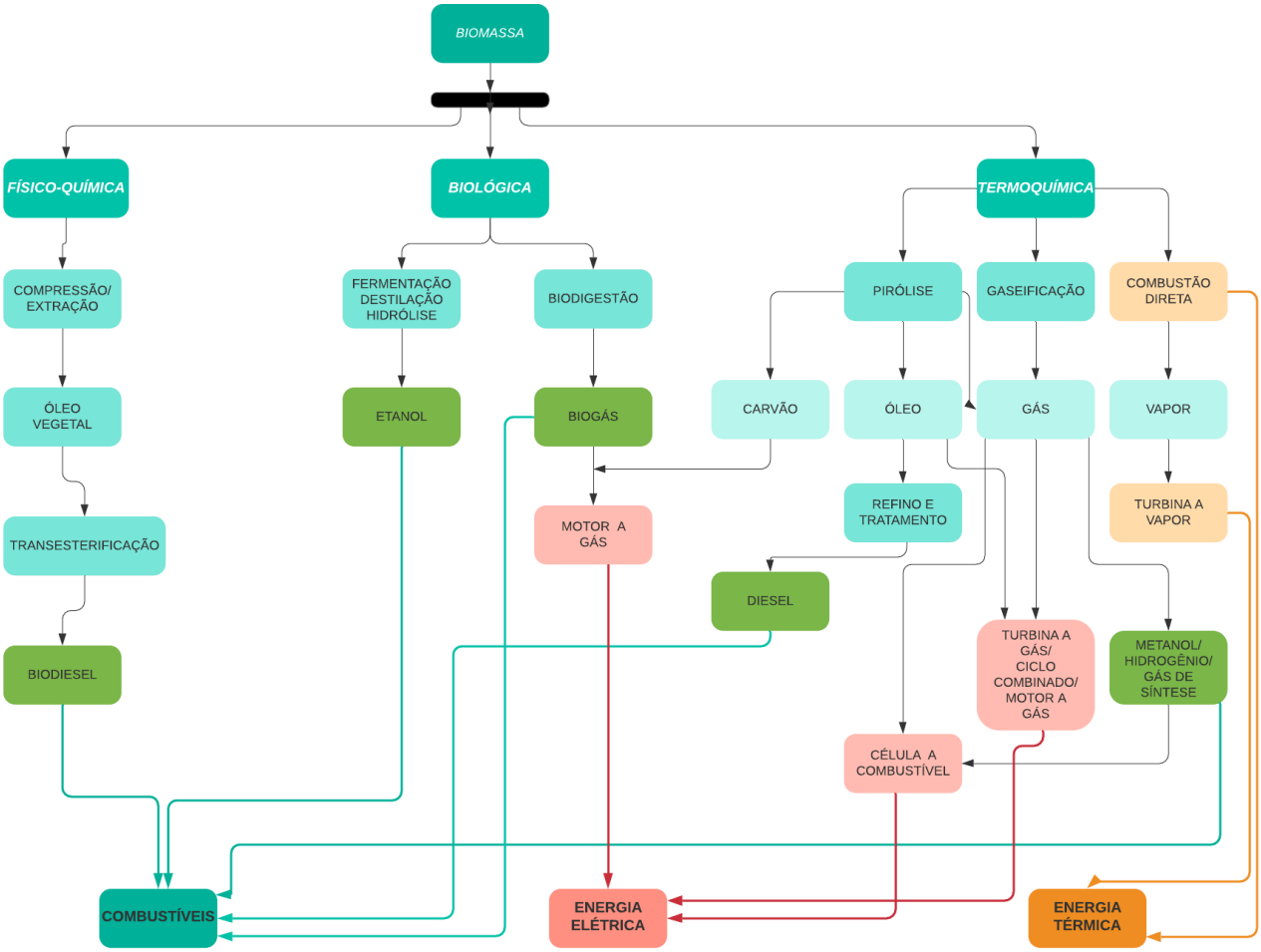
Autores	**Poder Calorífico Superior ($MJ.kg^{-1}$, base seca)**
Junqueira (2014)	13,26
Neitzke (2010)	13,52
Steffler (2019)	15,45

FONTE: A autora (2021)

2.3 ROTAS DE DESTINAÇÃO DE BIOMASSAS

Para a geração de energia por meio de biomassa é necessário que o material passe por alguns processos de conversão, que variam de acordo com sua composição e objetivo final. As tecnologias de transformação podem ser classificadas em três tipos: físico-química, biológica e termoquímica, como pode ser visualizado na Figura 3 (ROCHA, 2011).

FIGURA 3 - ROTAS DE DESTINAÇÃO DA BIOMASSA



FONTE: Adaptado de Larkin *et al*. (2004).

2.3.1 Tratamento físico-químico de biomassas

A conversão físico-química da biomassa está relacionada a técnicas de compressão e extração de óleos vegetais de oleaginosas. Por meio do processo de esterificação ocorre a modificação química dos óleos, os quais podem ser utilizados em motores de combustão interna (MME, 2007).

Devido aos óleos vegetais puros apresentarem baixo número de cetonas e elevada viscosidade, eles são convertidos frequentemente em biodiesel, tornando suas propriedades mais adequadas para sua utilização em motores de ciclo diesel. Além disso, o biodiesel gerado é comumente utilizado como combustível para transporte (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2007).

2.3.2 Tratamento biológico de biomassas

Essa técnica de tratamento usa processos biológicos e bioquímicos, como digestão anaeróbica, fermentação, destilação e hidrólise para obter combustível. Dentre as tecnologias citadas, a digestão anaeróbia é a mais utilizada para gerar eletricidade a partir do biogás produzido em biodigestores, biocombustível composto principalmente por metano e dióxido de carbono (FILHO, 2009).

2.3.3 Tratamento termoquímico de biomassas

O processo termoquímico emprega faixas de temperatura para a degradação térmica da biomassa. Este tratamento pode ser a combustão direta, a pirólise ou a gaseificação, onde o produto é caracterizado pela técnica de conversão utilizada.

A combustão direta consiste na transformação da energia química dos combustíveis em calor em fornos e caldeiras com presença de ar em excesso, e, apesar de ser um processo muito prático é um tratamento ineficiente (MARAFON *et al.,* 2016).

A principal diferença entre a pirólise e a gaseificação é que a primeira usa uma atmosfera livre de oxigênio, sendo também empregadas temperaturas menores em relação à gaseificação. Os produtos da pirólise são o bio-óleo (alcatrão) e sólidos contendo carbono (biochar) e cinzas. Por outro lado, gás de síntese, alcatrão e cinzas são os principais produtos obtidos da gaseificação (PIGHINELLI *et al*., 2018).

2.4 GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSAS

O termo gaseificação é empregado em processos de conversão de combustíveis carbonosos, sólidos ou líquidos, em produtos gasosos, utilizando como agente oxidante oxigênio, ar ou a combinação de ar/vapor (HIGMAN; BURGT, 2008). Ao decorrer do processo ocorrem reações endotérmicas, que são favorecidas com a elevação da temperatura por conta da necessidade de energia para acontecerem. O fornecimento dessa energia pode ser provido a partir da própria oxidação parcial do combustível, composta por reações exotérmicas, ou por uma fonte externa de calor. Autotérmico e alotérmico são as denominações para esses dois modos de operação, respectivamente, sendo a primeira, em alguns casos, mais interessante por realizar o

aproveitamento da energia liberada pela própria gaseificação do combustível (RAUCH *et al*., 2015; MOLINO *et al.*, 2016; FUZIKI, 2017).

Por ser um processo mais limpo, quando comparado à combustão direta e, além disso, levando em consideração os impactados causados pelo uso de combustíveis fósseis, a geração de resíduos na agroindústria e a busca pela descentralização da geração de energia a gaseificação apresenta-se como um mecanismo mais atrativo (DION *et al.*, 2013; VIANA, 2015). A tecnologia, ainda, produz um gás combustível constituído basicamente por monóxido de carbono, hidrogênio e dióxido de carbono (DALPONT, 2017). Sendo assim, países têm investido e apoiado o seu uso para a geração de energia elétrica e térmica, para obtenção de produtos químicos, entre outras aplicações (CARDOSO, 2013).

A gaseificação é um processo eficiente de conversão de biomassa em energia. Sendo assim, levando em consideração as eficiências globais de aproveitamento do combustível, essa tecnologia apresenta uma faixa de 65% a 80% de eficiência (SANTOS, 2003).

Os parâmetros que influenciam no processo de gaseificação e, consequentemente, na eficiência do mesmo são: razão de equivalência, a composição da matéria-prima, a pressão e a temperatura do processo (TAVARES, 2016).

A razão de equivalência é determinada como a razão combustível-ar dos reagentes pela razão combustível-ar em condição estequiométrica. Nesse sentido, a quantidade de oxigênio disponível é uma variável importante na gaseificação, devido ao excesso proporcionar a combustão completa do carbono e hidrogênio disponíveis. Por outro lado, a falta de oxigênio acarreta a não interação com a parte do carbono e do hidrogênio, não havendo a conversão destes componentes em gás (RENDEIRO *et al*., 2008).

As biomassas apresentam diferentes composições e, consequentemente, algumas características que são cruciais para a gaseificação, tais como o poder calorifico, o teor e composição das cinzas e umidade (RENDEIRO *et al.*, 2008; TAVARES, 2016). Dessa forma, cada uma influencia o processo à sua maneira, por exemplo, quanto maior o teor de umidade da biomassa menor o poder calorífico dela (BASU, 2006).

Ainda, os reatores de gaseificação podem operar pressurizados, o que influencia na composição dos gases produzidos. Dessa forma, elevando a pressão,

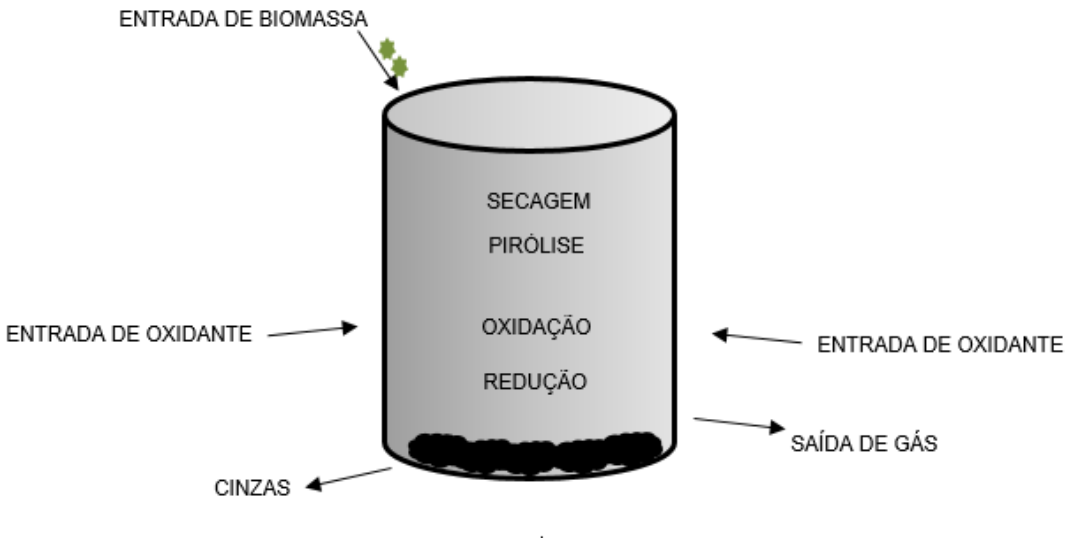
os teores de CO e H_2 diminuem e os teores de H_2O, CO_2 e CH_4 aumentam (RENDEIRO *et al.,* 2008).

O aumento de temperatura favorece algumas reações implicando no aumento da produção de monóxido de carbono (OLIVEIRA; SANTOS, 2015).

2.4.1 Etapas da gaseificação de biomassas

O processo de gaseificação ocorre em um reator e consiste em 4 etapas principais que descrevem as transformações do combustível desde sua entrada no reator até a conversão em gás e/ou subprodutos, sendo elas: a secagem, a pirólise, a oxidação e a redução (MAGALHÃES, 2020), conforme mostra a Figura 4.

FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE REATOR DE GASEFICAÇÃO GENÉRICO



FONTE: A autora (2021).

Na etapa de secagem, que acontece até 150 °C, é promovida a remoção da água presente no combustível, de forma a transformá-la em vapor. Já na fase de pirólise, com temperaturas superiores a 700 °C, sucede-se a decomposição do combustível na presença de calor, gerando frações sólidas, líquidas e gasosas (ALVES, 2020).

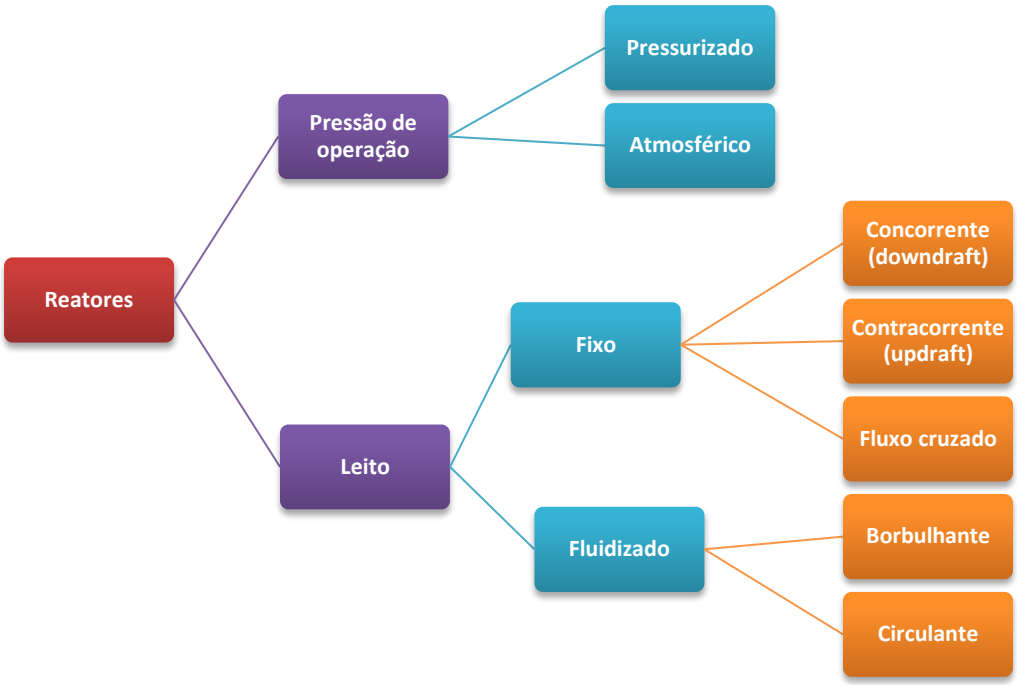
A partir da zona de oxidação, também conhecida como zona de combustão, a qual opera em uma faixa de temperatura de 700 °C a 2000 °C, efetua-se a interação

da matéria-prima com o oxigênio. Por fim, na etapa de redução (800 °C <T< 1100 °C) ocorre a obtenção do *syngas* (QUITETE; SOUZA, 2014).

2.4.2 Tipos de reatores

Os reatores ou gaseificadores realizam a conversão do resíduo sólido em frações gasosas, líquidas e sólidas, podendo ser classificados em reatores de leito fixo e fluidizado, como demonstra a Figura 5. O reator adequado é selecionado a partir do tipo de combustível utilizado, capacidade e uso final do gás produzido (NÁSNER, 2015).

FIGURA 5 – CLASSIFICAÇÃO DOS REATORES



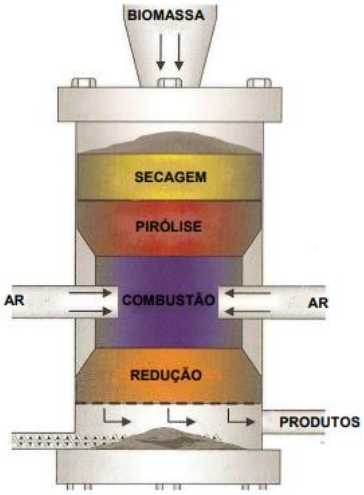
FONTE: Adaptado de Dalvi (2015)

2.4.2.1 Reatores de leito fixo

Nos gaseificadores de leito fixo, o combustível se movimenta pela ação da gravidade. Sendo assim, esses modelos de reatores, mais antigos, são considerados mais simples, e utilizados para gaseificação de pequeno porte (RIBAS, 2016). Dentre os gaseificadores de leito fixo destacam-se dois grandes subgrupos: concorrente e contracorrente.

Os modelos cujo oxidante e o gás fluem na mesma direção do combustível, ou seja, para baixo, são chamados de concorrente (Figura 6). Ele é projetado de forma a direcionar os alcatrões e voláteis a passarem pela zona de combustão, onde serão reduzidos a compostos mais leves, e, por isso, o gás produzido apresenta em sua constituição valores baixos de alcatrão. O *syngas* obtido por este equipamento apresenta uma temperatura que gira em torno de 700 °C (FOLEY; GEOFFREY, 1983).

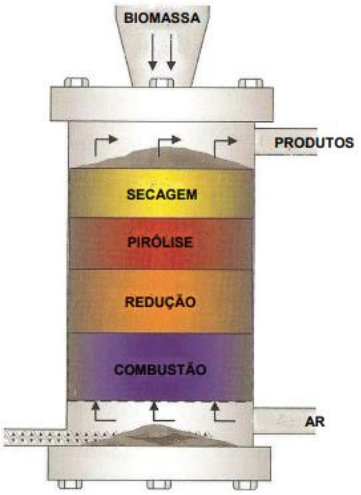
FIGURA 6 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM REATOR CONCORRENTE



FONTE: Oliveira (2007)

Os reatores contracorrente possuem a entrada do combustível pela parte superior do equipamento, enquanto a entrada de ar se encontra na parte inferior dele (Figura 7). Em geral, esses gaseificadores apresentam uma eficiência térmica alta devido aos gases quentes vindos da zona de combustão pré-aquecerem o combustível. No entanto, produzem um gás com maior concentração de alcatrão e material particulado (SÁNCHEZ, 2010).

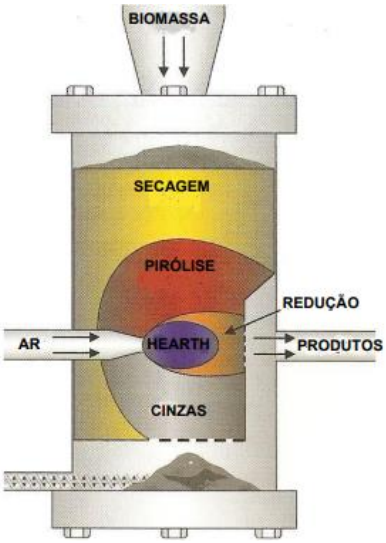
FIGURA 7 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DO REATOR CONTRACORRENTE



FONTE: Oliveira (2007)

Os reatores de fluxo cruzado (Figura 8) foram desenvolvidos para operar a carvão mineral, resultando em temperaturas muito elevadas na zona de oxidação e, consequentemente, problemas com material construtivo. Seu funcionamento baseia-se na entrada do combustível pelo topo do equipamento e o ar pela lateral, por meio de um injetor. O gás produzido é extraído pela lateral oposta (NÁSNER, 2015; MESQUITA; MENEZES, 2017).

FIGURA 8 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DO REATOR DE FLUXO CRUZADO



FONTE: Oliveira (2010)

2.4.2.2 Reatores de leito fluidizado

A utilização de gaseificadores de leito fluidizado está vinculada às características de alta eficiência de conversão e as altas taxas de transferência de calor. Além disso, a preparação do combustível é mais simples quando comparada aos demais modelos. Dessa forma, os reatores de leito fluidizado são uma tecnologia promissora tendo sua utilização indicada para carvão com elevada quantidade de cinzas e rejeitos em geral (ABCM, [20--]; SÁNCHEZ, 2010).

Em geral, os reatores de leito fluidizado operam com tempo de residência na ordem de um minuto, com temperatura na faixa de 800 - 1000 °C, e, em relação ao material utilizado é necessário que o mesmo apresente uma granulometria uniforme, na faixa de 10 a 100 mm, uma umidade menor que 40 % e um teor de cinzas menor que 20 %. A sua principal aplicação é para produção de energia térmica e elétrica (QUITETE; SOUZA, 2014).

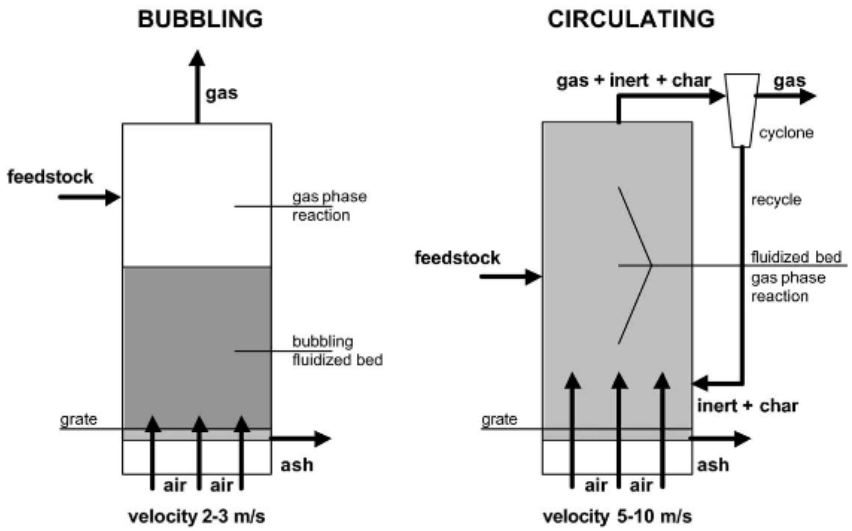
Quando comparado aos reatores de leito fixo, os gaseificadores de leito fluidizado apresentam algumas vantagens: maior capacidade térmica; menores dificuldades de aumento de escala; menor temperatura de operação e maior homogeneidade da mesma no zona do leito; maior flexibilidade em relação às partículas dos combustíveis, entre outras (SÁNCHEZ, 2010).

Esses reatores são classificados de acordo com as características da câmara de reação, ou seja, podem ser do tipo borbulhante ou circulante (Figura 9) (BARROS; BORGES, 2017).

Os gaseificadores borbulhantes operam no regime fluidodinâmico borbulhante, onde se utiliza uma velocidade superficial do agente gaseificante maior que a da mínima necessária para a formação de bolhas no leito. Além disso, a alimentação do combustível é feita diretamente na zona do leito e a maior proporção das cinzas é evacuada pela base do leito não retornando para o processo (Figura 9) (ANDRADE, 2007).

Os reatores de leito fluidizado circulante possuem destaque quando se trata da conversão de combustíveis sólidos, havendo maior indicação para materiais com teores elevados de cinzas (BIANCHI; AQUINO, 2017). Nesse tipo de reator, ocorre a recirculação do material inerte e carbonizado por meio de um ciclone (Figura 9) (BELGIORNO *et al.,* 2003).

FIGURA 9 – ILUSTRAÇÕES ESQUEMÁTICAS DOS REATORES DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE E CIRCULANTE



FONTE: Belgiorno *et al.* (2003)

As etapas de secagem, pirólise, gaseificação e combustão, independentemente do tipo de gaseificador de leito fluidizado, acontecem quase simultaneamente, não sendo possível a identificação das mesmas separadamente (SÁNCHEZ, 1994).

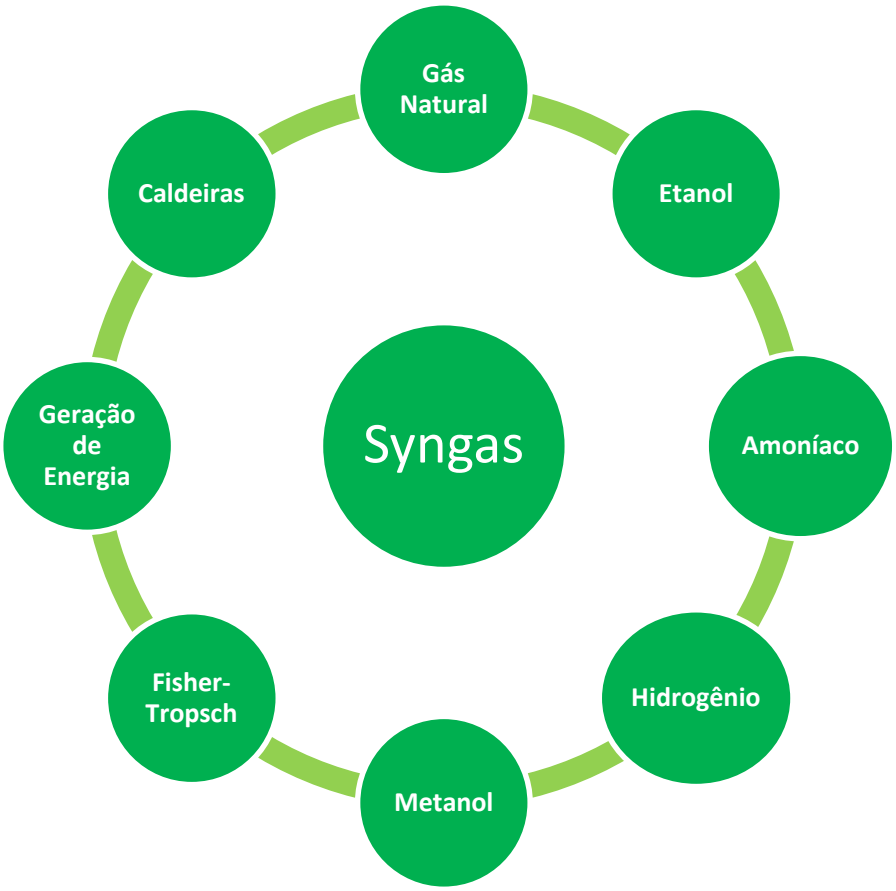
2.4.3 Gás de síntese

O gás de síntese é o gás combustível obtido por meio do processo da gaseificação de compostos orgânicos. Sua composição baseia-se, majoritariamente, em monóxido de carbono e hidrogênio, e minoritariamente em dióxido de carbono e metano (SANTANA *et al.*, 2012). Além disso, há também a formação de compostos como os hidrocarbonetos complexos que são considerados impurezas e possuem sua quantidade e espécie dependente da composição da biomassa utilizada no processo (HANCHATE *et al.*, 2021).

A composição final do gás combustível sofre influências relacionadas, principalmente, ao tipo de combustível utilizado, do tipo de reator e das condições de operação (COLLAZZO, 2013).

As destinações para o uso do *syngas* são diversificadas (Figura 10). Nesse sentido, pode-se obter como produto combustíveis, produtos químicos e energia.

FIGURA 10 – POSSIBILIDADES DE APLICAÇÕES DO SYNGAS



FONTE: Adaptado de Figueroa (2015).

A partir de sínteses do gás é possível obter produtos químicos e combustíveis tais como metanol, etanol, amoníaco, hidrogênio, gás natural, formaldeídos, fertilizante, ureia e entre outros (LIMA *et al*., 2017).

Para a geração de energia, seja ela térmica ou elétrica, utiliza-se o *syngas* em caldeiras, turbinas de vapor, motores de combustão interna, turbinas a gás e células a combustível (FIGUEROA, 2015).

2.5 MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO

A modelagem do processo de gaseificação visa reproduzir os fenômenos termoquímicos que ocorrem no reator e avaliar os impactos das principais variáveis de entrada, como por exemplo o teor de umidade e a razão ar/combustível, nas variáveis de saída, tais como a composição do gás gerado e o seu poder calorífico (RODRIGUES, 2015).

A modelagem do sistema reacional é uma perspectiva fundamental para a compreensão do processo de gaseificação. Nesse contexto, o conjunto de reações, a fluidodinâmica e os fenômenos de transferência de calor e massa envolvidos tornam a modelagem do processo uma atividade complexa (RODRIGUES, 2015).

Os modelos de gaseificação podem ser divididos em dois grupos, os modelos cinéticos e os modelos de equilíbrio (LI *et al.*, 2001).

2.5.1 Modelo cinético do processo de gaseificação

A modelagem cinética é realizada com o objetivo de reproduzir o progresso das reações e a composição dos produtos em diferentes posições ao longo de um reator, sendo definido um conjunto de possíveis reações que ocorrem no volume de controle, as constantes de velocidade envolvidas e as características do reator (BURAGOHAIN *et al*., 2010). Devido ao grande número de reações que ocorrem de forma simultânea e paralela e a quantidade de informações requeridas para o desenvolvimento da modelagem, a utilização desse método se torna complexa (LI *et al.,* 2004; FUZIKI, 2017; PUIG-ARNAVAT *et al.*, 2010; PUIG-ARNAVAT *et al.*, 2010).

2.5.2 Modelo de equilíbrio do processo de gaseificação

Nesse método, é assumido um estado de equilíbrio químico de maneira que o sistema reacional atinja sua composição mais estável, ou seja, de menor energia livre. Os resultados obtidos proporcionam o conhecimento dos limites máximos de rendimento do sistema, com base nas leis da termodinâmica, visando a otimização do processo de gaseificação. Nesse sentido, adota-se que as Taxas de Reações de gaseificação são rápidas o bastante e o Tempo de Residência é longo o suficiente para atingir o equilíbrio químico. O tipo de gaseificador não influencia nesse tipo de modelagem (ALTAFINI *et al*., 2003; RODRIGUES, 2015; FUZIKI, 2017).

As principais suposições adotadas para o emprego desse tipo de modelagem são: todo o carbono do material é convertido em produtos gasosos; partículas de cinza e nitrogênio são inertes e não participam das reações de gaseificação; o estado de gás ideal é aplicado a gases individuais e à mistura de gases como um todo; a formação de alcatrão é considerada insignificante; a pressão é constante; não há gradiente de temperatura dentro do reator (DENIM *et al.*, 2020).

Para esses modelos existem duas abordagens: estequiométrica e não-estequiométrica. O método estequiométrico baseia-se nas composições químicas iniciais e na determinação das constantes de equilíbrio de um conjunto de reações por meio de dados da energia livre de Gibbs. Por sua vez, a abordagem não-estequiométrica relaciona-se com a minimização da energia livre de Gibbs sujeito a balanço de massa e restrições não-negativas das composições (MENDIBURU *et al.,* 2014). Ambas as classificações apresentam resultados similares, no entanto, o método não-estequiométrico é capaz de estimar valores mais próximos a dados experimentais (RAMANAN *et al.*, 2008).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS DAS CAMAS DE AVIÁRIO

A amostragem foi realizada em matrizeiros de aves localizados na cidade de Palotina, essa situada no oeste do estado do Paraná, de forma manual e aleatória ao longo do aviário, Figura 11. Foram coletadas duas amostras de, aproximadamente, 6 kg de resíduos, sendo uma de cama de aviário do processo de produção de ovos (CAO), com 10 meses de alojamento, e uma do processo de recria (CAR), com 4 meses de alojamento, conforme a disponibilidade das unidades. Para o preparo das amostras foi realizada a homogeneização de cada amostra, moagem em moinho Willey e secagem a 105 ºC, durante 24h, posteriormente elas foram armazenadas em sacos identificados até o momento da realização das análises.

FIGURA 11 – CAMA DE AVIÁRIO COLETADA

FONTE: A autora (2021).

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DAS CAMAS DE AVIÁRIO

Os procedimentos de caracterização por análise imediata (teor de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo) e de poder calorífico superior das amostras foram realizados conforme as normas descritas na Tabela 4, em triplicata. Além disso, para verificação da permanência do perfil dos resultados realizou-se uma repetição dessas análises.

TABELA 4 – PARÂMETROS E METODOLOGIAS DE ANÁLISE

Análise	**Norma**
Umidade	ASTM E871-82
Teor de Voláteis	ASTM E872-82
Teor de Cinzas	ASTM D1102-84
Teor de Carbono Fixo	ASTM E870-82
Poder Calorífico Superior	ASTM D5865

FONTE: A autora (2021)

A composição elementar do material, por outro lado, foi estimada com base na análise imediata, onde em pesquisa bibliográfica buscou-se por estudos que reportassem resultados com características semelhantes, com o objetivo de obter dados de análise elementar mais representativos, devido a esses valores serem utilizados, posteriormente, como parâmetros de entrada na simulação do processo de gaseificação. Os resultados encontrados se encontram na Tabela 5.

TABELA 5 – COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DA CAMA DE AVIÁRIO EM LITERATURA LIVRE DE CINZAS

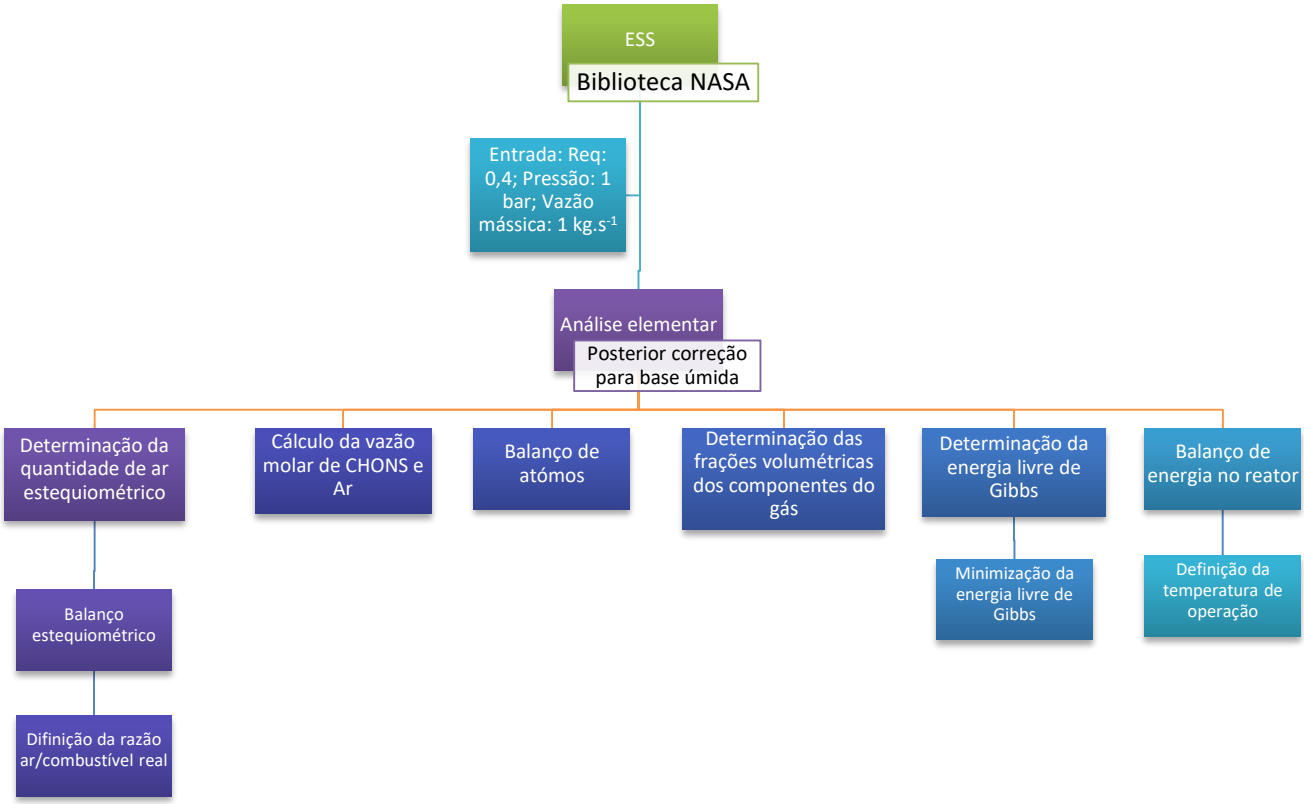
Elemento	**(%)**
C	46,86
H	6,27
O	40,97
N	4,99
S	1,00

FONTE: Reardon (2001).

3.3 MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO

Para a modelagem do processo de gaseificação foi reproduzida a metodologia proposta por Li *et al.*, (2004) de equilíbrio químico não estequiométrico, que leva em consideração o teor de umidade, teor de cinzas e a composição da fração orgânica do resíduo, as características do agente gaseificante e as características de operação do sistema. O método foi implementado no software *Engineering Equation Solver – EES*, onde foram realizados em paralelo os processos presentes na Figura 12. A validação da modelagem replicada se encontra no Apêndice 1.

FIGURA 12 – FLUXOGRAMA ESQUEMÁTICO DO PASSO-A-PASSO DA ROTINA DE PROGRAMAÇÃO DA SIMULAÇÃO



FONTE: A autora (2021)

O processo de gaseificação foi admitido como autotérmico, ou seja, a energia que mantém o processo é fornecida somente pela própria oxidação do combustível. Nesse sentido, a temperatura de operação foi determinada por meio do balanço de energia no gaseificador, o qual foi considerado isolado termicamente (adiabático).

Para o desenvolvimento da análise foi necessário inserir os dados da análise elementar, a qual leva em consideração os teores de Carbono (C), Hidrogênio (H), Oxigênio (O), Nitrogênio (N) e Enxofre (E), teor de umidade e vazão mássica do combustível, e, também, pressão e razão de equivalência ar/combustível do sistema (Req), como organizado na Tabela 6.

TABELA 6 – PARÂMETROS DE ENTRADA NA SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO DO PRESENTE ESTUDO.

Parâmetro	
C (%)	33,70
H (%)	4,51
O (%)	29,46
N (%)	3,59
S (%)	0,72
Teor de Umidade (%)	10,36
Pressão (bar)	1
R_{eq}	0,4
Vazão mássica ($kg.s^{-1}$)	1

FONTE: A autora (2021)

A modelagem foi realizada com base nos dados de análise imediata e elementar da cama de aviário provida do processo de produção de ovos obtidos, devido à maior disponibilidade dela nos matrizeiros.

3.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA COMPOSIÇÃO DO *SYNGAS* ESTIMADO

Dois cenários foram simulados como forma de avaliar a influência da razão de equivalência (Req) e da temperatura do reator na composição do gás de síntese estimado.

No primeiro cenário o sistema foi considerado autotérmico havendo apenas a variação da razão de equivalência na faixa de 0,2 a 0,54, com o intuito de verificar o perfil das frações volumétricas dos componentes gasosos e a temperatura necessária para o sistema atingir o equilíbrio nas condições determinadas.

Por fim, o segundo e último cenário teve como objetivo o estudo do comportamento do sistema em função da variação de temperatura, mantendo a razão de equivalência e a umidade fixas nos valores de 0,4 e 10,36%, respectivamente, e considerando o reator como alotérmico. A faixa de temperatura estudada foi de 800 a 1200 ºC (1073 – 1473 K). Uma vez que o sistema opera em modo alotérmico, há troca de calor com a vizinhança externa, parâmetro esse também analisado no cenário.

3.5 ESTUDO DE CASO DA APLICAÇÃO DO POTENCIAL DO *SYNGAS* ESTIMADO PARA GERAÇÃO TÉRMICA EM UM MATRIZEIRO EM SUBSTITUIÇÃO AO GLP

O estudo de caso para as unidades foi realizado com base nas informações de consumo mássico e poder calorífico inferior do Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) empregado para manutenção do conforto térmico dos animais, na disponibilidade de resíduo da atividade de produção de ovos dos matrizeiros e no poder calorífico do gás de síntese gerado (Tabela 7).

TABELA 7 – INFORMAÇÕES PARA O ESTUDO DE CASO DO MATRIZERIO DE AVES

Consumo de GLP	10.400 (kg.ano^{-1})
Poder Calorífico Inferior do GLP	46,28 (MJ.kg^{-1})
Geração de cama de aviário	3200 (t.ano^{-1})

FONTE: A autora (2021)

A energia térmica anual associada ao *syngas* produzido no processo de gaseificação foi calculada pela equação 1, enquanto, para o GLP a obtenção ocorreu pela equação 2. Nestas equações os termos m_{syngas} e m_{GLP} representam os consumos e PCI_{syngas} e PCI_{GLP} o poder calorífico inferior dos gases, respectivamente.

$$E_{Térmica,syngas} = m_{syngas} * PCI_{syngas} \quad (1)$$

$$E_{Térmica,GLP} = m_{GLP} * PCI_{GLP} \quad (2)$$

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DAS CAMAS DE AVIÁRIO

O teor de umidade é um dos parâmetros mais relevantes a serem avaliados na utilização de biomassa como combustível, pois possui relação inversa com o poder calorífico (JUNQUEIRA, 2014). Os teores de umidade das amostras CAO e CAR estão organizados na Tabela 8.

TABELA 8 – TEOR DE UMIDADE DAS CAMAS DE AVIÁRIO ESTUDADAS

Amostra	Teor de umidade (%)
CAO	10,36
CAR	18,28

FONTE: A autora (2021)

Esses valores foram próximos aos encontrados por Pereira *et al.* (2019) e Whitely *et al.* (2006), de 15,25 % e 10,59 %, respectivamente, para o mesmo tipo de material. Além disso, os resultados se encontram dentro da faixa ideal recomendada por Neitzke (2010) de 8 % a 20 %, para gaseificação. Vale ressaltar que valores elevados de teor de umidade implicam negativamente para o processo devido à maior necessidade de energia para início da gaseificação (RENDEIRO *et al.,* 2008).

Na Tabela 9 estão dispostos os resultados da análise imediata para as amostras de cama de aviário analisadas CAO e CAR e resultados encontrados em literatura para o mesmo tipo de material e para biomassas comumente utilizadas no processo de gaseificação.

TABELA 9 – ANÁLISE IMEDIATA EM BASE SECA DAS CAMAS DE AVIÁRIO COMPARADAS COM A LITERATURA

	Amostra	Teor de Voláteis (%)	Teor de Cinzas (%)	Teor de Carbono fixo (%)
Presente estudo	CAO	62,69 ± 0,22	28,09 ± 0,31	9,36 ± 0,50
	CAR	60,72 ± 0,25	27,09 ± 0,04	12,19 ± 0,29
Steffler (2019)	Cama de aviário	64,07	20,05	15,88
Reardon *et al.* (2001)	Cama de aviário	62,70	21,9	15,14
Junqueira (2014)	Cama de aviário	70,67	11,97	17,36
Brand (2010)	Cama de aviário	62,73	23,4	13,87
Costa *et al.* (2019)	Pinus spp.	59,36	5,91	34,73
	Bagaço de cana-de-açúcar	63,15	3,09	33,76
	Eucaliptos	60,71	2,83	36,43
Braz (2014)	Bagaço de cana-de-açúcar	75,96	3,59	18,29

	Amostra	Teor de Voláteis (%)	Teor de Cinzas (%)	Teor de Carbono fixo (%)
	Serragem de Pinus	70,23	4,04	18,29
Silva *et al.* (2016)	Bagaço de cana-de-açúcar	73,78	18,34	16,67
Borges (2020)	Cavaco de eucalipto	83,23	0,56	16,21
Vissotto (2015)	Pinus	88,69	0,38	9,93

FONTE: A autora (2021)

Os materiais voláteis estão relacionados com a velocidade do processo de decomposição e queima, visto que esses volatilizam com maior facilidade (MEDEIROS, 2020). Os valores determinados no presente estudo para teores de voláteis apresentaram-se semelhantes aos reportados anteriormente na literatura, tanto para camas de aviário quanto para outras biomassas utilizadas com maior frequência na gaseificação (Tabela 8), com isso, a CAO e CAR se encontram em um intervalo considerado pertinente para ser usado na gaseificação, uma vez que, maiores valores no teor de voláteis, ocasionariam em menor teor de carbono fixo, o qual, é responsável pelo fornecimento energético para o sistema após a etapa de pirólise (BRITO, 2020).

Os teores de cinzas obtidos para ambas as amostras foram superiores aos reportados em literatura para diversas biomassas, enquanto, os teores de carbono fixo apresentaram-se próximos, porém, inferiores (Tabela 8). O elevado teor de cinzas se deve ao fato da cama de aviário ser um material polidisperso e, além disso, possuir em sua constituição dejetos, penas e restos de alimentos, o que resulta, também, em um baixo teor de carbono fixo (STEFFLER, 2017; NEITZKE, 2010). Uma alternativa a ser estudada para alterar o teor de cinzas do material analisado, seria realizar a mistura de diferentes proporções de materiais celulósicos junto a cama, já que, estes apresentam baixos valores no teor de cinzas. Além disso, para que o processo ocorra de forma eficiente recomenda-se a utilização de gaseificadores do tipo leito fluidizado, os quais permitem o uso de materiais com elevado teor de cinzas (NASCIMENTO *et al*., 2017).

Na Tabela 10 se encontram os valores médios de poder calorífico superior obtidos pelas análises das amostras e, também, dados da literatura para demais biomassas.

TABELA 10 – PODER CALORÍFICO DAS CAMAS AVALIADAS EM BASE SECA COMPARADOS COM A LITERATURA

Amostra	**Poder Calorífico Superior (MJ.kg^{-1})**
CAO	10,9 ± 0,26
CAR	13,22 ± 0,007
Cama de aviário[1]	13,53
Cama de aviário[2]	14,84
Cama de aviário[3]	16,78
Eucalyptus grandis[4]	20,04
Pinus[5]	20,15
Bagaço de cana-de-açúcar[6]	17,81

FONTE: Horvat *et al.* (2017)[1]; Reardon *et al.* (2001)[2]; Katsaros *et al.* (2019)[3] ; Brito *et al.* (1983)[4]; Protásio *et al*. (2015)[5]; Costa *et al.* (2020)[6].

Quando comparado a dados de poder calorífico superior de biomassas comumente utilizadas, tais como o Eucalipto, o Pinus e o Bagaço de cana-de-açúcar os dados para as camas de aviário obtidos no presente estudo se mostraram inferiores. Tal diferença se deve ao fato da cama ser um resíduo e apresentar em sua composição uma notável quantia de material inorgânico. Por outro lado, os resultados foram próximos a média encontrada na literatura para camas de aviário de aproximadamente 15,05 MJ.kg^{-1}

Em resumo, as camas de aviário apresentaram valores de teor de voláteis compatíveis com aqueles encontrados em outras biomassas, o que influência positivamente na etapa de ignição e na permanência da chama de combustão. As proporções de cinzas presentes nos materiais também foram elevadas, no entanto, essas afetam de forma negativa o processo, visto que, causam uma diminuição no teor de carbono fixo e, consequentemente, no poder calorífico superior. Além disso, os dados de poder calorífico obtidos estão próximos a média estabelecida em literatura, no entanto, se apresentaram distantes de valores de poder calorífico de biomassas energéticas usualmente empregadas. As diferenças existentes na composição do resíduo estão relacionadas com diferenças regionais, o número de vezes que a cama foi reaproveitada, tipo de material absorvente e produtos químicos utilizados para higienização (NALEVAIKO *et al.*, 2021; FONT-PALMA, 2012).

4.2 ESTIMATIVA DA COMPOSIÇÃO DO *SYNGAS*

A seguir são apresentados resultados referentes à estimativa da composição do gás de síntese gerado a partir da simulação da gaseificação da cama de aviário de uma unidade de produção de ovos em um matrizeiro. Este resíduo foi escolhido neste

estudo pois é aquele gerado em maior quantidade na unidade objeto de estudo. A composição do gás produzido considerando-se Req de 0,4 e umidade do resíduo de 10,36 % é apresentada na Tabela 11. Tal simulação considerou a operação do reator no modo autotérmico, resultando em uma temperatura de 920 K na condição de equilíbrio.

TABELA 11 – PREDIÇÃO DA COMPOSIÇÃO DO SYNGAS EM BASE SECA

	Amostra	**Agente Oxidante**	**H_2 (%)**	**CO (%)**	**CO_2 (%)**	**N_2 (%)**	**Temperatura de Operação (K)**
Presente estudo	CAO		20,22	15,17	13,95	49,95	920
Reed e Das (1988)	Biomassas lignocelulósicas	Ar	15,2	22,1	10,2	50,8	
Berger (2003) e Marcelino (2017)	-	Ar	9 - 20	10 - 20	10 - 20	40 - 55	
Junqueira (2014)	Cama de aviário	Ar	16,5	54,1	24,1	-	
Priyadarsan *et al.* (2004)	Cama de aviário	Ar	4 - 7	28	3 - 11	-	1210 - 1300

FONTE: A autora (2021)

Quando se utiliza ar como agente oxidante, a composição do gás combustível varia de 9 % a 20 % para H_2, de 10 % a 20 % para CO e CO_2 e de 40 % a 55 % para N_2 (BERGER, 2003; MARCELINO, 2017). Em um estudo englobando diversas biomassas de diferentes tipos de madeira, Reed e Dias (1988) definiram uma composição média para os resíduos, chamada de biomassa típica, onde obtiveram a composição ilustrada na Tabela 11 para o *syngas* produzido, utilizando ar como agente gaseificante e razão de equivalência de 0,42. Dessa forma, foi possível observar que a composição encontrada no presente estudo se apresentou próxima as faixas indicadas em literatura.

Realizando um comparativo entre os resultados obtidos no presente estudo com os apresentados por Junqueira (2014), notou-se que os valores para H_2 foram próximos. No entanto, os dados relacionados ao elemento CO apresentaram-se distantes, sendo que, tal discordância pode ser justificada pelo uso de altas temperaturas, que promovem a formação do composto (RENDEIRO, 2008).

Em uma pesquisa relacionada a gaseificação de cama de aviário, com temperaturas de 1210 K e 1300 K e razão de equivalência de 0,6 e 0,67, Priyadarsan *et al.* (2004) obteve uma composição para o *syngas* que apresenta uma diferença entre os valores do presente estudo e a faixa encontrada para H_2, a qual pode estar

associada com a conversão do hidrogênio em hidrocarbonetos que constituem o alcatrão, diferentemente do que acontece na simulação adotada (BARATA, 2014). E em relação a maior formação do composto CO relaciona-se, como dito anteriormente, com elevadas faixas de temperaturas, como as empregadas pelos autores, que acarretam em uma maior formação do mesmo.

Os resultados relacionados ao poder calorífico superior e inferior, bem como a eficiência a frio (E_f) do reator estão apresentados na Tabela 12.

TABELA 12 – PREDIÇÃO DOS VALORES PARA PODER CALORÍFICO SUPEIOR E INFERIOR E EFICIÊNCIA DO *SYNGAS* JUNTO A DADOS DA LITERATURA

	Amostra	**Agente Oxidante**	**PCS ($MJ.Nm^{-3}$)**	**PCI ($MJ.Nm^{-3}$)**	**E_f (%)**	**Temperatura de Operação (K)**
Presente estudo	CAO	Ar (0,4)	4,7	4,3	79	920
Mckendry (2002)	-	Ar	4 - 6			
Oliveira *et al.* (2018)	Cavacos de madeira	Ar (0,31)	6,81			1573
Zainal *et al.* (2002)	Cavacos de madeira	Ar (0,27)	4,87		70,9	
Cao *et al.* (2006)	Serragem de madeira	Ar	-	1 - 5	39 - 58	1143 - 1163
Castellan *et al*. (1984)	Resíduos de madeira	Ar	6,8		75	1023 - 1223
Lim e Alimuddin (2008)	Cavaco de madeira	Ar (0,23)		4,74	61,32	1006

FONTE: A autora (2021)

A faixa de poder calorífico superior para processos de gaseificação utilizando ar como gaseificante é de 4 – 6 $MJ.Nm^{-3}$, após o processo de limpeza o gás pode ser utilizado de forma direta para geração de energia (MCKENDRY, 2002; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CARVÃO MINERAL, [20--]).

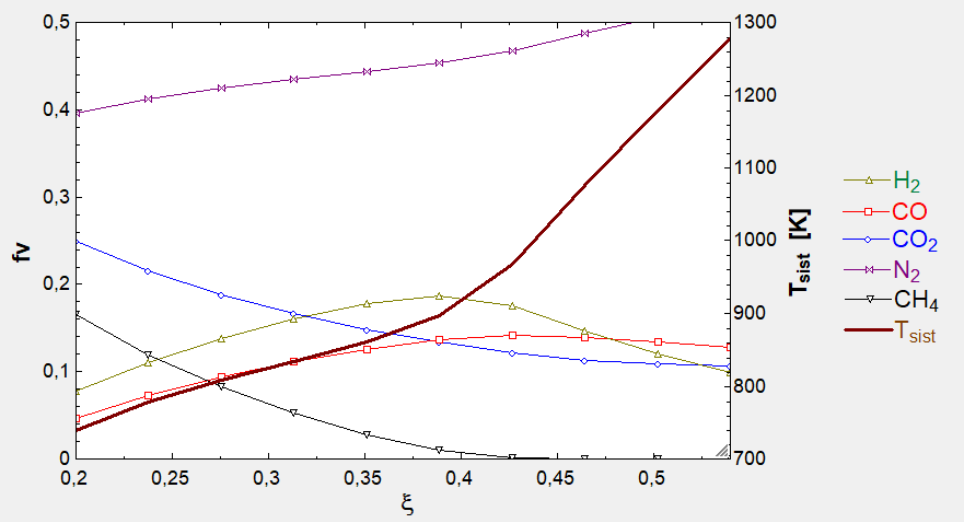
Em um comparativo entre os resultados obtidos para Poder Calorífico Superior e Inferior e Eficiência a Frio com os encontrados na literatura (Tabela 11), foi possível observar que o valor para PCS se apresentou, por vezes, inferior aos indicados em literatura, isso se deve a biomassas lignocelulósicas apresentarem menor quantidade de material inorgânico em sua constituição, resultando assim em um elevado poder calorífico. Por outro lado, o PCI apresentou-se semelhante aos valores reportados em literatura. Já o valor encontrado para eficiência a frio mostrou-

se, em geral, superior aos determinados em estudos da literatura, parâmetro esse que evidencia a eficiência energética do processo de conversão (CASTRO, 2020). Em síntese, a composição do gás, bem como os valores de PCS, PCI e E_f obtidos se apresentaram próximos ou superiores as faixas apontadas em literatura, o que indica um potencial na cama de aviário para geração de energia, por meio da gaseificação.

4.2.1 Análises de sensibilidade do perfil do *syngas* estimado a partir da CAO

No Gráfico 1 é apresentada a composição do gás de síntese estimado (eixo y) e a temperatura do reator (eixo y secundário) em função da razão de equivalência empregada (eixo x). A umidade do resíduo foi mantida igual a 10,36 % para a análise.

GRÁFICO 1 – COMPOSIÇÃO DO *SYNGAS* EM RELAÇÃO A RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA



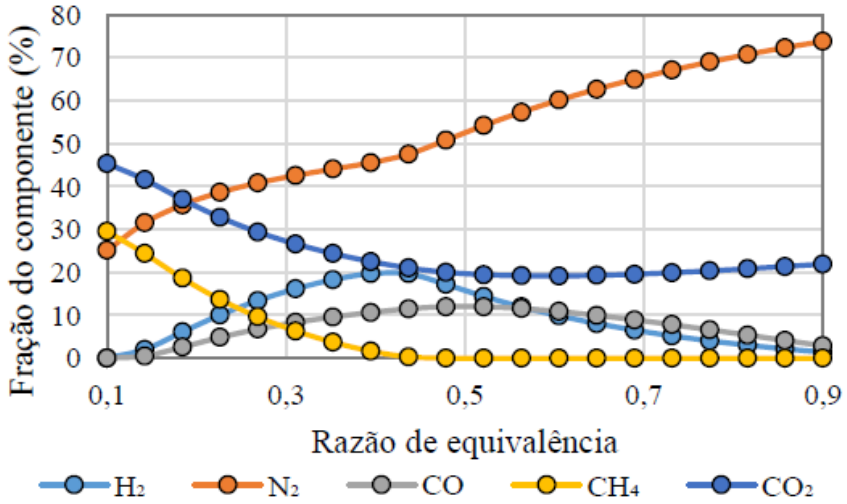
FONTE: A autora (2021).

Como demonstrado no Gráfico 1, em valores mínimos de razão de equivalência o meio não é capaz de manter temperaturas elevadas o bastante para a geração de H_2 e CO. Já em valores muito altos, há uma presença considerável de concentração de oxidante, levando a queima desses compostos combustíveis e, além disso, a redução da presença de CO vinculada a valores de Req maiores de 0,5 refere-se com a transição do processo de gaseificação para combustão, resultando em um aumento de temperatura e do consumo de carbono (RENDEIRO *et al.*, 2008; FUZIKI, 2017). Dessa forma, em valores intermediários aos extremos de 0,2 e 0,54, obtém-se os pontos máximos de conversão desses elementos.

A quantidade de N_2 eleva-se com o aumento da razão, evidenciando a adição de ar ao sistema. A elevação da razão de equivalência (Req) resulta na degradação da qualidade do gás por conta das reações de oxidação, como pode ser observado no Gráfico 1, onde incrementos de Req sucedem em um *syngas* com menor presença de hidrogênio.

Na Figura 13, é apresentado o perfil da composição do *syngas* estimado como função da razão de equivalência para simulações realizadas com biomassa de casca de arroz apresentando teor de umidade de 15 % obtido em um estudo realizado por Fuziki (2017).

FIGURA 13 – COMPORTAMENTO DO *SYNGAS* EM FUNÇÃO DA RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA OBTIDO POR FUZIKI (2017) PARA CASCA DE ARROZ

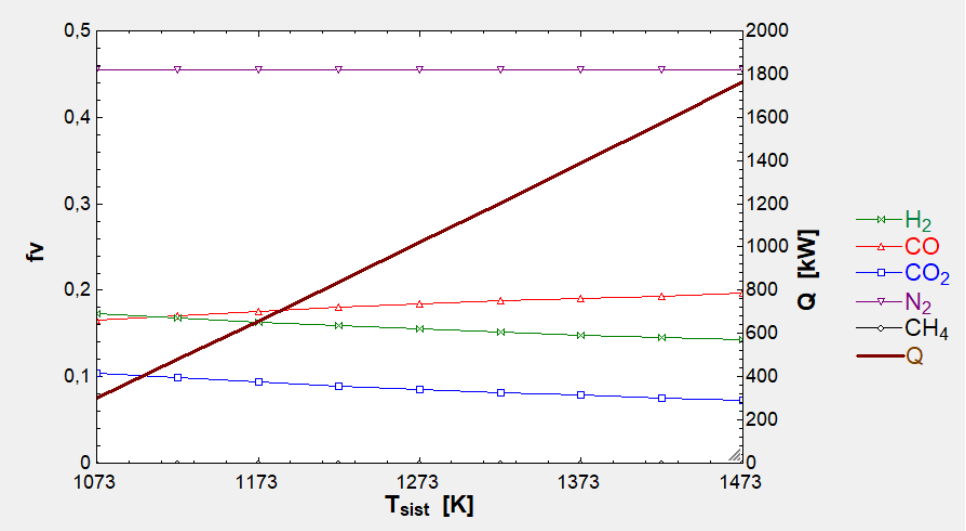


FONTE: Fuziki (2017).

Os resultados obtidos nesse estudo para a composição do gás de síntese em função da razão de equivalência apresentaram a mesma tendência do perfil obtido por Fuziki (2017) (Figura 13).

O Gráfico 2 ilustra, além da composição do gás de síntese, a necessecidade de uma fonte de energia externa para o equilíbrio do sistema em razão da temperatura.

GRÁFICO 2 – INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO DE TEMPERATURA SOBRE O *SYNGAS* ESTIMADO



FONTE: A autora (2021).

O aumento da temperatura levou a uma diminuição das frações de CO_2 e H_2, enquanto, houve um aumento da concentração de CO no gás resultante. Esse perfil ocorre devido a formação de hidrogênio e dióxido de carbono acontecerem pela reação de shift, essa caracterizada como uma reação exotérmica. Nesse sentido, a formação desses componentes é desfavorecida pelo incremento da temperatura (BARATA, 2014).

No sistema alotérmico, o aumento de temperatura leva a uma demanda de fonte externa de calor para que se inicie a degradação do combustível e o processo atinja o equilíbrio químico nas condições impostas, comportamento esse observado no Gráfico 2.

A partir das análises de sensibilidade observou-se a influência dos parâmetros sobre a composição do gás de síntese. Dessa forma, foi possível notar que aumento na razão de equivalência implica em um empobrecimento do *syngas* e, elevações de temperatura afetam as reações exotérmicas envolvidas na gaseificação desfavorecendo assim, a formação de H_2 e CO_2 também resultando em uma maior quantidade de energia térmica em função da entrada de calor externo. Dessa forma, as condições de operação e a composição da matéria-prima interferem nas características de formação do gás de síntese (COLLAZZO, 2013).

4.3 ESTUDO DE CASO DA APLICAÇÃO DO POTENCIAL DO *SYNGAS* ESTIMADO PARA GERAÇÃO TÉRMICA EM UM MATRIZEIRO EM SUBSTITUIÇÃO AO GLP

É apresentado nessa seção os resultados do estudo de caso focado no aproveitamento energético do *syngas* estimado a partir da simulação da gaseificação da CAO gerada em matrizeiros de aves instalado na cidade de Palotina-PR.

Para aquecimento dos núcleos e das camas, vinculados a recria, a unidade utiliza GLP em campânulas. O consumo de GLP por núcleo, sendo 4 núcleos destinados a recria, é de aproximadamente 10.400 $kg.ano^{-1}$, o que representa 133,7 $MWh.ano^{-1}$ de energia térmica empregada para garantir o conforto térmico nos ambientes (Equação 1).

O gás obtido através da simulação do processo de gaseificação do resíduo de CAO com geração de 3.200 $t.ano^{-1}$ na unidade, por sua vez, resulta em uma geração térmica de energia de 7109 $MWh.ano^{-1}$ (Equação 2). Nesse sentido, conclui-se que a partir do *syngas* seria possível substituir 100 % da demanda por GLP e ainda destinar a energia térmica excedente para outras aplicações, como por exemplo, a geração de energia elétrica em motogeradores.

A partir da energia térmica excedente obtida pelo *syngas* e, após processos de tratamento do mesmo, considerando um motor de combustão interna com eficiência global de 25 % e um gerador elétrico com eficiência de 80 %, foi estimada uma geração de 1395 $MWh.ano^{-1}$ em que poderia ser destinada a demanda existente nos matrizeiros.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise imediata das camas de aviário, observou-se elevados teores de cinzas, o que acarretou em um baixo valor de teores de carbono fixo e na diminuição do poder calorífico do material. Por outro lado, os teores de voláteis mostraram-se semelhantes de outras biomassas, implicando positivamente na etapa de ignição e na permanência da chama de combustão.

A composição do gás estimado se apresentou compatível com as faixas indicadas em literatura para gaseificação de biomassa e, quando comparada com estudos utilizando o mesmo tipo de material, a mesma esteve similar a eles. Os resultados encontrados de poder calorífico superior e inferior e eficiência a frio do gás mostraram-se próximos ou superiores aos dados obtidos a partir de biomassas frequentemente utilizadas como matéria-prima na gaseificação.

As análises de sensibilidade mostraram que: elevações na razão de equivalência levam a uma perda de qualidade do *syngas*; temperaturas maiores desfavorecem a formação de H_2 e CO_2 e, além disso, acarretam necessidade de uma fonte externa de calor.

Dessa forma, os estudos mostraram que apesar da composição da cama de aviário ter se apresentado divergente de valores reportados na literatura, em função das suas características, a simulação da conversão da mesma em gás de síntese se mostrou possível. Os dados obtidos para composição e poder calorífico superior do gás estimado estiveram dentro do indicado para aplicação do mesmo para geração de energia, evidenciando assim o potencial energético presente na cama de aviário e tornando sua aplicação no processo de gaseificação um tema para estudos. Além disso, o *syngas* estimado seria capaz de suprir integralmente a demanda térmica da unidade e sua energia excedente poderia ser destinada a outra demanda dos matrizeiros.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros tem-se a realização do processo de gaseificação em bancada para verificação da influência da presença de alcatrão e particulados no *syngas,* além disso, para avaliação da necessidade de tratamentos para utilização do gás de síntese e posterior análise de caracterização do alcatrão e

das cinzas para melhor destinação dos mesmos. Vale ressaltar também a importância da realização da análise de viabilidade econômica para implementação do processo. Outra proposta é a análise da mistura, em diferentes proporções, de ambas as camas de aviário dos matrizeiros a fim de se conhecer o potencial energético.

REFERÊNCIAS

ABCM. **Gaseificação**. 20[--]. ABCM. Disponível em: https://www.carvaomineral.com.br/interna_conteudo.php?i_subarea=16&i_area=2. Acesso em: 23 ago. 2021.

ABPA. **Relatório Anual 2021**. 2021.

ALTAFINI, C. R.; WANDER, P. R.; BARRETO, R. M. Prediction of the working parameters of a wood waste gasifier through an equilibrium model. **Energy Conversion and Management**, v. 44, n. 17, p. 2763–2777, 2003.

ANDRADE, R. V. **Gaseificação de Biomassa: Uma Análise Teórica e Experimental**, 2007. Tese de doutorado, Itajubá: Universidade Federal de Itajubá.

AVILA, V. S. DE; OLIVEIRA, U. DE; FIGUEIREDO, E. A. P. DE; et al. Avaliação de materiais alternativos em substituição à maravalha como cama de aviário. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, n. 2, p. 273–277, fev. 2008.

BARRIQUELLO, D. S. **Análise econômica e ambiental de processo de produção de gás de síntese a partir de biomassa algal**, 2013. Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro-RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro.

BARROS, J. M. N.; BORGES, J. V. Q. S. **Estudo da caracterização de um reator de leito fluidizado borbulhante**, 2017. Projeto de Graduação, Brasília-DF: Universidade de Brasília.

BELGIORNO, V. et al. Energy from gasification of solid wastes. **Waste Management**, Fisciano, v. 23, n. 1, p. 1-15, 12 dez. 2021.

BELUSSO, D.; HESPANHOL, A. N. A evolução da avicultura industrial brasileira e seus efeitos territoriais. **Revista Percurso**, v. 2, n. 1, p. 27, 2010.

BERGER, R. Gasification of biomass to generate renewable hydrogen–conventional and new approaches. , 2003.

BIANCHI, F. M.; AQUINO, T. F. D. Bancada de leito fluidizado circulante a frio: experimentos e análise de dados. **V Congresso Brasileiro de Carvão Mineral**, p. 12, 2017.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Editora Interciência, Rio de Janeiro. 2010.

BRAND, M. A.; MUNIZ, G. I. B. DE. Influência da época de colheita da biomassa florestal sobre sua qualidade para a geração de energia. v. 38, n. 88, p. 619–628, 2010.

BRITO, João Mauro Alves Lima. **Carbonização sustentável para valorização do bambu bambusa tuldoide: produção de carvão ativado e caracterização do bio-óleo recuperado**. 2020. 116 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; SEIXAS, S. Análise da Produção Energética e de Carvão Vegetal de Espécies de Eucalipto. v. 23, p. 53–56, 1983.

BRUMANO, G. Mercado de carbono e os impactos da avicultura ao meio ambiente. **Revista Eletrônica Nutritime**, v. 5, n. 6, p. 722–741, 2008.

CASTELLAN, J. L. **Gaseificação de Madeira em Leito Fluidizado.** In: III Congresso Brasileiro de Energia, 1984, 1984. v. 4. p. 263-272.

CASTRO, V. E. M. **Avaliação de estratégias para a gaseificação de resíduos de biomassa conforme aspectos logísticos e tecnológicos**. 2021. 255 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

CAO, Y.; WANG, Y.; RILEY, J. T.; PAN, W.-P. A novel biomass air gasification process for producing tar-free higher heating value fuel gas. **Fuel Processing Technology**, v. 87, n. 4, p. 343–353, 2006.

CHAVES, A. M. B.; VALE, A. T. DO; MELIDO, R. C. N.; ZOCH, V. P. Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de Eucalyptus spp. v. 9, n. 17, p. 533–543, 2013.

CHAVES, L. I. **Microgeração de energia elétrica com gás de síntese**, 2012. Dissertação de Mestrado, Cascavel - PR: Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

COLLAZZO, G. C. **Gaseificação de carvões nacionais com vapor d'água visando a produção de gás de síntese**, 2013. Tese de doutorado, Florianópolis-SC: Universidade Federal de Santa Catarina.

CORRÊA, J. C.; MIELE, M. A cama de aves e os aspectos agronômicos, ambientais e econômicos. p.28, 2011. Embrapa Suínos e Aves-Capítulo em livro científico (ALICE).

COSTA, A. C. L. A.; EUFRADE JUNIOR, H. DE J.; SPADIM, E. R.; DA SILVA, J. M. S.; GUERRA, S. P. S. Caracterização física, química e mecânica de pellets de bagaço de cana-de-açúcar. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, v. 35, n. 1, p. 38–45, 2020.

COSTA, S.; FERREIRA, M. A saga da avicultura brasileira: Como o Brasil se tornou o maior exportador mundial de carne de frango. **ApexBrasil – Agência Brasileira de Promoção de Exportação e Investimentos**. São Paulo: UBABEF, 2011.

DALPONT, G. **Avaliação tecnológica da viabilidade de gaseificação de carvões brasileiros**, 2017. Dissertação de Mestrado, Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.

DE BONA, E. A. M.; STEINMETZ, R.; SOMER, J. G.; et al. Cama de frango como substrato para a produção de biogás após diferentes períodos de estocagem. , p. 5, 2017.

DION, L.-M.; LEFSRUD, M.; ORSAT, V.; CIMON, C. Biomass Gasification and Syngas Combustion for Greenhouse CO2 Enrichment. **BioResources**, v. 8, n. 2, p. 1520–1538, 2013.

EGUTE, N. DOS S. **Estudo do processo para a aceleração da geração de amônia a partir de resíduos avícolas visando à produção de hidrogênio**, 17. dez. 2010. Mestrado em Tecnologia Nuclear - Materiais, São Paulo: Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-12082011-155529/>. Acesso em: 19/9/2021.

Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural – EPAGRI – SC.

RODIGHERI, J. A. **A evolução no consumo das carnes – destaque para o frango**. Florianópolis, Santa Catarina, 2012.

FIGUEROA, J. E. J. **Processos termoquímicos para processamento de bagaço de cana-de-açúcar: pirólise em leito fixo e gaseificação em leito fluidizado**, 2015. Tese de doutorado, Campinas-SP: Universidade de Campinas.

FILHO, A. DE C. A. Aspectos Tecnológicos das Fontes de Energia Renováveis. , 2009.

FIOREZE, M.; SERANTONI, N.; DE ABREU AZEVEDO, M. Método simplificado de compostagem para tratamento de cama de frango. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica**, v. 13, n. 1, p. 20, 2020.

FONT-PALMA, C. Characterisation, kinetics and modelling of gasification of poultry manure and litter: An overview. **Energy Conversion and Management**, p. 92–98, 2012.

FUZIKI, M. E. K. **Estudo comparativo do gás de energético obtido pela gaseificação de biomassa em reator de leito fluidizado circulante alotérmico e autotérmico utilizando modelo de equilíbrio não-estequiométrico**, 2017. Trabalho de Conclusão de Curso, Ponta Grossa: Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

GALBIATTI, J. A.; CARAMELO, A. D.; SILVA, F. G.; GERARDI, E. A. B.; CHICONATO, D. A. Estudo qualiquantitativo do biogás produzido por substratos em biodigestores tipo batelada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 4, p. 432–437, 2010.

HAHN, L. **Processamento da cama de aviário e suas implicações nos agroecossistemas**, 2004. Dissertação de Mestrado, Florianópolis-SC: Universidade Federal de Santa Catarina.

HANCHATE, N.; RAMANI, S.; MATHPATI, C. S.; DALVI, V. H. Biomass gasification using dual fluidized bed gasification systems: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, p. 123148, 2021.

HORVAT, A.; PANDEY, D. S.; KWAPINSKA, M.; MELLO, B. B.; GÓMEZ-BAREA, A.; FRYDA, L. E.; RABOU, L. P. L. M.; KWAPINSKI, W.; LEAHY, J. J. Tar yield and

composition from poultry litter gasification in a fluidized bed reactor: effects of equivalence ratio, temperature and limestone addition. **Rsc Advances**, v. 23, n. 9, p. 13283-13296, 10 dez. 2021.

JUNQUEIRA, K. G. **Produção de gás de síntese a partir da cama de frango coletado no Distrito Federal por meio de gaseificação**, 2014. Monografia, Brasília-DF: Universidade de Brasília.

KATSAROS, G.; PANDEY, D. S.; HORVAT, A.; TASSOU, S. Low temperatura gasification of poultry litter in lab-scale fluidized reactor. **Energy Procedia**, Uxbridge, v. 161, n. 1, p. 57-65, 10 dez. 2021.

KLAUTAU, J. V. P. **Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo cocorrente para secagem de grãos**. 2008. Dissertação de mestrado, Curitiba: Universidade Federal do Paraná.

LARKIN, S., RAMAGE, J., SCURLOCK, J. **Bioenergy**. BOYLE, G. (ed.), Renewable Energy:

Power for a Sustainable Future, 2ª ed., capítulo 4, New York, USA, Oxford University Press. 2004.

LI, X.; GRACE, J. R.; WATKINSON, A. P.; LIM, C. J.; ERGUÈDENLER, A. Equilibrium modeling of gasification: a free energy minimization approach and its application to a circulating fuidized bed coal gasifier. , p. 13, 2001.

LIM, M. T.; ALIMUDDIN, Z. Bubbling fluidized bed biomass gasification—Performance, process findings and energy analysis. **Renewable Energy**, v. 33, n. 10, p. 2339–2343, 2008.

LIMA, A. A.; SILVA, D. P.; PEREIRA, I. Prospecção de tecnologias de gaseificação de biomassa. IX Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe. p. 12, 2017.

LOPES, J. C. O. **Avicultura**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Floriano -PI, 2011.

LORA, E. E. S.; ANDRADE, R. V.; ÁNGEL, J. D. M.; et al. Gaseificação e pirólise para a conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis. **LORA, EE S.; VENTURINI, OJ (Coords.). Biocombustíveis. Rio de Janeiro: Interciência**, v. 1, p. 411–493, 2012.

MAGALHÃES, M. A. D. **Desenvolvimento de um processo de gaseificação de biomassas para produção de gás combustível e de síntese**, 2020. Tese de doutorado, Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa.

MARAFON, A. C.; SANTIAGO, A. D.; AMARAL, A. F. C.; BIERHALS, A. N.; PAIVA, H. L. Uso da Biomassa para a Geração de Energia. 2016. Embrapa.

MARCELINO, M. M. **Biomassa residual do coco para obtenção de energia e intermediários químicos via gaseificação: caracterização, modelagem e simulação**, 2017. Dissertação de Pós Graduação, Salvador: Universidade Federal da Bahia.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, v. 83, n. 1, p. 37–46, 2002.

MENDIBURU, A. Z.; CARVALHO, J. A.; CORONADO, C. J. R. Thermochemical equilibrium modeling of biomass downdraft gasifier: Stoichiometric models. **Energy**, v. 66, p. 189–201, 2014.

MESQUITA, G. B. D.; MENEZES, J. V. **Gaseificação de biomassa fecal humana: análise do processo via aspen plustm e estudo do gás de síntese como combustível em um motor de combustão interna**, 2017. Projeto de Graduação, Vitória-ES: Universidade Federal do Espírito Santo.

MME, M. D. M. E. E. Plano Nacional de Energia 2030. 2007.

MOLINO, A.; CHIANESE, S.; MUSMARRA, D. Biomass gasification technology: The state of the art overview. **Journal of Energy Chemistry**, v. 25, n. 1, p. 10–25, 2016.

NALEVAIKO, J. Z.; CREMONEZ, P. A.; TELEKEN, J. G. Utilização de subprodutos de subprodutos agroindustriais na produção de briquetes. **Revista Brasileira de Engenharia de Biossistemas**, v. 15, n. 1, p. 1–26, 2021.

NASCIMENTO, R.; PRESTES, E. B. DE C.; RIBEIRO, R. B.; et al. **Análise da composição do syngas e comportamento térmico da gaseificação de carvão mineral de candiota**, 2017. Projeto de Iniciação Científica, Campus Santana do Livramento: Universidade Federal do Pampa.

NÁSNER, A. M. L. **Modelagem de uma planta piloto de gaseificação de combustível derivado de resíduos (cdr) em um sistema integrado a motor ciclo otto, utilizando o software aspen plus™**. 2015.

NEITZKE, G. **Geração elétrica distribuída a partir da gaseificação de peletes de cama de aviário**, 2010. Dissertação de Mestrado, Brasília-DF: Universidade de Brasília.

OLIVEIRA, A. E. DE; SANTOS, J. B. O. Simulação de gaseificação de biomassa de tamareira para produção de gás de síntese. **Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica - Cobeq IC 2015**, p. 1–7, 2015.

OLIVEIRA, A. G. P. **Predição do desempenho de gaseificadores de biomassa utilizando equilíbrio químico**. 2007. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Área Térmica e Fluídos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007

OLIVEIRA, J. L. DE; SILVA, J. N. DA; MARTINS, M. A.; PEREIRA, E. G.; OLIVEIRA, M. DA C. T. B. E. **Gasification of waste from coffee and eucalyptus production as an alternative source of bioenergy in Brazil.** v. 27, p. 159–166, 2018.

ORTOLANI, E. L.; BRITO, L. A. B. **Enfermidades causadas pelo uso inadequado da" cama de frango" na alimentação de ruminantes**. Revista CFMV, Brasília, v. 7, n. 22, p. 41-48, 2001.

PAULA JUNIOR, S. E. M. DE. **Avaliação das alternativas de disposição final do resíduo da produção de frango de corte: cama de frango**, 2014. Projeto de Graduação, Rio de Janeiro-RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro.

PEREIRA, M. E.; NAKASHIMA, G. T.; HANSTED, A. L. S.; et al. Caracterização da biomassa de cama de frango para fabricação de biochar. **Revista Virtual de Química**, v. 11, n. 4, 2019.

PERSZEL, A. **Avaliação da cama de aviário como substrato para digestão anaeróbica**, 2018. Trabalho de Conclusão de Curso, Francisco Beltrão - PR: Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

PIGHINELLI, A. L. M. T.; NAKAI, D. K.; SCHULTZ, E. L.; DAMASO, M. C. T.; GAMBETTA, R. Processos termoquímicos aplicados à biomassa florestal. , 2018. Embrapa Agroenergia.

PRIYADARSAN, S.; ANNAMALAI, K.; SWEETEN, J. M.; MUKHTAR, S.; HOLTZAPPLE, M. T. Fixed-Bed gaification of feedlot manure and poultry litter biomass. , v. 45, p. 1689–1696, 2004.

PROTÁSIO, T. D. P.; TRUGILHO, P. F.; DE SIQUEIRA, H. F.; et al. Caracterização energética de pellets in natura e torrificados produzidos com madeira residual de Pinus. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 435, 2015.

PUIG-ARNAVAT, M.; BRUNO, J. C.; CORONAS, A. Review and analysis of biomass gasification models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, p. 2841–2851, 2010.

QUITETE, C. P. B.; SOUZA, M. M. V. M. Remoção do alcatrão de correntes de gaseificação de biomassa: processos e catalisadores. **Química Nova**, v. 37, n. 4, p. 689–698, 2014.

RAMANAN, M. V.; LAKSHMANAN, E.; SETHUMADHAVAN, R.; RENGANARAYANAN, S. Modeling and Experimental Validation of Cashew Nut Shell Char Gasification Adopting Chemical Equilibrium Approach. **Energy & Fuels**, v. 22, n. 3, p. 2070–2078, 2008.

RAUCH, R.; HRBEK, J.; HOFBAUER, H. Biomass gasification for synthesis gas production and applications of the syngas. **Advances in Bioenergy: The Sustainability Challenge**, v. 3, n. August 2014, p. 73–91, 2015. John Wiley & Sons.

REED, T. B.; DAS, A. **Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems**. Golden, Colorado: A Division of Midwest Research Institute, 1988.

RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. F. M.; BRASIL, A. C. DE M.; et al. **Combustão e gasificação de biomassa sólida**. 1a edição ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

ROCHA, Q. DE N. **Gestão de energia de resíduos de biomassa: otimização da distribuição geográfica das unidades industriais de geração de energia**, 2011. Projeto de Graduação, Brasília-DF: Universidade de Brasília.

RODRIGUES, R. Modelagem cinética e de equilíbrio combinadas para simulação de processos de gaseificação. p. 134, 2015.

SÁNCHEZ, C. G. **Estudo da volatilização e gaseificação de biomassa em leito fluidizado**, 1994. Tese de doutorado, Campinas-SP: Universidade Estadual de Campinas.

SANTANA, H. E. P.; SANTANA, T. L. C.; LIMA, R. M. DE A.; et al. Caracterização e avaliação do talo de girassol e sabugo de milho para produção de gás de síntese. **Recursos Naturais: Energia de Biomassa Florestal**. 1º ed, p.35–48, 2012. Editora Científica Digital. Disponível em: <http://www.editoracientifica.org/articles/code/201202666>. Acesso em: 19/9/2021.

SANTOS, I. DA S. **Reator de gaseificação de biomassa em fluxo contracorrente**, 2003. Dissertação de Mestrado, Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa.

SANTOS, T. M. B.; LUCAS JUNIOR, J. DE. Balanço energético em galpão de frangos de corte. **Energia na Agricultura**, v. 24, n. 1, p. 25–36, 2004.

SANTOS FILHO, J. I.; MIELE, M.; MARTINS, F. M.; TALAMINI, D. J. D. **Árvore do conhecimento: Frango de Corte.** 20[--]. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/frango_de_corte/arvore/CONT000fy1j9mko02wx5ok0pvo4k3z9kscuy.html. Acesso em: 10 set. 2021.

SÁNCHES, G. G. **Tecnologia da gaseificação de biomassa**. Campinas, SP. Editora Átomo, 2010.

SCHIRMER, W. N.; FERREIRA, I. T. M.; RIBEIRO, C. B.; et al. Caracterização de biomassa residual de fábrica de papel-cartão para aproveitamento energético. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 10, n. 4, p. 1113, 2017.

SILVA, K. M. DA; BAPTISTA, M. B.; NITTA, S. T. Estudo do processo de geração de gás de síntese a partir da gaseificação de biomassa. **CONNECTION LINE - REVISTA ELETRÔNICA DO UNIVAG**, v. 0, n. 17, 2017. Disponível em: <http://www.periodicos.univag.com.br/index.php/CONNECTIONLINE/article/view/379>. Acesso em: 10/9/2021.

SILVA, T. H. L.; TSCHOEKE, I. C. P.; BEZERRA, I. DE S. Caracterização e estimativa de produção de biogás a partir da biodigestão anaeróbia de cama de codorna e frango. p. 5, 2017.

SILVA, V. S.; RECH, D. V.; COLDEBELLA, A.; BOSETTI, N.; DE AVILA, V. S. **Efeito de tratamentos sobre a carga bacteriana de cama de aviário reutilizada em frangos de corte**. Embrapa Suínos e Aves-Comunicado Técnico (INFOTECA-E), 2007.

SILVA, V. S.; VOSS, D.; COLDEBELLA, A.; BOSETTI, N.; DE AVILA, V. S. Efeito de tratamentos sobre a carga bacteriana de cama de aviário reutilizada em frangos de corte. , 2007.

STEFFLER, V. **Produção de briquetes a partir de coprodutos agroindustriais: Bagaço de cana de açúcar, cama de aviário e resíduo de amidonaria**, 2019. Dissertação de Mestrado, Palotina: Universidade Federal do Paraná.

TAVARES, R. F. A. M. **Hibridização de energia heliotérmica com gaseificação de biomassa para a geração de energia elétrica**, 2016. Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro-RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro.

TEIXEIRA, E. S. M.; TEIXEIRA, M. J. Importância da carne de frango brasileira no mercado mundial da carne. **XII Fateclog**: GESTÃO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS NO AGRONEGÓCIO: DESAFIOS E OPORTUNIDADES NO CONTEXTO ATUAL, Mogi das Cruzes, p. 1-12, 10 nov. 2021.

ULIANO, J. D. C. **Caracterização ambiental de aviários de corte em Serranópolis do Iguaçu - PR**, 2011. Trabalho de Conclusão de Curso, Medianeira: Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

VIANA, N. A. **Aproveitamento energético de biomassas residuais florestais do cerrado para produção de gás de síntese por meio do processo de gaseificação**, 10. jul. 2015. Master, Brasília: Universidade de Brasília. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/19498>. Acesso em: 20/9/2021.

WATANABE, G. E. **O desenvolvimento da avicultura no brasil e as tendências para os próximos anos**, 2016. Trabalho de Conclusão de Curso, Curitiba-PR: Universidade Federal do Paraná.

WENDER, I. Reactions of synthesis gas. **Fuel Processing Technology**, v. 48, n. 3, p. 189–297, 1996.

WHITELY, N.; OZAO, R.; ARTIAGA, R.; CAO, Y.; PAN, W. Multi-utilization of Chicken Litter as Biomass Source. Part I. Combustion. **Energy & Fuels**, Kentuchy, v. 20, n. 6, p. 2660-2665, 07 dez. 2006.

ZAINAL, Z. A.; RIFAU, A.; QUADIR, G. A.; SEETHARAMU, K. N. Experimental investigation of a downdraft biomass gasiÿer. **Biomass and Bioenergy**, p. 7, 2002.

ZANATTA, F. L. **Desenvolvimento e avaliação de um gaseificador de biomassa e estudo do potencial de produção de biogás com resíduos agrícolas e da avicultura**, 2011. Tese de doutorado, Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa.

1 APÊNDICE 1

1.1 VALIDAÇÃO DA MODELAGEM MATEMÁTICA DE EQUILIBRIO QUÍMICO DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO REPRODUZIDO

Em um estudo realizado por Li *et al.,* (2004), denominado *"Biomass gasification in a circulating fluidized bed",* os autores desenvolveram uma modelagem matemática, a qual simula o processo de gaseificação a partir da minimização da energia livre de Gibbs. A aplicação desse modelo possibilita a obtenção das frações volumétricas de cada componente do gás de síntese, ou seja, do hidrogênio, do monóxido de carbono, do dióxido de carbono, do metano e entre outros.

A equação 3 rege a modelagem de equilíbrio químico e, para obtê-la, é necessário realizar: o balanço de massa de cada elemento k do sistema (carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre); utilizar multiplicadores de Lagrange (λ_k) para formar uma função Lagrangiana para cada um dos elementos envolvidos; somar à função G^t que corresponde a energia livre de Gibbs; derivar a função, tendo em vista que minimização da energia livre de Gibbs corresponde composição dos elementos no equilíbrio; e levar em conta a definição do potencial químico.

$$\frac{\Delta G_{fi}^{\circ}}{RT} + \ln\left(\frac{n_i}{\sum_i n_i}\right) + \frac{1}{RT}\sum_k \lambda_k \times a_{ik} = 0 \qquad (3)$$

Onde:

- ΔG_{fi}° representa a variação da energia livre de Gibbs de formação da espécie *i*;
- n_i é o total de mols da espécie i;
- a_{ik} relaciona-se ao número de átomos do elemento k na espécie i;
- i é um espécie no sistema;
- k é um elemento no sistema;
- R é constante ideal dos gases;
- T é a temperatura do sistema.

A modelagem realizada no presente estudo utilizou como base a proposta por Li *et al.,* (2004), considerando somente a entrada de ar seco como gaseificante. O procedimento foi realizado com o auxílio do software *Engineering Equation Solver* –

EES, o qual possui a capacidade de resolução de diversos modelos de equações, e, além disso, fornece uma vasta quantidade de dados termodinâmicos e propriedades físico-químicas de elementos e compostos. Para o desenvolvimento da simulação foi necessário inserir os dados da análise elementar e vazão mássica do combustível, e, também, pressão e razão de equivalência ar/combustível do sistema (Req).

A fim de validar a modelagem matemática de equilíbrio químico do processo de gaseificação reproduzida e implementada no EES, conforme as descrições no estudo de Li *et al.* (2004), foi realizada uma análise comparativa dos resultados obtidos por ela com parâmetros de entrada reportados em literatura ilustrados na Tabela 13.

TABELA 13 – PARÂMETROS DE ENTRADA NA SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO PARA RESÍDUOS DE CICUTA E CAMA DE AVIÁRIO.

Parâmetros	**Li *et al.*, (2004)**	**Demin *et al.*, (2020)**
Amostra	Cicuta	Cama de aviário
T_{sist} (K)	1088	1273
Pressão (bar)	1	1
Teor de Umidade (%)	10	25
Razão de Equivalência	0,52	0,3

FONTE: A autora (2021)

Dessa forma, adotou-se os dados de entrada apresentados por Li *et al.,* (2004) e por Demin *et al*., (2020) (Tabela 13) e verificou-se à similaridade entre os resultados, (Tabela 14).

TABELA 14 – COMPARATIVO ENTRE A SIMULAÇÃO REPLICADA UTILIZANDO PARÃMETROS DE ENTRADA REPORTADOS PELOS AUTORES Li *et al.,* (2004) E Denim *et al.* (2020) E SEUS RESULTADOS

	Li *et al.*, (2004)	**Presente estudo**	**Denim *et al.*, (2020)**	**Presente estudo**
H_2	3	11,84	21,94	22,05
CO	9,6	13,72	23,19	20,79
CO_2	17,1	11,59	-	-
N_2	68,4	53,03	37,95	36,39

FONTE: A autora (2021)

Diante da comparação realizada com os resultados de Li *et al,* (2004), foi possível observar um desvio entre os resultados para o componente H_2. Isso se deve, aos dados encontrados por Li *et al.* advirem de um procedimento experimental, ou seja, nesse caso, o carbono que não é convertido para a forma gasosa se transforma também em cinzas e alcatrão. Em razão da constituição do alcatrão ser

hidrocarbonetos há uma retenção de hidrogênio proveniente do combustível (BARATA, 2014). Já a diferença existente entre o valor simulado para a fração de nitrogênio em relação ao obtido experimentalmente, está relacionada, sobretudo, com a variação da quantidade estimada dos demais compostos. Portanto, uma produção elevada de hidrogênio, como a obtida pela simulação, resulta na redução da participação do nitrogênio na composição do gás (FUZIKI, 2017).

A simulação do presente estudo, quando comparada com a realizada por Denim *et al.,* (2020), utilizado também o método de equilíbrio químico, obteve valores bem próximos aos encontrados pelos autores (Tabela 15).

Diante dos comparativos apresentados, a modelagem replicada de equilíbrio químico, visando a minimização da energia livre de Gibbs, mostrou-se adequada visto que a maioria dos valores obtidos foram próximos aos da literatura e, além disso, aqueles que apresentaram desvios estavam dentro do esperado devido as considerações para implementação do modelo. Dessa forma, a simulação torna-se um meio acessível para conhecimento do comportamento e potencial energético de combustíveis para o processo de gaseificação.