

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

MATEUS ALVES DE MAGALHÃES

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSAS
PARA PRODUÇÃO DE GÁS COMBUSTÍVEL E DE SÍNTESE**

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2020**

MATEUS ALVES DE MAGALHÃES

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSAS
PARA PRODUÇÃO DE GÁS COMBUSTÍVEL E DE SÍNTESE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientadora: Angélica de Cássia Oliveira
Carneiro

Coorientador: Benedito Rocha Vital

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2020**

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

T

M188d
2020
Magalhães, Mateus Alves de, 1991-
Desenvolvimento de um processo de gaseificação de
biomassas para produção de gás combustível e de síntese /
Mateus Alves de Magalhães. – Viçosa, MG, 2020.
105 f. : il. ; 29 cm.

Orientador: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Pellets. 2. Catalisadores. 3. Simulação. I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal.
Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDD 22 ed. 634.98673

MATEUS ALVES DE MAGALHÃES

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSAS
PARA PRODUÇÃO DE GÁS COMBUSTÍVEL E DE SÍNTESE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 17 de fevereiro de 2020.

Assentimento:



Mateus Alves de Magalhães
Autor



Angélica de Cássia Oliveira Carneiro
Orientadora

AGRADECIMENTOS

A Deus, por iluminar meu caminho.

Aos meus pais, José e Maria; aos meus irmãos, Donizete, Elenice, Elizete e Marcos; aos meus cunhados, Vasconcelos, Pedro, Iolanda e Paula; aos meus sobrinhos, Lucas, Daniel, Davi, Felipe, Caio, Esther e Julia por todo carinho e incentivo nos estudos.

À minha namorada Patrícia, por todo amor, compreensão e apoio.

Aos meus amigos e familiares pelo apoio.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Engenharia Florestal e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, pela oportunidade de cursar o doutorado e por tudo que foi proporcionado.

À Capes, pela concessão da bolsa de doutorado.

À Professora Angélica de Cassia Oliveira Carneiro pela amizade, ensinamentos, oportunidades e pela confiança durante todos esses anos.

Aos Professores Benedito Rocha Vital, Márcio Arêdes Martins, Márcio José da Silva e Paulo Fernando Trugilho pela orientação, amizade e contribuições.

À Pós Doutoranda Maira Reis de Assis, pela realização da análise termogravimétrica.

Ao Doutor Jaime-Daniel Bustos Vanegas pela simulação da barreira física.

Ao funcionário Eder Cabral de Sousa, por se dedicar à construção, instalação e manutenção do reator e por toda ajuda nesse trabalho.

Ao secretário Francisco Ricardo Bizerra, pela disponibilidade e ajuda durante a realização do experimento.

À Professora Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho pela realização de análises.

Aos amigos e funcionários do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira que contribuíram de alguma forma para o sucesso deste trabalho. Especialmente aos funcionários Fernanda, Lawrence, Edna e Bráulio que auxiliaram nas análises.

À Osvane Faria pelo auxílio no uso e manutenção do analisador de gases.

Ao eletricitista “Tião” que auxiliou na construção do controlador de nível de biomassa e ao funcionário “Joaquim” da ferraria pela ajuda na construção do sistema de retirada de carvão do reator.

À empresa Plantar e a Wellington Almeida, Nestor Claret e Charliston Costa pelo fornecimento do minério de ferro. A empresa Pelletbraz pelo fornecimento dos pellets.

Ao Laboratório de Celulose e Papel por ceder as instalações para produção de cavacos e pelas doações de cavacos. Especialmente aos funcionários Bittencourt e “Carlinhos”.

RESUMO

MAGALHÃES, Mateus Alves de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020. **Desenvolvimento de um processo de gaseificação de biomassas para produção de gás combustível e de síntese.** Orientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Coorientador: Benedito Rocha Vital.

A gaseificação consiste na conversão da biomassa em gás visando seu uso como biocombustíveis e para manufatura de produtos químicos diversos. A biomassa vegetal como matéria prima garante viabilidade e sustentabilidade para o processo. Ainda que uma técnica antiga, a gaseificação possui vários desafios para aumento da eficiência e qualidade do gás produzido. Nesse contexto, o presente trabalho foi estruturado em três capítulos, o primeiro teve como objetivos abordar os aspectos técnicos da gaseificação, a qualidade e a disponibilidade das biomassas agrícolas e florestais, além da viabilidade, oportunidades e desafios desta técnica para produção de gás no Brasil. No segundo foi avaliado o desempenho operacional de um reator de leito fixo e fluxo concorrente na gaseificação de diferentes biomassas, especificamente pela qualificação e quantificação do gás produzido, além do balanço de massa e energia do reator. Uma vez identificadas alternativas para otimização da conversão de biomassas em gás, o terceiro capítulo teve como objetivo melhorar o desempenho do reator por meio da simulação e instalação de barreira física na zona de redução e pelo uso de catalisadores a base minério de ferro e óxido de níquel. A gaseificação, apesar de mais complexa em relação aos demais processos de conversão da biomassa, pode popularizar-se no Brasil devido a possibilidade de geração de energia distribuída, fornecimento de múltiplos produtos e agregação de valor a biomassa e seus coprodutos. No entanto precisa superar barreiras como o baixo conhecimento da técnica, atraso tecnológico e a falta de incentivos governamentais. A diversidade de biomassas deve ser considerada para escolha da tecnologia de gaseificação, além de afetar o rendimento e qualidade do gás produzido. Os catalisadores, principalmente os a base de níquel, tem papel fundamental na produção de gás com qualidade superior destinado a transformação em produtos químicos, destacando aqueles com baixo custo e capacidade de catálise do gás bruto de biomassa.

Palavras-chave: Pellets. Simulação. Catalisadores. Torrefação.

ABSTRACT

MAGALHÃES, Mateus Alves de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2020. **Development of gasification process of biomass for production of fuel gas and syngas.** Adviser: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Co-adviser: Benedito Rocha Vital.

Gasification consists of biomass conversion into gas for use as biofuels and manufacture of chemical products. Vegetable biomass as a raw material ensures viability and sustainability for the process. Although an old technique, gasification has several challenges to increase the efficiency and quality of the gas produced. In this context, the present work was structured in three chapters, the first aimed at discussing the technical aspects of gasification, the quality and availability of agricultural and forest biomasses, in addition to the feasibility, opportunities and challenges of this technique for gas production in Brazil. In the second, was evaluated the operational performance of a fixed bed and concurrent flow reactor in gasification of different biomasses, specifically by qualifying and quantifying the gas produced and to the mass and energy balance. Once alternatives were identified to optimize the conversion of biomass into gas, the third chapter aimed to improve the reactor's performance by simulating and installing a physical barrier in the reduction zone and by using iron ore and nickel oxide catalysts. Gasification, although more complex than other biomass conversion processes, can become popular in Brazil due to the possibility of distributed energy generation, supply of multiple products and adding value to biomass and its co-products. However, barriers such as low technical knowledge, technological backwardness and lack of government incentives need to be overcome. The diversity of biomasses must be considered when choosing the gasification technology, in addition to affecting the yield and quality of the gas produced. The catalysts, especially those based on nickel, have a fundamental role in the production of gas with superior quality destined for transformation into chemical products, highlighting those with low cost and capacity for catalysis of crude biomass gas.

Keywords: Pellets. Simulation. Catalysts. Torrefaction.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	9
CAPÍTULO I - VALORAÇÃO DA BIOMASSA AGRÍCOLA E FLORESTAL PELA GASEIFICAÇÃO NO BRASIL: VIABILIDADE, OPORTUNIDADES E DESAFIOS .	10
1 INTRODUÇÃO	11
2 GASEIFICAÇÃO	12
2.1 Tipos de gaseificadores	13
2.1.1 Gaseificadores de leito fixo	13
2.1.2 Gaseificadores de leito fluidizado	14
2.2 Agente de gaseificação	15
2.3 Razão de ar	16
2.4 Temperatura e Pressão	17
2.5 Qualidade do gás	17
2.6 Catalisadores	19
2.7 Aplicações do gás	20
2.8 Projetos comerciais de gaseificação	21
3 BIOMASSA AGRÍCOLA E FLORESTAL	23
3.1 Oferta de biomassa	23
3.2 Qualidade da biomassa para gaseificação	25
3.2.1 Propriedades físicas	25
3.2.2 Propriedades químicas	27
3.3 Pré-tratamentos da biomassa	27
4 POSSÍVEIS TÉCNICAS PARA DESENVOLVIMENTO DA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA NO BRASIL	28
5 OPORTUNIDADES E DESAFIOS PARA GASEIFICAÇÃO NO BRASIL	31
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
REFERÊNCIAS	33
CAPÍTULO II - GASEIFICAÇÃO DE DIFERENTES BIOMASSAS EM REATOR DE LEITO FIXO CONCORRENTE	39
1 INTRODUÇÃO	40
2 OBJETIVOS	41
2.1 Geral	41

2.2 Específicos	41
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	41
3.1 Caracterização das biomassas	41
3.2 Gaseificador de leito fixo e fluxo concorrente.....	42
3.3 Gaseificação das biomassas	45
3.3.1 Descrição da operação do gaseificador	45
3.3.2 Composição e poder calorífico inferior do gás	45
3.3.3 Balanço de massa e energia.....	46
3.3.4 Eficiências do reator.....	51
3.3.5 Razão de ar	51
3.3.6 Perfil de temperaturas.....	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1 Caracterização das biomassas	52
4.2 Perfil de temperaturas do reator.....	56
4.3 Composição do gás	60
4.4 Balanço de massa e energia do sistema	63
5 CONCLUSÕES	67
REFERÊNCIAS	67
CAPÍTULO III - OTIMIZAÇÃO DE GASEIFICADOR DOWNDRAFT E USO DE CATALISADORES PARA PRODUÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE	71
1 INTRODUÇÃO.....	72
2 OBJETIVOS.....	74
2.1 Geral.....	74
2.2 Específicos	74
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	74
3.1 Biomassa utilizada	74
3.2 Gaseificador downdraft.....	75
3.3 Barreira física na zona de redução	76
3.3.1 Modelagem e simulação	76
3.3.2 Confeção da barreira física	79
3.4 Uso de catalisadores.....	80
3.4.1 Produção dos catalisadores.....	80
3.4.2 Reator de reforma para catálise dos gases.....	81

3.4.3 Montagem dos catalisadores e condições experimentais	82
3.5 Parâmetros operacionais do reator e propriedades do gás produzido	83
3.5.1 Composição e poder calorífico inferior do gás	83
3.5.2 Balanço de massa e energia.....	85
3.5.3 Eficiência do reator	88
3.5.4 Razão de ar	88
3.5.5 Perfil de temperaturas.....	89
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	89
4.1 Barreira física na zona de redução	89
4.2 Uso de catalisadores.....	93
4.2.1 Aspecto visual dos catalisadores	93
4.2.2 Composição e poder calorífico inferior do gás	95
4.2.3 Balanço de massa e energia.....	99
5 CONCLUSÕES	101
REFERÊNCIAS	101
CONCLUSÕES GERAIS	105

INTRODUÇÃO GERAL

A busca por fontes renováveis de energia é uma necessidade mundial frente ao crescimento populacional e suas consequências. Cada vez mais a biomassa vegetal vem sendo valorizada devido ao seu caráter renovável. Sua utilização como combustível de alto valor energético não é tão dominada como os derivados do petróleo, pois demanda alto grau de processamento e modificações para obtenção de biocombustíveis competitivos.

Na gaseificação, a adição controlada de calor sobre a biomassa permite quebrar sua estrutura química e converter os componentes em gases como hidrogênio, metano, monóxido e dióxido de carbono. Os gases produzidos podem ser utilizados na geração direta de energia térmica ou transformados em biocombustíveis e múltiplos produtos químicos.

Para transformação em produtos químicos é necessário que o gás contenha relação mínima entre hidrogênio e monóxido de carbono de 2:1, o que nem sempre é obtido em reatores mais simples operando em condições normais. O aumento da relação entre esses dois gases é possível quando empregados catalisadores que favorecem reações de interesse, podendo atuar sobre o gás durante ou após sua produção.

Certamente, o maior desafio para gaseificação de biomassa é minimizar a produção de alcatrão. Sua presença nos gás em grandes quantidades inviabiliza o uso em motores e turbinas, causa corrosão e incrustações em tubulações, além de dificultar a utilização de catalisadores durante a conversão em produtos químicos.

O Brasil é carente de tecnologias modernas de gaseificação de alto rendimento e com capacidade de produção de gás com qualidade satisfatória. Entretanto, sua grande produção de biomassa vegetal pode atrair investimentos para essa técnica de conversão em combustíveis e produtos químicos diversos. Pesquisas que possam identificar as oportunidades, bem como desenvolver tecnologias de gaseificação e afins são adequadas para nortear projetos nesse setor. Portanto, a tese foi estruturada em três capítulos, conforme descritos a seguir.

Capítulo I: Valoração da biomassa agrícola e florestal pela gaseificação no Brasil: viabilidade, oportunidades e desafios.

Capítulo II: Gaseificação de diferentes biomassas em reator de leito fixo concorrente.

Capítulo III: Otimização de gaseificador downdraft e uso de catalisadores para produção de gás de síntese.

CAPÍTULO I

VALORAÇÃO DA BIOMASSA AGRÍCOLA E FLORESTAL PELA GASEIFICAÇÃO NO BRASIL: VIABILIDADE, OPORTUNIDADES E DESAFIOS

Resumo - A biomassa vegetal é largamente empregada na conversão em energia térmica, no entanto, por meio de processos pouco tecnológicos que em sua maioria baseiam na combustão direta. A gaseificação é uma rota promissora por gerar gás visando seu uso para produção de energia térmica e elétrica, biocombustíveis líquidos, hidrogênio e biometano. É uma técnica de conversão termoquímica, que compreende a secagem, pirólise, combustão e redução no mesmo reator. O controle das variáveis do processo permite obter gás rico em hidrogênio e monóxido de carbono, que pode ser utilizado diretamente como substituto do diesel e gasolina em motores de combustão interna. Neste contexto, essa pesquisa teve como objetivos abordar os aspectos técnicos da gaseificação, a qualidade e a disponibilidade das biomassas agrícolas e florestais, além da viabilidade, oportunidades e desafios desta técnica para produção de gás combustível e gás de síntese no Brasil. O gás de biomassa é uma fonte renovável de energia que pode suprir a demanda energética em sítios, fazendas, agroindústrias e regiões isoladas, visto que sua produção pode ocorrer de forma descentralizada. Estima-se que em 2018 tenham sido gerados aproximadamente 43 milhões de toneladas de coprodutos de origem florestal e 831 milhões de toneladas de coprodutos de origem agrícola. O aproveitamento da biomassa residual maximiza o uso da terra e da água, gera empregos, reduz passivos ambientais e o consumo de combustíveis fósseis. Existem tecnologias variadas de gaseificação, tecnicamente e economicamente viáveis, para projetos de pequena escala e também para grandes empreendimentos de geração de energia. A gaseificação de biomassa no Brasil é viável, no entanto, é necessário considerar alguns requisitos como a disponibilidade da tecnologia de gaseificação compatível com a demanda do produto. Estudos prévios da qualidade e disponibilidade local de biomassa, bem como a necessidade de pré-tratamentos da biomassa para favorecer a produção de gás e o conhecimento dos diversos custos envolvidos no processo.

Palavras-chave: Gaseificadores; Biocombustíveis; Biomassa vegetal.

1 INTRODUÇÃO

O consumo crescente de combustíveis fósseis, decorrente do aumento da população mundial, é o principal responsável pela poluição ambiental (BALAT et al., 2009a), tendo como consequência o aumento das emissões de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono, metano e óxido nitroso (SAMIRAN et al., 2016). O uso da biomassa de origem vegetal é alternativa viável para a busca da sustentabilidade energética, pois além de seu baixo custo, é uma fonte de carbono neutro, onde o carbono liberado para atmosfera é novamente convertido em biomassa no ciclo de produção posterior (ZHANG et al., 2010; PANWAR et al., 2012; UD DIN; ZAINAL, 2016).

O Brasil se destaca mundialmente pelo uso de fontes renováveis de energia. Em 2018 somaram 45,3% do total de sua matriz energética, enquanto no ano de 2016 o mundo utilizou apenas 13,7% dessas fontes. A energia proveniente da biomassa representou 72,2% do total das renováveis, destacando o bagaço de cana de açúcar, a lenha, o carvão vegetal e o licor negro das indústrias de celulose. A demanda energética brasileira em 2018 foi de $2,97 \times 10^6$ GWh, da qual 12,6% foi suprida por fontes hidráulicas (EPE, 2019.). A disponibilidade das fontes hidráulicas vem se reduzindo ao longo do tempo devido à limitação de uso dos rios, além da dependência do regime de chuvas.

Nesse contexto, o uso da biomassa proveniente de culturas energéticas ou de coprodutos florestais e agrícolas, é importante alternativa para garantir a segurança energética do Brasil e manter ou até aumentar a participação das fontes renováveis. O Brasil, em 2019, colheu aproximadamente 78 milhões de hectares de culturas agrícolas (IBGE, 2019) e possuía 7,83 milhões de hectares de culturas florestais (IBÁ, 2019), evidenciando o potencial do agronegócio brasileiro. Nestes setores são gerados enormes quantidades de coprodutos de biomassa na colheita, beneficiamento e manufatura dos produtos finais, os quais podem ser prontamente utilizados na conversão em combustíveis líquidos, sólidos ou gasosos, por meio de processos termoquímicos, bioquímicos, entre outros.

A conversão termoquímica é mais utilizada para produção de energia, por meio da pirólise, tendo como produtos o bio-óleo, gás e carvão; pela gaseificação para produção de gás ou pela combustão direta para geração de calor (BALAT et al., 2009a; ZHANG et al., 2010; AHMAD et al., 2016).

Dentre as formas de conversão termoquímica, a gaseificação é a mais versátil, pois o gás pode ser armazenado ou transportado, utilizado em motores de combustão interna ou turbinas, empregado na produção de substâncias químicas ou combustíveis líquidos, o que

torna a gaseificação um processo diferenciado entre os demais para conversão térmica da biomassa (WANG et al., 2008; BALAT et al., 2009b; AHMAD et al., 2016). A gaseificação é importante alternativa para utilização da biomassa vegetal e destinação correta dos coprodutos de biomassa, podendo suprir as necessidades energéticas de sítios, fazendas, granjas, agroindústrias e áreas isoladas (PEREIRA et al., 2012).

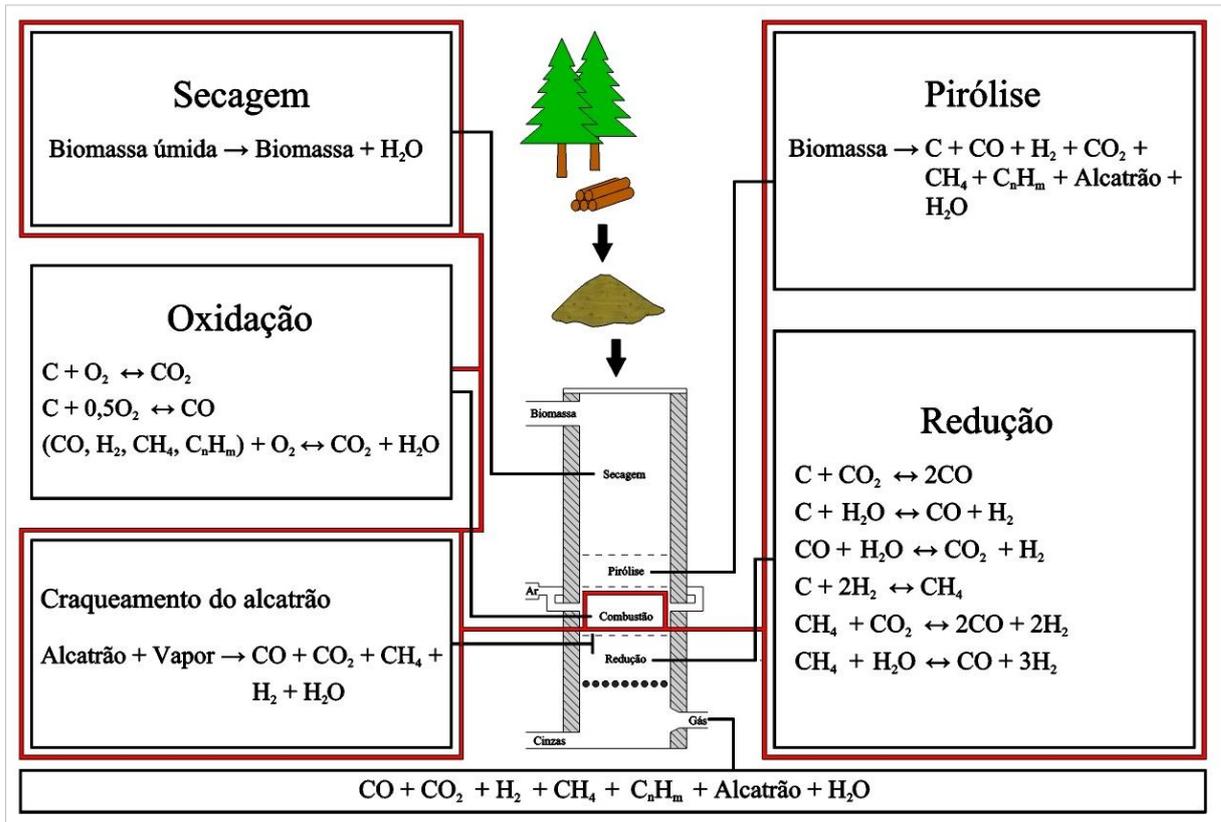
Visando o uso e expansão da gaseificação no Brasil, essa revisão de literatura foi elaborada contemplando aspectos técnicos do processo, disponibilidade de biomassa vegetal e seus coprodutos, características adequadas e pré-tratamentos que melhoram a qualidade da biomassa para produção de gás, além de abordar os principais desafios e oportunidades de conversão da biomassa em gás, no Brasil.

2 GASEIFICAÇÃO

A gaseificação é a conversão termoquímica da biomassa em gás por meio da oxidação parcial em temperaturas próximas a 1000°C. O gás é composto por hidrogênio (H₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), hidrocarbonetos, alcatrão e vapor de água (WANG et al., 2008; AHMAD et al., 2016; MOLINO et al., 2016). O rendimento do processo, a composição do gás e a presença de impurezas e alcatrão varia em função da biomassa e da tecnologia de gaseificação utilizada (PEREIRA et al., 2012; SAMIRAN et al., 2016). O processo apresenta alta eficiência, podendo ser transferida até 95% da energia da biomassa *in natura* para o gás produzido (RUIZ et al., 2013).

A gaseificação, realizada em reatores denominados de gaseificadores, consiste em quatro etapas principais. A oxidação de parte da biomassa em condições controladas de oxigênio, a única etapa exotérmica, a qual fornece calor para as demais etapas endotérmicas. A secagem para remoção da umidade da biomassa. A pirólise onde ocorre a decomposição térmica da biomassa em um produto sólido, o carvão com alto teor de carbono; numa fração líquida de composição complexa, contendo alcatrão; e em gases não condensáveis. A etapa de redução, na qual ocorre a gaseificação propriamente dita, que forma gás, Figura 1 (MOLINO et al., 2016).

Figura 1 - Principais etapas e reações da gaseificação



Fonte: Adaptado de Molino et al. (2016).

2.1 Tipos de gaseificadores

2.1.1 Gaseificadores de leito fixo

Os gaseificadores de leito fixo utilizam o sistema de grelha fixa que suporta a carga em seu interior, ocorrendo o movimento vertical descendente da biomassa em função da ocorrência das reações e consequente consumo de material. São classificados de acordo com o fluxo dos gases em relação ao da biomassa, podendo ser do tipo concorrente, contracorrente e fluxo cruzado (SANSANIWAL et al., 2017).

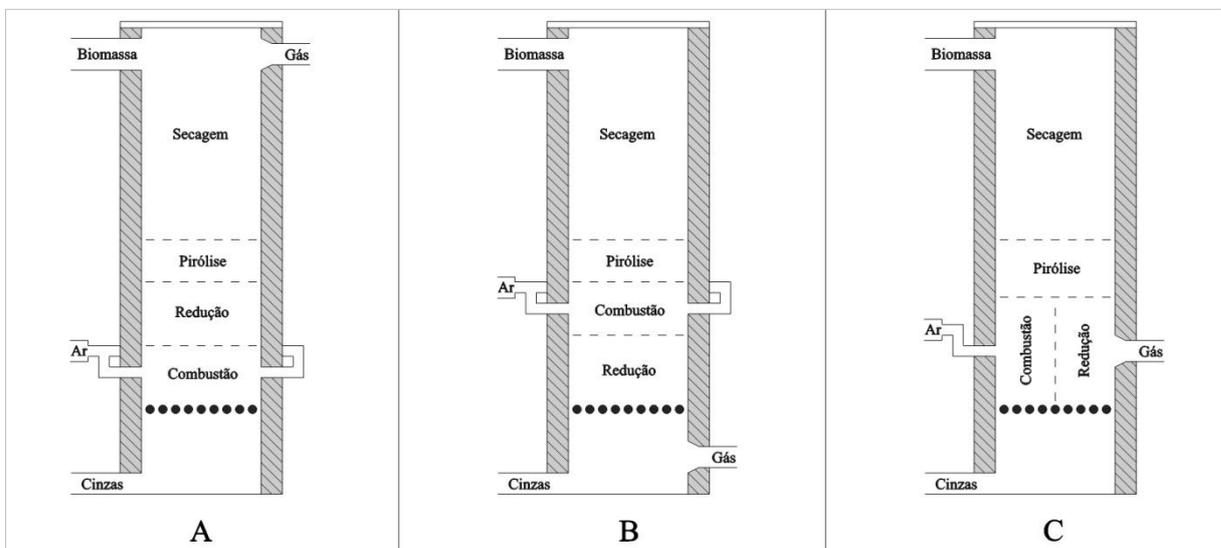
Nos gaseificadores de fluxo contracorrente, também denominados como *updraft*, o agente de gaseificação é injetado na porção inferior, os gases produzidos no processo percolam pela carga em sentido contrário ao movimento da biomassa, sendo retirados na parte superior do gaseificador, Figura 2A (PATRA; SHETH, 2015; AHMAD et al., 2016). O gás produzido neste tipo de gaseificador contém alto teor de alcatrão devido à passagem pela zona de pirólise, visto que não há temperatura suficiente para a degradação do alcatrão nesta zona do reator (MOLINO et al., 2016). A utilização se restringe à combustão para produção de

calor (SAMIRAN et al., 2016) ou se empregado na conversão de produtos químicos ou combustíveis líquidos, o gás necessita de complexa limpeza para remoção do alcatrão.

Em gaseificadores de fluxo concorrente, também denominados como *downdraft*, tanto o agente de gaseificação quanto a biomassa são inseridos na parte superior, de modo que os gases produzidos movimentam-se na mesma direção da carga e são retirados na parte inferior do reator, Figura 2B (PATRA; SHETH, 2015; AHMAD et al., 2016). O gás contém baixos teores de alcatrão (MOLINO et al., 2016) devido ao seu craqueamento em zona de alta temperatura (VALDERRAMA RIOS et al., 2018), permitindo o uso em motores de combustão interna.

Em gaseificadores de fluxo cruzado, também denominados de *cross flow*, a biomassa é alimentada por cima, enquanto o agente de gaseificação é injetado pela parede lateral e os gases formados são retirados pelo lado oposto, Figura 2C (PATRA; SHETH, 2015). O gás apresenta características intermediárias entre os do tipo concorrente e contracorrente.

Figura 2 - Gaseificadores de leito fixo do tipo contracorrente (A), concorrente (B) e fluxo cruzado (C)



Fonte: Adaptado de Sansaniwal et al. (2017).

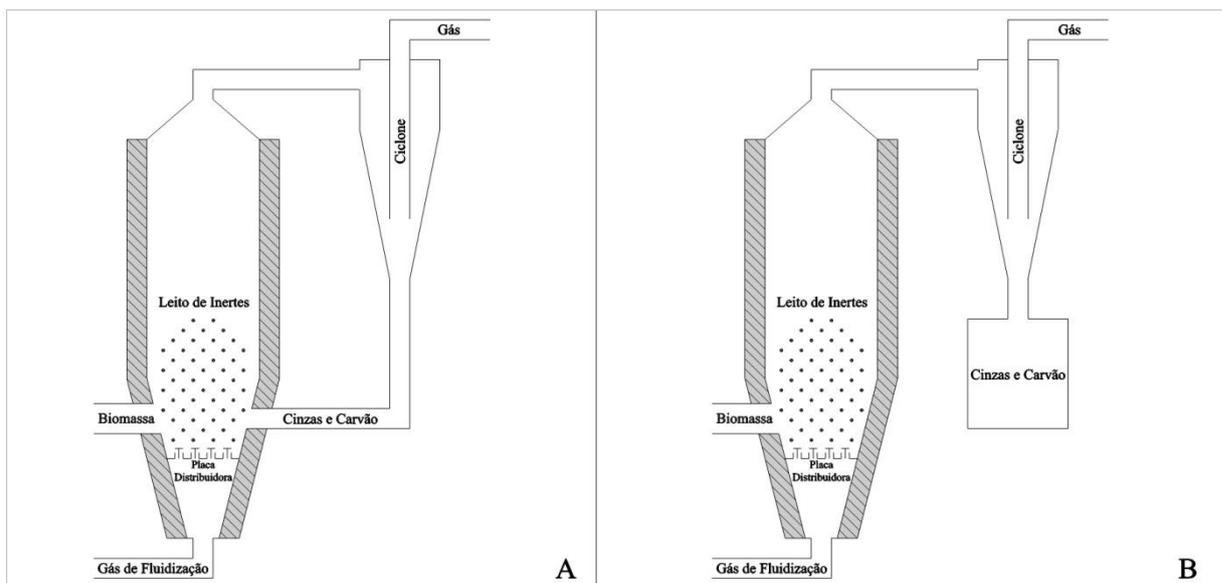
2.1.2 Gaseificadores de leito fluidizado

Os gaseificadores de leito fluidizado possuem alta taxa de transferência de calor e geralmente são empregados em instalações maiores por serem mais complexos e permitirem maior produção de energia (RUIZ et al., 2013; SANSANIWAL et al., 2017). O gás produzido possui concentração média de alcatrão (MOLINO et al., 2016). Os principais tipos de

gaseificadores de leito fluidizado são os de leito circulante e borbulhante (SANSANIWAL et al., 2017), podem ainda ser do tipo atmosférico ou pressurizado.

Os gaseificadores de leito fluidizado possuem uma placa distribuidora de gás de fluidização que suporta o leito de inertes, sobre a qual a biomassa é alimentada, sendo arrastada no sentido vertical. A biomassa deve estar na forma de pequenas partículas (RUIZ et al., 2013) e quando em contato com o leito aquecido, rapidamente é transformada em gases que são retirados na parte superior e encaminhados ao ciclone para separação de eventuais sobras de carvão, cinzas e inertes. Nos gaseificadores de leito fluidizado do tipo circulante essas sobras são encaminhadas ao reator onde participam novamente das reações de gaseificação. Nos do tipo borbulhante não se aplica tal etapa, Figura 3 (PATRA; SHETH, 2015; SAMIRAN et al., 2016).

Figura 3 - Gaseificadores de leito fluidizado do tipo circulante (A) e borbulhante (B)



Fonte: Adaptado de Sansaniwal et al. (2017).

2.2 Agente de gaseificação

O agente de gaseificação é fundamental para o processo, pois afeta a composição e poder calorífico do gás. Os mais utilizados são o ar atmosférico, oxigênio, vapor de água, monóxido de carbono ou ainda uma mistura desses (WANG et al., 2008).

O ar atmosférico é o principal agente de gaseificação por apresentar menor custo e gerar o gás com quantidade média de alcatrão (SANSANIWAL et al., 2017). Contudo o gás

produzido apresenta baixo poder calorífico em relação aos demais agentes, pois fica diluído no nitrogênio presente em sua composição.

O oxigênio tem custo elevado, sendo empregado em gaseificadores mais modernos e de alta produtividade, o gás possui maior poder calorífico em relação ao com ar atmosférico, contendo maiores quantidades de H_2 , CO e CH_4 (RUIZ et al., 2013; SANSANIWAL et al., 2017).

O vapor é utilizado combinado ao oxigênio ou ar atmosférico em gaseificadores com aquecimento direto ou único em gaseificadores que utilizam fonte de calor externa. O gás gerado contém maior concentração de hidrogênio, conseqüentemente alto poder calorífico (WANG et al., 2008; SANSANIWAL et al., 2017). O dióxido de carbono quando utilizado produz gás com alto poder calorífico, sendo composto principalmente por H_2 e CO (SANSANIWAL et al., 2017). Devido aos custos, o vapor e o dióxido de carbono são empregados em equipamentos mais sofisticados para obter alto rendimento e qualidade do gás produzido

2.3 Razão de ar

A razão de ar é expressa pela relação entre a quantidade de ar consumida na gaseificação da biomassa e a quantidade teórica de ar demandada para sua combustão completa (RUIZ et al., 2013; GUO et al., 2014).

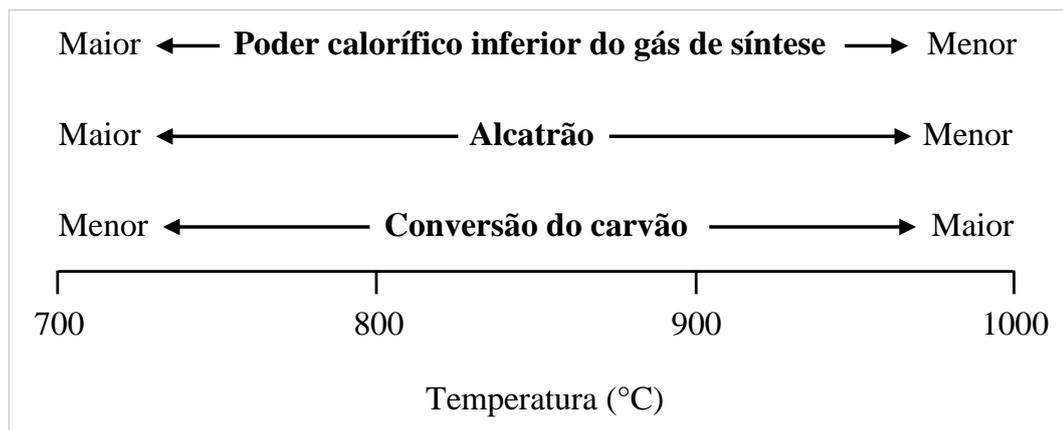
A razão de ar influencia a velocidade das reações, assim como a qualidade e quantidade de gases produzidos, sendo desejáveis valores entre 0,2 e 0,4 para gaseificação de biomassa (PEREIRA et al., 2012). O incremento excessivo da razão de ar favorece as reações de oxidação, aumentando a concentração de dióxido de carbono e reduzindo a produção de gases combustíveis (LAN et al., 2018). A baixa razão de ar reduz a temperatura do reator e a velocidade das reações e, conseqüentemente, a qualidade do gás produzido (AHMAD et al., 2016).

Zainal et al. (2002) observaram que, em função do incremento da razão de ar de 0,27 para 0,43 em gaseificador do tipo *downdraft*, há uma tendência de aumento com posterior redução dos teores de CO e CH_4 , com tendência inversa para o CO_2 , e apenas aumento do conteúdo de hidrogênio no gás. Os autores obtiveram máximo poder calorífico de 5,34 MJ/Nm^3 para a razão de ar de 0,38.

2.4 Temperatura e Pressão

As temperaturas de gaseificação são próximas a 1000 °C, sendo influenciadas pela razão de ar e pela reatividade da biomassa, a qual é definida pela sua granulometria e composição química (ERLICH; FRANSSON, 2011). A variação da temperatura tem efeito no rendimento dos produtos da gaseificação (MOLINO et al., 2016), bem como na qualidade do gás, Figura 4. Maiores temperaturas favorecem as reações de oxidação que contribuem para conversão do carvão e craqueamento do alcatrão, além de favorecer a produção de hidrogênio (AHMAD et al., 2016). No entanto, temperaturas elevadas podem ocasionar a fusão de cinzas e metais, levando à formação de depósitos e incrustações ou à corrosão das paredes do reator e tubulações (RUIZ et al., 2013).

Figura 4 - Influência da temperatura na zona de redução sobre as características do gás



Fonte: Adaptado de Molino et al. (2016).

A maioria dos sistemas de gaseificação utiliza ar a pressão atmosférica, nos quais não há pressão significativa. Sistemas pressurizados são utilizados em gaseificadores de leito fluidizado e aplicados em projetos de grande escala, neste caso, apesar do maior custo, tem maior eficiência de gaseificação (RUIZ et al., 2013).

2.5 Qualidade do gás

A composição e o poder calorífico do gás dependem da tecnologia de gaseificação, bem como do tipo e qualidade da biomassa utilizada, ou pelo uso de diferentes agentes de gaseificação, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de referência para a composição e poder calorífico inferior do gás obtido de diferentes biomassas

Biomassa	Tipo de Gaseificador	Agente de Gaseificação	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂	PCI	Referência
			%			MJ/Nm ³		
Cavacos de madeira	leito fixo - concorrente	ar	13,5	23,8	2,6	13,5	5,8	OLGUN et al. (2011)
Carvão vegetal	leito com jato de ar (<i>spouted bed reactor</i>)	ar	11,6	19,8	0,9	12,4	4,5	ABDUL SALAM e BHATTACHARYA (2006)
Pellets	leito fixo - concorrente	ar	11,9	25,7	2,6	9,9	5,8	ERLICH e FRANSSON (2011)
Cavacos de Eucalipto	leito fixo - concorrente	ar	15,9	16,8	1,8	14,1	4,6	GALINDO et al. (2014)
Pellets	leito fixo - contracorrente	ar	17,1	20,5	3,9	15	6,0	
Black Pellets ⁽¹⁾	leito fixo - contracorrente	ar	11,6	31,9	4,7	9,5	7,3	GUNARATHNE et al. (2014)
Pellets	leito fixo - contracorrente	vapor	25,5	24,6	6,1	23,8	8,2	
Black Pellets	leito fixo - contracorrente	vapor	21,0	49,3	5	13,2	10,6	
Pellets de Casca de arroz	Controle	leito fluidizado	4,1	19,9	2,9	14,5	14,2	MANATURA et al. (2017)
	Torrificados 250°C	leito fluidizado	9,26	22,9	7,2	11,8	16,2	
	Torrificados 350°C	leito fluidizado	11,3	25,1	4,4	7,4	18,7	

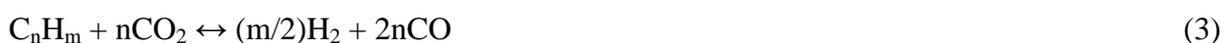
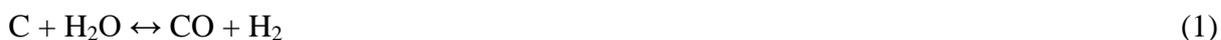
H₂ = hidrogênio; CO = monóxido de carbono; CH₄ = metano; CO₂ = dióxido de carbono; PCI = poder calorífico inferior; ¹ Biomassa submetida a pré-tratamento térmico com vapor em alta pressão para facilitar a peletização, também chamado de *steam explosion*.

O alcatrão é uma mistura complexa de compostos orgânicos gerados durante a oxidação térmica parcial da biomassa. Especificamente, o alcatrão é composto principalmente por hidrocarbonetos aromáticos mono, bi e policíclicos, além de componentes oxigenados. A composição e formação do alcatrão depende de fatores com tipo de reator, temperatura, pressão, razão de ar, tempo de residência, umidade e composição da biomassa. Pode ser facilmente detectado no gás após o resfriamento e quando presente em grandes quantidades pode limitar sua utilização, principalmente, em motores de combustão e turbinas. A remoção do alcatrão do gás é realizada por meio de lavadores de gases, filtros e equipamentos para reforma. No entanto, é mais interessante a utilização de técnicas que reduzam a produção do alcatrão durante a gaseificação, seja pelo controle das variáveis do processo, modificações nos reatores ou pelo uso de catalisadores (PEREIRA et al., 2012; MOLINO et al., 2016; REN et al., 2019).

2.6 Catalisadores

Catalisadores para gaseificação de biomassa devem ter como principais características a efetividade na remoção do alcatrão, a conversão do metano por meio de reações de reforma, melhorar a relação H₂/CO para uso como gás de síntese, apresentar boa resistência em altas temperaturas, suportarem longo período sem desativar e quando isso ocorrer, possuir fácil regeneração e finalmente, devem ser acessíveis e ter baixo custo (SUTTON et al., 2001).

Os catalisadores, geralmente, atuam favorecendo a reação de gaseificação gás-água de *shift* (1) e na conversão do alcatrão pela reforma com vapor (2) e pela reforma a seco (3). Em todos os casos há o aumento da concentração de CO e H₂ no gás produzido em detrimento a redução do alcatrão (VALDERRAMA RIOS et al., 2018).



Os catalisadores podem ser divididos em primários, quando são incorporados à biomassa e participam das reações no próprio reator ou secundários quando são utilizados após o reator. O catalisador é formado pelo componente ativo, por um suporte físico que auxilia sua dispersão no meio e, de forma opcional, por um promotor (VALDERRAMA RIOS et al., 2018).

O componente ativo realiza a catálise propriamente dita. Os mais comuns são os metais de transição como Ni, Rh, Ru, Pd, Pt, Co e Fe, metais alcalinos (Li, Na e K), minerais como a dolomita (Ca,Mg(CO₃)₂) e olivina ((Mg,Fe)₂SiO₄), as zeolitas (alumino-silicatos de estrutura porosa) e o carvão ativado como adsorvente (GUAN et al., 2016).

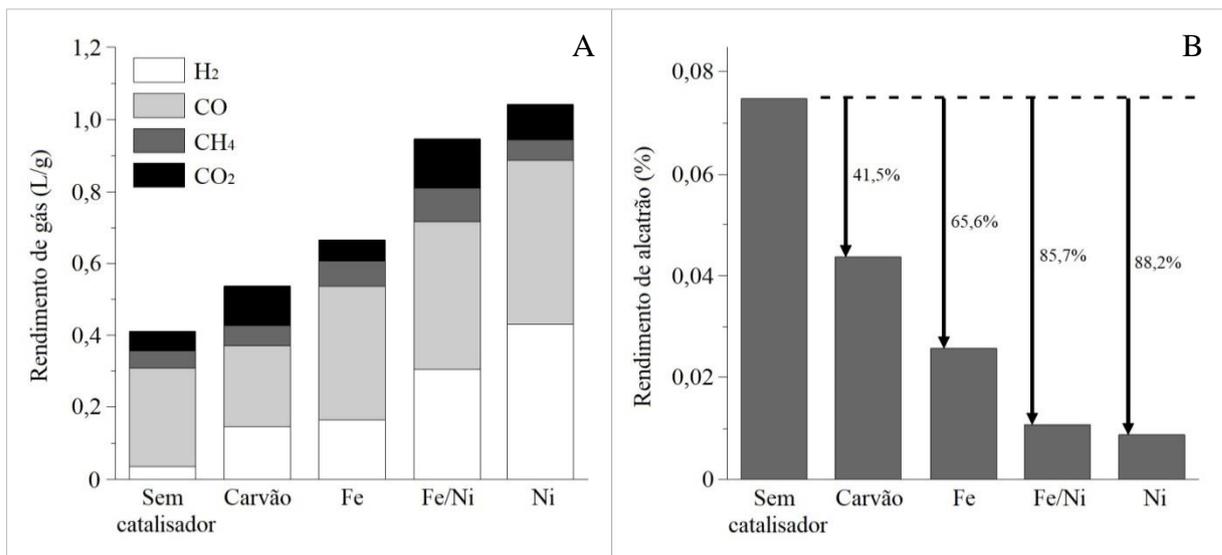
Os catalisadores são suportados por materiais resistentes a altas temperaturas, próximas a 800 °C, e comumente são utilizados o Al₂O₃, o SiO₂, o MgO, o CaO, dolomita, dentre outros (YUNG et al., 2009). Sendo os de natureza básica mais eficazes na inibição da deposição de carbono sobre o catalisador (CHAN; TANKSALE, 2014).

Os catalisadores a base de Ni são comprovadamente mais efetivos na redução de alcatrão e aumento do teor de hidrogênio no gás (DE DIEGO et al., 2016), porém a sua grande desvantagem é a rápida desativação pela deposição de carbono na superfície (GALVITA et al., 2015). Essa desvantagem é contornada pelo uso de catalisadores secundários (CHAN; TANKSALE, 2014).

Outra forma de reduzir o efeito da desativação do catalisador a base de Ni é o uso de um componente chamado promotor, com função de aumentar a reatividade e estabilidade do componente ativo, o promotor regenera o catalisador pela redução da deposição de carbono ou pela conversão do carbono em gás (CHAN; TANKSALE, 2014). Os promotores com atividade efetiva são os metais de transição (Fe, Co, Mn, Cu, etc), metais nobres (Pt, Pd, Rh, Ru, Ir, Au, etc), óxidos de terras raras (La_2O_3 , CeO_2 , Pr_6O_{11} , Sm_2O_3 , etc) e metais alcalinos terrosos (Mg, Ca, Sr e Ba). Muitos destes são também catalisadores, tendo assim o efeito de co-catálise quando combinados ao componente ativo (ZHANG et al., 2018).

Xie et al. (2018) estudaram catalisadores a base de ferro e níquel suportados por nano fibras de carbono e encontram resultados positivos para o conteúdo de hidrogênio e monóxido de carbono, além de menor percentual de alcatrão no gás, Figura 5.

Figura 5 - Efeito de catalisadores a base de ferro (Fe) e níquel (Ni) sobre o rendimento em gás (A) e na redução da formação de alcatrão (B)



Fonte: Adaptado de Xie et al. (2018). H₂ = hidrogênio; CO = monóxido de carbono; CH₄ = metano; CO₂ = dióxido de carbono.

2.7 Aplicações do gás

A forma mais simples de utilização do gás é na combustão direta em queimadores de gases para geração de energia térmica. Tecnologias recentes de combustão utilizam em conjunto com outros combustíveis de interesse no chamado *co-firing*, compensando o seu baixo poder calorífico em relação aos combustíveis fósseis (MOLINO et al., 2016).

Outra opção para utilização do gás é na cogeração, onde o uso combinado em processos de geração de calor e energia elétrica aumenta a eficiência de conversão (WANG et al., 2008; MOLINO et al., 2016). A geração de energia elétrica a partir do gás pode integrar diversas tecnologias, como a gaseificação combinada com turbinas a gás, a vapor ou ambas (ZANG et al., 2018) e motores de combustão interna, ambos acoplados a geradores (PEREIRA et al., 2012). Nesse contexto, a geração distribuída de energia elétrica em pequena escala, via gaseificação, é uma alternativa para suprir a demanda em áreas isoladas como em sítios, fazendas, granjas e agroindústrias (FERREIRA et al., 2018).

O biometano e o hidrogênio podem ser produzidos a partir do gás pelo uso de catalisadores específicos em determinadas temperaturas. O biometano possui qualidade compatível para utilização em sistemas de queima a gás natural e o hidrogênio pode ser utilizado em células de combustível (MOLINO et al., 2016). Para a produção de hidrogênio é possível aumentar sua concentração no gás pela utilização de vapor ou pelo processo SCWG (supercritical water gasification) (PEREIRA et al., 2012).

A produção de combustíveis líquidos a partir do gás é rota promissora na qual, por meio de reações químicas ou pela fermentação, obtém combustível mais puro, de maior poder calorífico e com potencial para utilização em motores de combustão interna.

Uma das formas de conversão do gás em combustíveis líquidos é por meio da reação de *Fischer-Tropsch*, onde o hidrogênio e o monóxido de carbono são convertidos, na presença de catalisadores, em hidrocarbonetos líquidos (WANG et al., 2008). A grande limitação dessa técnica é a dependência da relação H_2/CO de 2:1 ou superior, o que dificilmente é encontrado no gás produzido a partir de biomassa, que possui proporção de 1:1 ou inferior (MOLINO et al., 2016).

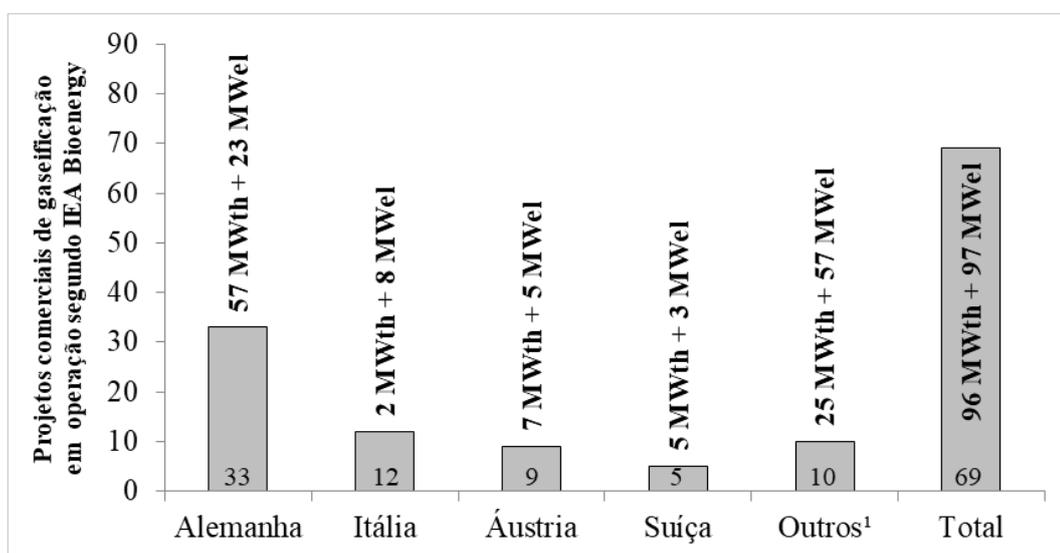
A fermentação do gás, realizada por bactérias acetogênicas, é empregada para produção de etanol, onde os microrganismos utilizam o CO e H_2 , além de parte do CO_2 (PARDO-PLANAS et al., 2017). Os autores destacam que essa técnica pode ser mais eficiente que os métodos tradicionais de produção de etanol celulósico por hidrólise enzimática por utilizar todas as frações da biomassa. Porém algumas etapas do processo e os altos custos são fatores limitantes.

2.8 Projetos comerciais de gaseificação

Segundo dados da Agência Internacional de Energia, mostrados na Figura 6, a gaseificação em escala comercial é utilizada, principalmente, para geração combinada de

calor e eletricidade em países europeus, destacando a Alemanha, Itália e Áustria com o maior número de empreendimentos, totalizando 78,2%. Observa-se ainda que, para o total dos projetos comerciais de gaseificação, a geração de energia térmica equivale à geração elétrica. A gaseificação para produção de combustíveis líquidos é empregada em poucos projetos em escala comercial, em maior número são plantas piloto (HRBEK, 2016; IEA BIOENERGY, 2018), em função da complexidade do processo e do alto custo de equipamentos e reagentes.

Figura 6 - Principais projetos comerciais de gaseificação, considerando a geração combinada de calor e eletricidade



Fonte: Adaptado IEA Bioenergy (2018). 1 Finlândia (3), Dinamarca (2), Japão (2), Inglaterra (2) e Irlanda (1).

A maioria dos projetos de gaseificação para geração combinada de calor e eletricidade são de pequeno porte, totalizando 51,5% dos empreendimentos, gerando em média 0,18 MW térmico e 0,12 MW elétrico. A principal fonte de biomassa utilizada são cavacos de madeira e os reatores predominantes são do tipo *downdraft* e leito fluidizado (IEA BIOENERGY, 2018).

Atualmente no Brasil a gaseificação é voltada para pesquisas, além de alguns projetos em escala piloto para geração de energia elétrica. A Universidade Federal de Itajubá é pioneira nos estudos e vem desenvolvendo trabalhos desde 2007 com foco na produção de gás combustível e de síntese. A gaseificação comercial não se desenvolveu Brasil devido a diversidade de outras fontes energéticas mais baratas e consolidadas, além da falta de incentivos governamentais.

3 BIOMASSA AGRÍCOLA E FLORESTAL

3.1 Oferta de biomassa

A biomassa vegetal provém de plantios florestais ou agrícolas e de resíduos gerados durante a produção e colheita no campo, no processamento na indústria e rejeitos do meio urbano. Os resíduos citados serão tratados como coprodutos de biomassa, pois possuem potencial para transformação em novos produtos (pellets, briquetes, biocombustíveis gasosos e líquidos, entre outros) de alto valor agregado e assim deixam de se tornar passivos ambientais. Os coprodutos de biomassa agrícola e florestal compreendem folhas, cascas, caules, galhos e rejeitos diversos.

Apesar dos coprodutos de biomassa compreender compostos orgânicos originados da natureza, o acúmulo e descarte inadequado podem contaminar o solo e água, causando desequilíbrios ambientais (FERREIRA et al., 2018).

A biomassa agrícola e florestal é abundante, principalmente, nas regiões sudeste, centro oeste e sul do Brasil, onde há concentração dos plantios de culturas florestais e agrícolas. O custo de transporte da biomassa *in natura* é alto devido à baixa densidade a granel e a sua ampla dispersão geográfica. Ademais contém alta umidade e forma heterogênea, necessitando de secagem e padronização de tamanho previamente à utilização para fins energéticos.

O Brasil possuía, em 2018, 7,83 milhões de hectares de florestas plantadas, 5,7 milhões de hectares de eucalipto e 1,6 milhão de hectares de plantios de pinus, o restante é referente a outras espécies, como acácia, teca, seringueira e paricá. Os plantios de eucalipto se concentram, principalmente, nos estados de Minas Gerais (24%), São Paulo (17%) e Mato Grosso do Sul (16%) e os de pinus no Paraná (42%) e Santa Catarina (34%) (IBÁ, 2019).

As florestas plantadas fornecem madeira para os setores de celulose e papel, carvão, energia, painéis, serraria, dentre outros. Segundo dados da FAO, em 2018 no Brasil foram produzidos 325,3 milhões de metros cúbicos de madeira, totalizando 1,23 milhões de hectares colhidos, advindos de plantios de coníferas e folhosas, Tabela 2. As atividades de colheita geram diversos coprodutos que são mantidos em campo para proteção e adubação do solo. No processamento da madeira na indústria (serrarias, fabricas de móveis, etc.) é gerada serragem, casqueiros, cascas e maravalhas que quase sempre são subutilizados ou descartados de forma inadequada.

Tabela 2 - Produção florestal e estimativa de geração de coprodutos de biomassa no Brasil em 2018

Uso da Madeira	Uso da Madeira			Coprodutos de biomassa		
	Mm ³ ⁽³⁾	Mt ⁽⁴⁾	Mha ⁽⁵⁾	Composição	t _{cp} /t _p ⁽⁶⁾	Mt
Energia	123,4	63,3	0,486	Folhas, galhos e casca	0,03	1,92
Celulose	92,7	46,4	0,337	Folhas, galhos e casca	0,15	6,87
Toras	56,4	26,7	0,167	Folhas, galhos e casca	0,16	4,24
				Processamento na indústria	0,55	14,68
Carvão	32,0	6,4 ⁽¹⁾	0,160	Folhas, galhos e casca	0,18	1,17
Cavaco	11,8	2,1	0,047	Folhas, galhos e casca	0,03	0,06
Outros ⁽²⁾	9,0	4,4	0,031	Folhas, galhos e casca	0,10	0,44
				Processamento na indústria	0,55	2,44
Total	325,3	149,3	1,230			42,9

Fonte: O autor; 1 Refere-se à quantidade de carvão produzida, a quantidade de madeira para esta produção corresponde a 17,7 milhões de toneladas, segundo dados fornecidos por Castro et al. (2017); 3 Dados obtidos de FAO STAT (2020); 4 Obtido com dados disponibilizado por Magalhães et al (2017), Gonzalez et al. (2015), Carvalho et al. (2017), Oliveira et al. (2013); 5 Obtido com dados disponibilizados por IBÁ (2019); 6 Obtido com dados disponibilizado por Castro et al. (2017), Brand et al. (2014), Brand et al. (2002), Junior et al. (2005), Vilela et al. (2014). 2 Considera os demais usos industriais da madeira. Mm³ = milhões de metros cúbicos; Mt = milhões de toneladas; Mha = milhões de hectares; t_{cp}/t_p = relação da quantidade de coprodutos gerados pela quantidade de produtos manufaturados.

A lógica de uso múltiplo da floresta consiste na produção de madeira e outros produtos de valor econômico. Na maioria das situações é possível retirar parte dos coprodutos e destina-los à geração de energia (WELFLE, 2017). Considerando estudos prévios para determinar a parcela a ser retirada sem causar danos significativos ao solo e aos plantios futuros. Ademais, a retirada tende a reduzir riscos de incêndios florestais ou mesmo a severidade de quando ocorrerem, a incidência de pragas e doenças, dentre outros.

Segundo dados da FAO (Food and Agriculture Organization), a produção agrícola brasileira em 2018 ocupou uma área equivalente a 69,6 milhões de hectares, considerando as várias safras no mesmo ano e alternância de culturas em uma mesma área, Tabela 3.

Tabela 3 - Produção dos principais cultivos e estimativa de geração de coprodutos de biomassa agrícola no Brasil em 2018

Cultivo	Coprodutos de biomassa				
	Produção ⁽¹⁾ (Mt)	Área ⁽²⁾ (Mha)	Composição	t _{cp} /t _p ⁽³⁾	Mt
Cana de açúcar	746,8	10,0	Palhada e bagaço	0,47	351,0
Soja	117,9	34,8	Palhada	1,64	193,3
Milho	82,3	16,1	Palhada e sabugo	3,10	255,1
Arroz	11,7	1,9	Palhada e casca	1,52	17,9
Trigo	5,4	2,1	Palhada	1,40	7,6
Café	3,6	1,9	Casca e pergaminho	1,25	4,4
Feijão	2,9	2,8	Palhada	0,53	1,5
Total	970,6	69,6	-	-	830,9

Fonte: O autor; 1-2 Dados obtidos de FAO STAT (2020); 3 Dados obtidos de Dias et al. (2012), Nones et al. (2017). 2 Diferentes culturas podem ser plantadas em uma mesma área, porém em épocas diferentes. Mt = milhões de toneladas; Mha = milhões de hectares; t_{cp}/t_p = relação da quantidade de coprodutos gerados pela quantidade de produtos manufaturados.

Na Tabela 3 observa-se que a cultura da cana de açúcar foi responsável pela maior geração de coprodutos em 2018, chegando a 351,0 milhões de toneladas. Vale ressaltar que o bagaço obtido na moagem da cana é utilizado na cogeração de energia nas usinas de açúcar e álcool. O percentual gerado de palha no campo esta em torno de 20% da massa de cana colhida, havendo o potencial de utilização de até 70% dessa palha para geração de energia (DIAS et al., 2012).

As culturas do milho e soja ocupam as maiores áreas de plantio e são responsáveis pela segunda maior geração de coprodutos no setor agrícola. Os coprodutos dessas culturas, junto com o arroz, trigo e feijão, são mantidos em campo como forma de complementação da adubação e cobertura do solo. No entanto, segundo De Pierri et al. (2016) até 30% pode ser retirados sem que cause danos ao solo e às culturas seguintes, os autores ainda destacam o alto potencial de aproveitamento local dos coprodutos para geração de energia.

Ferreira et al. (2018) relataram o potencial de geração anual de energia no Brasil de 2.615,4 kWh x 10⁹ a partir de 588,2 milhões de toneladas de coprodutos das culturas da cana de açúcar, milho, soja e mandioca.

3.2 Qualidade da biomassa para gaseificação

3.2.1 Propriedades físicas

A umidade excessiva da biomassa reduz a qualidade do gás e rendimento do reator, sendo desejáveis valores abaixo de 25% para gaseificadores do tipo concorrente, 60% para os contracorrente e 55% para os gaseificadores de leito fluidizado. Alta umidade da biomassa reduz a temperatura do reator, além de demandar maior consumo de combustível para fornecer calor na etapa de secagem (PEREIRA et al., 2012; RUIZ et al., 2013; SAMIRAN et al., 2016; SUSASTRIAWAN et al., 2017). O gás com alta umidade possui menor eficiência de queima e quando submetido a processos de limpeza gera alcatrão com maior fração aquosa.

A granulometria da biomassa afeta a operação e o rendimento do gaseificador ou mesmo a escolha da melhor tecnologia a ser empregada. Gaseificadores de leito fluidizado necessitam de partículas muito pequenas, menores que 6 mm, para que possam ser facilmente transportadas pelo gás de fluidização (RUIZ et al., 2013; WIDJAYA et al., 2018). Essa característica da biomassa aumenta significativamente a velocidade das reações de gaseificação e, conseqüentemente, a produtividade dos sistemas.

Para reatores de leito fixo, biomassas com dimensões médias inferiores a 50 mm são mais adequadas para gaseificação (RUIZ et al., 2013). Nesses tipos de reatores a redução do tamanho das partículas também aumenta a velocidade das reações, a produção de gás e o seu rendimento (HERNÁNDEZ et al., 2010), no entanto, partículas muito pequenas diminuem a circulação dos gases pela menor permeabilidade da carga e podem ser carreadas junto ao gás produzido. Por outro lado, partículas maiores de biomassa possuem menor reatividade, reduzindo a produtividade (SUSASTRIAWAN et al., 2017).

Em estudo realizado por Hernández et al. (2010) foi observado, com a redução no tamanho das partículas de biomassa, o aumento da eficiência do reator e melhorias na qualidade do gás, como o incremento das concentrações de hidrogênio e monóxido de carbono e, conseqüentemente, do poder calorífico. Os autores atribuíram os resultados a maior uniformidade na transferência de calor no reator, além da maior reatividade e conversão do carvão gerado de partículas menores.

A biomassa, principalmente a residual, possui baixa densidade a granel, característica que aumenta o custo de transporte e reduz o conteúdo efetivo de energia por volume. A gaseificação de combustíveis com baixa densidade requer a alimentação mais frequente do reator em função do alto consumo (OLIVEIRA et al., 2013), podendo ser dificultada devido a problemas com sistemas de transporte ou pela formação de bolsões no gaseificador e no silo.

3.2.2 Propriedades químicas

Segundo González-Vázquez et al. (2018) existem poucos trabalhos na literatura que, nas mesmas condições experimentais, determinaram correlações entre propriedades químicas da biomassa e a qualidade do gás produzido na gaseificação, devido às complexas interações entre a composição química da biomassa e as reações no gaseificador. Os autores correlacionaram propriedades da biomassa com a qualidade e quantidade do gás produzido, sendo observadas correlações significativas apenas com os materiais voláteis, o conteúdo de carbono elementar e o poder calorífico superior. Para essas propriedades da biomassa, as correlações foram positivas com a concentração de CO, produção de gás, rendimento do reator e poder calorífico do gás. Apenas os materiais voláteis tiveram correlação negativa com a concentração de H₂ no gás.

As cinzas são originadas na combustão da biomassa. Sua composição é variável em função do tipo e constituição química do combustível, da temperatura de combustão e do tempo de residência no reator (NUNES et al., 2016). Quando presente em elevada quantidade na biomassa reduz o rendimento em gás. Normalmente, a madeira possui menos que 1% de cinzas em sua composição (RAMOS E PAULA et al., 2011). No entanto, materiais contaminantes como solo e pedras podem elevar essa quantidade (DEBONI et al., 2018). A coleta da biomassa em campo tende a aumentar a presença desses contaminantes. No caso da gaseificação, onde os reatores operam em temperaturas elevadas, pode ocorrer a fusão das cinzas e formação de depósitos, interferindo no funcionamento e levando a paradas não programadas dos sistemas para manutenção. É comum a formação desses depósitos em temperaturas superiores a 800°C. No entanto, mesmo em baixas temperaturas as cinzas podem causar danos a equipamentos, dependendo de sua composição (NUNES et al., 2016).

3.3 Pré-tratamentos da biomassa

A biomassa agrícola e florestal, em sua maioria, possui características indesejáveis para utilização direta na gaseificação, como tamanho variável, baixa densidade a granel, elevada relação oxigênio/carbono e alta umidade. Essas características reduzem a eficiência da gaseificação e o poder calorífico do gás produzido, além de dificultar a operação dos reatores. A utilização de pré-tratamentos como a secagem, padronização do tamanho, torrefação e a pelletização melhoram essas características e podem viabilizar o uso da biomassa agrícola e florestal para gaseificação (SANSANIWAL et al., 2017).

A trituração e classificação fornece biomassa com tamanho homogêneo, permitindo a operação constante do reator e dos equipamentos de movimentação. A secagem é outra etapa que melhora significativamente a qualidade energética da biomassa, principalmente, pelo aumento do poder calorífico útil e, quando destinada à gaseificação, pela redução da fração aquosa no gás produzido. Como mencionando anteriormente, cada tipo de gaseificador possui limitação de umidade e tamanho das partículas, o que tornam estas etapas importantes para o rendimento do reator e a qualidade do gás.

A torrefação é o tratamento térmico da biomassa em temperaturas entre 200 e 300 °C, em condições controladas de oxigênio, a qual promove a eliminação parcial ou total das hemiceluloses, removendo parte dos grupos OH disponíveis que são responsáveis pela higroscopicidade da biomassa, além de reduzir consideravelmente sua relação oxigênio/carbono (VAN DER STELT et al., 2011). Woytiuk et al. (2017) relataram o aumento de hidrogênio e redução de alcatrão no gás, e atribuíram os resultados a eliminação de parte das hemiceluloses durante o tratamento térmico. Dudyński et al. (2015) observaram que a biomassa torrificada produz gás com menor teor de alcatrão e fração aquosa, devido ao tratamento térmico reduzir a umidade e a quantidade de voláteis presentes na biomassa.

A peletização é utilizada para compactação da biomassa, gerando o produto com forma mais homogênea, com menor umidade e maior densidade energética em relação ao material *in natura* (KALIYAN; VANCE MOREY, 2009). Segundo Erlich e Fransson (2011) a peletização permite utilizar biomassas diversas no mesmo tipo de gaseificador, reduzindo o efeito da umidade e granulometria.

4 POSSÍVEIS TÉCNICAS PARA DESENVOLVIMENTO DA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA NO BRASIL

Após discutir a disponibilidade e características das biomassas e coprodutos, agrícolas e florestais, também os principais tipos de reatores e aspectos envolvidos no processo que irão afetar a qualidade e rendimento do gás. Essa seção enumera diversas técnicas para melhorar os sistemas de gaseificação visando incrementar a produção e qualidade do gás obtido da biomassa e coprodutos. As técnicas foram divididas em atuações em reatores e pré-tratamentos da biomassa. Para cada uma delas foram elencadas as respectivas vantagens, limitações e possíveis aprimoramentos, Tabela 4.

Tabela 4 - Técnicas para desenvolvimento da gaseificação de biomassa no Brasil

(Continua)

Técnicas	Vantagens	Limitações	Aprimoramentos
<i>Atuação em reatores de gaseificação</i>			
Gaseificação com vapor ⁽¹⁾	Aumento de H ₂ e poder calorífico do gás ⁽¹⁾ Aumento da relação H ₂ /CO	Necessidade de equipamentos adicionais para produção de vapor em alta temperatura Mais utilizado em gaseificadores de leito fluidizado Inviável em pequena escala	Modificações para aproveitamento do vapor gerado durante a secagem da biomassa no próprio reator
Gaseificação com oxigênio ⁽¹⁾	Menor conteúdo de alcatrão e maior de CO, H ₂ e CH ₄ no gás ⁽¹⁾	Alto custo do gás oxigênio Mais utilizado em gaseificadores de leito fluidizado Inviável em pequena escala	Desenvolvimento de sistema supervisorio para controle da relação ar / combustível visando obter máximo poder calorífico do gás
Gaseificação com dióxido de carbono ⁽¹⁾	Aumento de CO e H ₂ e do poder calorífico do gás ⁽¹⁾	Alto custo do gás dióxido de carbono Mais utilizado em gaseificadores de leito fluidizado Inviável em pequena escala	Utilização de gases combustos para fornecimento de dióxido de carbono para gaseificação
Gaseificação com duplo estágio fornecimento de ar ⁽²⁾	Redução do conteúdo de alcatrão no gás pelo aumento da temperatura na zona de pirólise ⁽²⁾ Aumento de CO e H ₂ no gás ⁽³⁾	Necessidade de estabelecimento da quantidade de ar ótima em cada zona do reator	Aplicação em gaseificadores de leito fixo para aumento da eficiência e qualidade do gás
Gaseificador de leito fixo com duplo estágio de fornecimento de ar e gás ⁽³⁾	Redução do alcatrão e aumento da produção e poder calorífico do gás ⁽³⁾	Deterioração do sistema de retorno do gás para o reator devido a presença de alcatrão	Novos estudos para validação e melhorias desta técnica
Aumento da transferência de calor em gaseificadores de leito fixo	Aumento da produção do gás e da conversão de biomassa	Dificuldade em promover transferência homogênea de calor em gaseificadores de leito fixo	Determinar o tamanho ótimo de partículas para cada tipo de reator para favorecer a transferência de calor e aumento da eficiência
Catalisadores ⁽⁴⁾	Aumento de CO e H ₂ no gás ⁽⁴⁾ Redução de alcatrão ⁽⁴⁾	Desativação pela deposição de carbono Alto custo de catalisadores com elevada atividade de catálise Muitos trabalhos com catalisadores para gaseificação de biomassa em mini reatores de laboratório	Desenvolvimento de catalisadores acessíveis, de baixo custo e com atividade efetiva para sistemas maiores Modificações no reator para incremento da qualidade do gás e aumento da vida útil dos catalisadores

Tabela 4 - Técnicas para desenvolvimento da gaseificação de biomassa no Brasil

(Conclusão)

Técnicas	Vantagens	Limitações	Aprimoramentos
Gaseificação baseada em múltiplos produtos	Otimização no uso da biomassa	Perdas de eficiência de determinado produto em relação a outro	Poucos trabalhos Produção de gás e carvão com baixas emissões
<i>Pré-tratamentos da biomassa</i>			
Torrefação	Secagem e redução da umidade de equilíbrio da biomassa ⁽⁵⁾ Redução de alcatrão e aumento do poder calorífico do gás ⁽⁶⁾	Alto grau de torrefação pode reduzir a reatividade da biomassa ⁽⁷⁾	Controle do grau de torrefação para maximizar a produção e qualidade do gás por tipo de reator
Peletização	Padronização do tamanho e forma de diferentes biomassas pra gaseificação ⁽⁸⁾ Redução e homogeneização da umidade da biomassa ⁽⁹⁾ Redução do espaço de armazenamento ⁽⁹⁾	Os pellets são susceptíveis a condições de umidade em reatores de leito fixo, podendo requerer a secagem prévia á gaseificação	Utilização de biomassas diversas no mesmo tipo de reator ⁽⁸⁾
Torrefação + Peletização	Aumento da eficiência e poder calorífico do gás Aumento da densidade energética Redução do efeito da umidade em reatores de leito fixo	Aumento excessivo no custo da biomassa Redução da reatividade da biomassa pelo menor conteúdo de voláteis e porosidade	Valoração e aumento da qualidade da biomassa residual para gaseificação

Fonte: O autor; 1 Sansaniwal et al. (2017); 2 Galindo et al. (2014); 3 Jaojaruek et al. (2011); 4 Xie et al. (2018); 5 Van Der Stelt et al. (2011); 6 Woytiuk et al. (2017); 7 Pinto et al. (2017); 8 Erlich e Fransson (2011); 9 Kaliyan e Vance Morey (2009).

5 OPORTUNIDADES E DESAFIOS PARA GASEIFICAÇÃO NO BRASIL

Foi elaborada, baseada na consulta da literatura, uma análise SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*) com aspectos relevantes a serem considerados para viabilização de projetos de gaseificação com biomassa agrícola e florestal no Brasil, Tabela 5.

Ao analisar os aspectos envolvidos na gaseificação de biomassa no Brasil, destaca-se como oportunidades, a disponibilidade e baixo custo da biomassa para geração de energia, seu caráter renovável e a baixa emissão de gases de efeito estufa, a possibilidade da geração distribuída de energia elétrica e o aumento da participação das fontes renováveis na matriz energética. No entanto, existem diversos desafios que podem se tornar barreiras à consolidação da gaseificação, como a baixa qualidade da biomassa residual, altos custos de equipamentos e combustíveis, pouco conhecimento e desconfiança na tecnologia.

Tabela 5 - Análise SWOT para gaseificação com biomassa no Brasil

(Continua)

Strengths (Forças)

- Ampla disponibilidade de biomassa agrícola e florestal
- Alta produtividade das florestas
- Possibilidade de retirada de parte da biomassa residual para energia
- Alto custo da energia elétrica convencional em meses de escassez hídrica
- Energia oriunda de fontes renováveis com baixas emissões de CO₂
- Baixo custo da energia gerada a partir da biomassa comparado a combustíveis fósseis

Weaknesses (Fraquezas)

- Densidade, umidade e poder calorífico da biomassa variável
- Fontes dispersas geograficamente
- Logística de transporte difícil e alto custo de combustível
- Escassez de projetos de gaseificação no Brasil e desconhecimento da tecnologia
- Maior custo da tecnologia de gaseificação comparado à combustão e pirólise

Opportunities (Oportunidades)

- Geração de energia térmica ou elétrica em áreas isoladas, suprimindo a necessidade de sítios, fazendas e agroindústrias
 - Crescimento das fontes renováveis de energia
 - Vocação do Brasil para o uso de fontes renováveis de energia
 - Menor dependência de combustíveis fósseis
 - Geração de créditos de carbono
 - Possibilidade de incentivos governamentais para o uso de energia da biomassa
 - Geração de empregos
 - Desenvolvimento tecnológico do setor
 - Aproveitamento de coprodutos de biomassa, reduzindo passivos ambientais
 - Possibilidade de utilizar restos vegetais de poda urbana e similares
 - Aplicabilidade da gaseificação para geração de múltiplos produtos (calor e energia, produtos químicos, combustíveis gasosos e líquidos, etc)
 - Desenvolvimento de novo nicho de mercado
-

Tabela 5 - Análise SWOT para gaseificação com biomassa no Brasil

(Conclusão)

Threats (Ameaças)

- Competição com demais usos da biomassa para energia, como a combustão e pirólise
- Necessidade futura de incorporação da matéria orgânica oriunda da biomassa ao solo
- Não consolidação da tecnologia em função de problemas técnicos
- Atraso tecnológico do país na área de gaseificação
- Dependência de tecnologias externas que podem encarecer excessivamente os projetos
- Aumento de custo pela necessidade de pré-tratamentos da biomassa para aumentar sua qualidade energética

Fonte: O autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As condições climáticas e a disponibilidade de terras no Brasil permitem produzir alimentos e biomassa florestal em grande quantidade, gerando milhões de toneladas de coprodutos de biomassa que podem ser aproveitados em partes para gaseificação. Estima-se que em 2018 tenham sido gerados aproximadamente 43 milhões de toneladas de coprodutos de origem florestal e 831 milhões de toneladas de coprodutos de origem agrícola. A viabilidade da gaseificação desses coprodutos depende de estudos que definam a melhor tecnologia a ser empregada na conversão em gás. Deve-se considerar a disponibilidade local de biomassa, bem como suas características de qualidade associadas ao custo de obtenção e pré-tratamentos.

A produção de energia a partir da biomassa pela gaseificação gera empregos e renda, principalmente nos setores de produção, colheita e transporte. Agrega valor aos coprodutos e reduz gastos com o descarte.

Devido à dispersão geográfica das fontes de biomassa, a gaseificação pode fornecer gás de forma distribuída, atendendo regiões isoladas, gerando energia térmica e elétrica para sítios, fazendas, agroindústrias, cidades e demais atividades.

Existem diversos ganhos ambientais a partir do uso da biomassa agrícola e florestal e seus coprodutos, destacando a redução da emissão de gases de efeito estufa, redução de passivos ambientais, redução do uso de combustíveis fósseis. Vale ressaltar que a produção inadequada de biomassa pode levar degradação do solo, poluição do ar, contaminação das águas e perda da biodiversidade. É necessário o monitoramento dos diferentes setores para tomada de decisão quanto a possíveis medidas de controle, mitigação e recuperação.

A consolidação da gaseificação no Brasil está associada, primeiramente, ao desenvolvimento de sistemas simples, de baixo custo e com alta eficiência na conversão da

biomassa em gás, e também a sua difusão para conhecimento pelos diferentes setores da economia. Acrescenta-se ainda a necessidade de incentivos governamentais que possam subsidiar a aquisição desta tecnologia de conversão.

O desenvolvimento de catalisadores modernos, compatíveis com a catálise do gás bruto, certamente poderá aumentar a eficiência do processo e a qualidade do gás para múltiplos usos.

REFERÊNCIAS

ABDUL SALAM, P.; BHATTACHARYA, S. C. A comparative study of charcoal gasification in two types of spouted bed reactors. **Energy**, v. 31, n. 2, p. 228-243, 2006.

AHMAD, A. A.; ZAWAWI, N. A.; KASIM, F. H.; INAYAT, A.; KHASRI, A. Assessing the gasification performance of biomass: A review on biomass gasification process conditions, optimization and economic evaluation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1333-1347, 2016.

BALAT, M.; BALAT, M.; KIRTAY, E.; BALAT, H. Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 12, p. 3147-3157, 2009a.

BALAT, M.; BALAT, M.; KIRTAY, E.; BALAT, H. Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 2: Gasification systems. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 12, p. 3158-3168, 2009b.

BRAND, M. A.; DE MUÑIZ, G. I. B.; DA SILVA, D. A.; KLOCK, U. Caracterização do rendimento e quantificação dos resíduos gerados em serraria através do balanço de materiais. **Floresta**, v. 32, n. 2, p. 247-259, 2002.

BRAND, M. A.; STÄHELIN, T. S. F.; FERREIRA, J. C.; NEVES, M. D. Produção de biomassa para geração de energia em povoamentos de *Pinus taeda* L. com diferentes idades. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 353-360, 2014.

CARVALHO, A. G.; ZANUNCIO, A. J. V.; SILVA, C. M. S. D.; CARNEIRO, A. D. C. O.; PAULA, M. O. D. Método de ressonância para predição das propriedades mecânicas das madeiras de *Eucalyptus urophylla* e *Pinus oocarpa* termorretificadas. **Revista Matéria**, v. 22, n. 1, 2017.

CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. D. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; DA SILVA, C. H. F.; CÂNDIDO, W. L.; DOS SANTOS, R. C. Quantification of forestry and carbonization waste. **Renewable Energy**, v. 103, p. 432-438, 2017.

CHAN, F. L.; TANKSALE, A. Review of recent developments in Ni-based catalysts for biomass gasification. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 428-438, 2014.

DE DIEGO, L. F.; GARCÍA-LABIANO, F.; GAYÁN, P.; ABAD, A.; MENDIARA, T.; ADÁNEZ, J.; NACKEN, M.; HEIDENREICH, S. Tar abatement for clean syngas production during biomass gasification in a dual fluidized bed. **Fuel Processing Technology**, v. 152, p. 116-123, 2016.

DE PIERRI, L.; PAULETTI, V.; SILVA, D. A.; SCHERAIBER, C. F.; SOUZA, J. L. M.; MUNARO, F. C. Sazonalidade e potencial energético da biomassa residual agrícola na região dos Campos Gerais do Paraná. **Revista Ceres**, v. 63, n. 2, p. 129-137, 2016.

DEBONI, T. L.; SIMIONI, F. J.; BRAND, M. A.; LOPES, G. P. Evolution of the quality of forest biomass for energy generation in a cogeneration plant. **Renewable Energy**, 2018.

DIAS, J. M. C. S.; SANTOS, D. T.; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H. B.; BARBOSA, P. F. D.; ROCHA, J. D. **Produção de briquetes e pêletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2012. 130 p.

DUDYŃSKI, M.; VAN DYK, J. C.; KWIAŃKOWSKI, K.; SOSNOWSKA, M. Biomass gasification: Influence of torrefaction on syngas production and tar formation. **Fuel Processing Technology**, v. 131, p. 203-212, 2015.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2019: Ano base 2018**. Rio de Janeiro, Brasil, p.303. 2019.

ERLICH, C.; FRANSSON, T. H. Downdraft gasification of pellets made of wood, palm-oil residues respective bagasse: Experimental study. **Applied Energy**, v. 88, n. 3, p. 899-908, 2011.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAO STAT: Forestry Production and Trade**: FAO 2020.

FERREIRA, L. R. A.; OTTO, R. B.; SILVA, F. P.; DE SOUZA, S. N. M.; DE SOUZA, S. S.; ANDO JUNIOR, O. H. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 440-455, 2018.

GALINDO, A. L.; LORA, E. S.; ANDRADE, R. V.; GIRALDO, S. Y.; JAÉN, R. L.; COBAS, V. M. Biomass gasification in a downdraft gasifier with a two-stage air supply: Effect of operating conditions on gas quality. **Biomass and Bioenergy**, v. 61, p. 236-244, 2014.

GALVITA, V. V.; POELMAN, H.; DETAVERNIER, C.; MARIN, G. B. Catalyst-assisted chemical looping for CO₂ conversion to CO. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 164, p. 184-191, 2015.

GONÇALEZ, J. C.; VIEIRA, F. S.; CAMARGOS, J. A. A.; ZERBINI, N. J. Influence of site on properties of wood of *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **CERNE**, v. 15, n. 2, p. 251-255, 2015.

GONZÁLEZ-VÁZQUEZ, M. P.; GARCÍA, R.; GIL, M. V.; PEVIDA, C.; RUBIERA, F. Comparison of the gasification performance of multiple biomass types in a bubbling fluidized bed. **Energy Conversion and Management**, v. 176, p. 309-323, 2018.

GUAN, G.; KAEWPANHA, M.; HAO, X.; ABUDULA, A. Catalytic steam reforming of biomass tar: Prospects and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 450-461, 2016.

GUNARATHNE, D. S.; MUELLER, A.; FLECK, S.; KOLB, T.; CHMIELEWSKI, J. K.; YANG, W.; BLASIAK, W. Gasification characteristics of steam exploded biomass in an updraft pilot scale gasifier. **Energy**, v. 71, n. Supplement C, p. 496-506, 2014.

GUO, F.; DONG, Y.; DONG, L.; GUO, C. Effect of design and operating parameters on the gasification process of biomass in a downdraft fixed bed: An experimental study. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 11, p. 5625-5633, 2014.

HERNÁNDEZ, J. J.; ARANDA-ALMANSA, G.; BULA, A. Gasification of biomass wastes in an entrained flow gasifier: Effect of the particle size and the residence time. **Fuel Processing Technology**, v. 91, n. 6, p. 681-692, 2010.

HRBEK, J. **Status report on thermal biomass gasification in countries participating in IEA Bioenergy Task 33**. Vienna University of Technology. Austria, p.163. 2016.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório 2019: Ano base 2018**. IBÁ, p.80. 2019.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola - LSPA: IBGE 2019**.

IEA Bioenergy. **Global database of biomass conversion facilities, including advanced biofuels, combustion, gasification and pyrolysis plants**. Disponível em: < <http://www.ieabioenergy.com/installations/> >. Acesso em: 24 mai. 2018.

JAOJARUEK, K.; JARUNGTHAMMACHOTE, S.; GRATUITO, M. K. B.; WONGSUWAN, H.; HOMHUAL, S. Experimental study of wood downdraft gasification for an improved producer gas quality through an innovative two-stage air and premixed air/gas supply approach. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 7, p. 4834-4840, 2011.

JUNIOR, M. I. M.; DA ROCHA, M. P.; JUNIOR, R. T. Rendimento em madeira serrada de Pinus taeda para duas metodologias de desdobro. **Floresta**, v. 35, n. 3, p. 473-483, 2005.

KALIYAN, N.; VANCE MOREY, R. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 3, p. 337-359, 2009.

LAN, W.; CHEN, G.; ZHU, X.; WANG, X.; WANG, X.; XU, B. Research on the characteristics of biomass gasification in a fluidized bed. **Journal of the Energy Institute**, 2018.

MAGALHÃES, M. A. D.; CARNEIRO, A. D. C. O.; VITAL, B. R.; SILVA, C. M. S. D.; SOUZA, M. M. D.; FIALHO, L. D. F. Estimates of mass and energy of different genetic material eucalyptus. **Revista Árvore**, v. 41, n. 3, p. 1-8, 2017.

- MANATURA, K.; LU, J.-H.; WU, K.-T.; HSU, H.-T. Exergy analysis on torrefied rice husk pellet in fluidized bed gasification. **Applied Thermal Engineering**, v. 111, p. 1016-1024, 2017.
- 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.
- NONES, D. L.; BRAND, M. A.; AMPESSAN, C. G. M.; FRIEDERICHS, G. Biomassa residual agrícola e florestal na produção de compactados para geração de energia. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 16, n. 2, p. 155-164, 2017.
- NUNES, L. J. R.; MATIAS, J. C. O.; CATALÃO, J. P. S. Biomass combustion systems: A review on the physical and chemical properties of the ashes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 235-242, 2016.
- OLGUN, H.; OZDOGAN, S.; YINESOR, G. Results with a bench scale downdraft biomass gasifier for agricultural and forestry residues. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 1, p. 572-580, 2011.
- OLIVEIRA, J. L.; SILVA, J. N.; PEREIRA, E. G.; FILHO, D. O.; CARVALHO, D. R. Characterization and mapping of waste from coffee and eucalyptus production in Brazil for thermochemical conversion of energy via gasification. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 21, p. 52-58, 2013.
- PANWAR, N. L.; KOTHARI, R.; TYAGI, V. V. Thermo chemical conversion of biomass – Eco friendly energy routes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 4, p. 1801-1816, 2012.
- PARDO-PLANAS, O.; ATIYEH, H. K.; PHILLIPS, J. R.; AICHELE, C. P.; MOHAMMAD, S. Process simulation of ethanol production from biomass gasification and syngas fermentation. **Bioresource Technology**, v. 245, p. 925-932, 2017.
- PATRA, T. K.; SHETH, P. N. Biomass gasification models for downdraft gasifier: A state-of-the-art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 583-593, 2015.
- PEREIRA, E. G.; DA SILVA, J. N.; DE OLIVEIRA, J. L.; MACHADO, C. S. Sustainable energy: A review of gasification technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 7, p. 4753-4762, 2012.
- PINTO, F.; GOMINHO, J.; ANDRÉ, R. N.; GONÇALVES, D.; MIRANDA, M.; VARELA, F.; NEVES, D.; SANTOS, J.; LOURENÇO, A.; PEREIRA, H. Improvement of gasification performance of Eucalyptus globulus stumps with torrefaction and densification pre-treatments. **Fuel**, v. 206, p. 289-299, 2017.
- RAMOS E PAULA, L. E.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **CERNE**, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011.

REN, J.; LIU, Y.-L.; ZHAO, X.-Y.; CAO, J.-P. Biomass thermochemical conversion: A review on tar elimination from biomass catalytic gasification. **Journal of the Energy Institute**, 2019.

RUIZ, J. A.; JUÁREZ, M. C.; MORALES, M. P.; MUÑOZ, P.; MENDÍVIL, M. A. Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 18, p. 174-183, 2013.

SAMIRAN, N. A.; JAAFAR, M. N. M.; NG, J.-H.; LAM, S. S.; CHONG, C. T. Progress in biomass gasification technique – With focus on Malaysian palm biomass for syngas production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, n. Supplement C, p. 1047-1062, 2016.

SANSANIWAL, S. K.; PAL, K.; ROSEN, M. A.; TYAGI, S. K. Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 363-384, 2017.

SUSASTRIAWAN, A. A. P.; SAPTOADI, H.; PURNOMO. Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 989-1003, 2017.

SUTTON, D.; KELLEHER, B.; ROSS, J. R. H. Review of literature on catalysts for biomass gasification. **Fuel Processing Technology**, v. 73, n. 3, p. 155-173, 2001.

UD DIN, Z.; ZAINAL, Z. A. Biomass integrated gasification–SOFC systems: Technology overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, n. Supplement C, p. 1356-1376, 2016.

VALDERRAMA RIOS, M. L.; GONZÁLEZ, A. M.; LORA, E. E. S.; ALMAZÁN DEL OLMO, O. A. Reduction of tar generated during biomass gasification: A review. **Biomass and Bioenergy**, v. 108, p. 345-370, 2018.

VAN DER STELT, M. J. C.; GERHAUSER, H.; KIEL, J. H. A.; PTASINSKI, K. J. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 9, p. 3748-3762, 2011.

VILELA, A. D. O.; LORA, E. S.; QUINTERO, Q. R.; VICINTIN, R. A.; SILVA E SOUZA, T. P. D. A new technology for the combined production of charcoal and electricity through cogeneration. **Biomass and Bioenergy**, v. 69, p. 222-240, 2014.

WANG, L.; WELLER, C. L.; JONES, D. D.; HANNA, M. A. Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, n. 7, p. 573-581, 2008.

WELFLE, A. Balancing growing global bioenergy resource demands - Brazil's biomass potential and the availability of resource for trade. **Biomass and Bioenergy**, v. 105, p. 83-95, 2017.

WIDJAYA, E. R.; CHEN, G.; BOWTELL, L.; HILLS, C. Gasification of non-woody biomass: A literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 89, p. 184-193, 2018.

WOYTIUK, K.; CAMPBELL, W.; GERSPACHER, R.; EVITTS, R. W.; PHOENIX, A. The effect of torrefaction on syngas quality metrics from fluidized bed gasification of SRC willow. **Renewable Energy**, v. 101, p. 409-416, 2017.

XIE, Y.; SU, Y.; WANG, P.; ZHANG, S.; XIONG, Y. In-situ catalytic conversion of tar from biomass gasification over carbon nanofibers- supported Fe-Ni bimetallic catalysts. **Fuel Processing Technology**, v. 182, p. 77-87, 2018.

YUNG, M. M.; JABLONSKI, W. S.; MAGRINI-BAIR, K. A. Review of Catalytic Conditioning of Biomass-Derived Syngas. **Energy & Fuels**, v. 23, n. 4, p. 1874-1887, 2009.

ZAINAL, Z. A.; RIFAU, A.; QUADIR, G. A.; SEETHARAMU, K. N. Experimental investigation of a downdraft biomass gasifier. **Biomass and Bioenergy**, v. 23, n. 4, p. 283-289, 2002.

ZANG, G.; TEJASVI, S.; RATNER, A.; LORA, E. S. A comparative study of biomass integrated gasification combined cycle power systems: Performance analysis. **Bioresource Technology**, v. 255, p. 246-256, 2018.

ZHANG, L.; XU, C.; CHAMPAGNE, P. Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 5, p. 969-982, 2010.

ZHANG, Z.; LIU, L.; SHEN, B.; WU, C. Preparation, modification and development of Ni-based catalysts for catalytic reforming of tar produced from biomass gasification. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 1086-1109, 2018.

CAPÍTULO II

GASEIFICAÇÃO DE DIFERENTES BIOMASSAS EM REATOR DE LEITO FIXO CONCORRENTE

Resumo - A gaseificação é uma técnica promissora para transformação da biomassa em combustíveis e produtos químicos diversos. A viabilidade do processo é garantida quando obtido alto rendimento, gás com elevado poder calorífico e baixo teor de alcatrão. Ademais, é importante desenvolver equipamentos eficientes que possam trabalhar com diferentes biomassas. O objetivo principal foi avaliar o desempenho operacional de um gaseificador de leito fixo e fluxo concorrente. E como objetivos específicos qualificar e quantificar o gás, realizar o balanço de massa e energia do gaseificador, além de propor melhorias para a otimização da conversão de diferentes biomassas em gás. As biomassas gaseificadas foram cavacos de eucalipto *in natura* e torreficados, pellets de pinus *in natura* e torreficados e carvão vegetal de eucalipto. Foram realizadas duas gaseificações por biomassa, nas quais foram medidas as temperaturas do reator, as vazões de biomassa, ar e gases, a composição do gás e estimado o seu poder calorífico inferior e, posteriormente, avaliado o balanço de massa e de energia do sistema. A gaseificação das biomassas foi tecnicamente viável, o desempenho e operação do reator foram afetados pelas propriedades químicas e físicas das biomassas. A torrefação dos cavacos e pellets reduziu os percentuais de CO₂ (- 18,4%) e H₂ (- 12,1%), enquanto aumentou o de CO (+ 12,7%) no gás, contribuindo positivamente para o aumento do poder calorífico inferior. Os perfis de temperatura obtidos nas gaseificações com cavacos e pellets, *in natura* e torreficados, evidenciaram o movimento descendente da zona de combustão e, portanto, a limitação da zona de redução do reator. As maiores eficiências foram obtidas nas gaseificações com cavacos, em média 53,2% de eficiência a frio, não havendo diferenças entre os *in natura* e os torreficados. O balanço de energia indicou que uma parcela significativa da energia das biomassas foi definida como “outros produtos”, em média 42%. Acredita-se que a biomassa parcialmente gaseificada possa compor a maior parte desta parcela. Visando aumentar a conversão das biomassas em gás, recomendam-se modificações na zona de redução do reator, investigando seu comprimento e incluindo a criação de uma barreira física para aumentar o tempo de residência dos gases.

Palavras-chave: Biomassa energética; Gás de biomassa; Balanço de massa e energia.

1 INTRODUÇÃO

Diante das consequências negativas ao meio ambiente decorrente do uso dos combustíveis fósseis e da incerteza sobre a duração das reservas mundiais, aliado ao aspecto não renovável (SAMIRAN et al., 2016), tem-se buscado fontes alternativas e renováveis de energia. A biomassa de origem vegetal é mundialmente abundante, considerada como fonte de carbono neutro, possui baixo custo e é amplamente empregada na geração de energia térmica e elétrica (ZHANG et al., 2010; PANWAR et al., 2012).

A combustão direta da biomassa é a forma mais utilizada para sua conversão em energia térmica. No entanto, normalmente há pouco controle da relação ar/combustível na maioria dos sistemas de queima não automatizados, favorecendo a combustão incompleta e a formação de compostos tóxicos como monóxido de carbono, fumaça e fuligem (ZHANG et al., 2010).

A gaseificação é uma alternativa a combustão direta da biomassa, devido a sua maior eficiência e possibilidade de aplicações, como a produção de combustíveis líquidos e gasosos e diversos produtos químicos (WANG et al., 2008; MOLINO et al., 2016). O gás obtido na gaseificação é composto, principalmente, por monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) e hidrogênio (H₂), e possui aptidão para uso em motores de combustão interna e turbinas (PEREIRA et al., 2012; ZHANG et al., 2018).

A gaseificação compreende na secagem, pirólise, combustão e redução, sendo esta última etapa responsável pela produção do gás (MOLINO et al., 2016). A gaseificação é realizada em reatores de vários tipos, no entanto os mais utilizados são os de leito fixo e fluidizado. Os gaseificadores de leito fixo possuem menor custo de construção e maior facilidade de operação, demandam menor qualidade e processamento da biomassa, no entanto, tendem a produzir gás de menor qualidade (SUSASTRIAWAN et al., 2017).

Diversas características da biomassa afetam a operação e rendimento dos gaseificadores e a qualidade do gás. A elevada umidade, forma heterogênea e baixa densidade são características comumente observadas na biomassa vegetal, no entanto, podem ser compensadas pela secagem, trituração e peletização, respectivamente (SANSANIWAL et al., 2017). A composição química é intrínseca de cada biomassa e difícil de ser modificada. A torrefação degrada componentes menos estáveis termicamente, eliminando parcialmente as hemiceluloses e preservando a lignina. Tendo como principais efeitos, o aumento da relação carbono/oxigênio e do poder calorífico superior e a redução da umidade de equilíbrio higroscópico da biomassa.

Neste contexto, as pesquisas têm mostrado que a relação entre as propriedades da biomassa com a qualidade e rendimento em gás, ainda não estão bem definidas, pois são inúmeros os fatores que influenciam a gaseificação (GONZÁLEZ-VÁZQUEZ et al., 2018).

Em geral, existem poucos trabalhos que avaliaram o efeito de diferentes biomassas sobre a qualidade e rendimento do gás obtido no mesmo gaseificador. Logo, considerando a demanda crescente e a importância do desenvolvimento de fontes energéticas sustentáveis para geração de energia de forma distribuída, faz-se necessário pesquisas que otimizem a conversão de diferentes biomassas em energia por meio da gaseificação e evidenciem a importância social e econômica desta técnica de conversão.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar o desempenho da gaseificação de biomassas (*in natura*, torrificada e carbonizada) em um gaseificador de leito fixo e fluxo concorrente visando a produção de gás combustível para fins energéticos.

2.2 Específicos

Determinar as propriedades físicas e químicas das biomassas para compreensão dos parâmetros operacionais do gaseificador.

Avaliar o desempenho térmico do gaseificador por meio do perfil de temperaturas e dos balanços de massa e energia.

Propor melhorias para otimizar a conversão das biomassas em gás combustível.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização das biomassas

As biomassas utilizadas para gaseificação foram cavacos de eucalipto *in natura* e torrificados a 300 °C por 15 minutos, pellets de pinus *in natura* e torrificados à 300 °C por 25 minutos e carvão vegetal de eucalipto. A torrefação das biomassas foi realizada em um reator tipo rosca sem fim descrito por Magalhães et al. (2018).

O teor de umidade foi determinado de acordo com a metodologia descrita na norma EN 14774-1(DIN, 2010a), em estufa estabilizada a $105\pm 2^{\circ}\text{C}$.

A densidade a granel foi obtida de acordo com a norma EN 15103 (DIN, 2010c), e a classificação granulométrica realizada seguindo os procedimentos descritos na norma EN 15149-1 (DIN, 2011).

A composição química imediata foi obtida de acordo com a norma NBR 8112 (ABNT, 1986), para as determinações dos teores de materiais voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo, em base seca.

O teor de extrativos foi determinado conforme a norma TAPPI 204 om-88 (TAPPI, 1996), substituindo a mistura dos solventes etanol/benzeno, por etanol/tolueno. O teor de lignina insolúvel foi determinado em duplicata pelo método Klason (GOMIDE; DEMUNER, 1986). A lignina solúvel foi determinada por espectrometria (GOLDSCHIMID, 1971). O teor de lignina total foi obtido a partir da soma dos valores de lignina solúvel e insolúvel. O teor de holocelulose (celulose e hemiceluloses) foi obtido pelo somatório dos teores de extrativos, lignina total e cinzas, decrescido de 100.

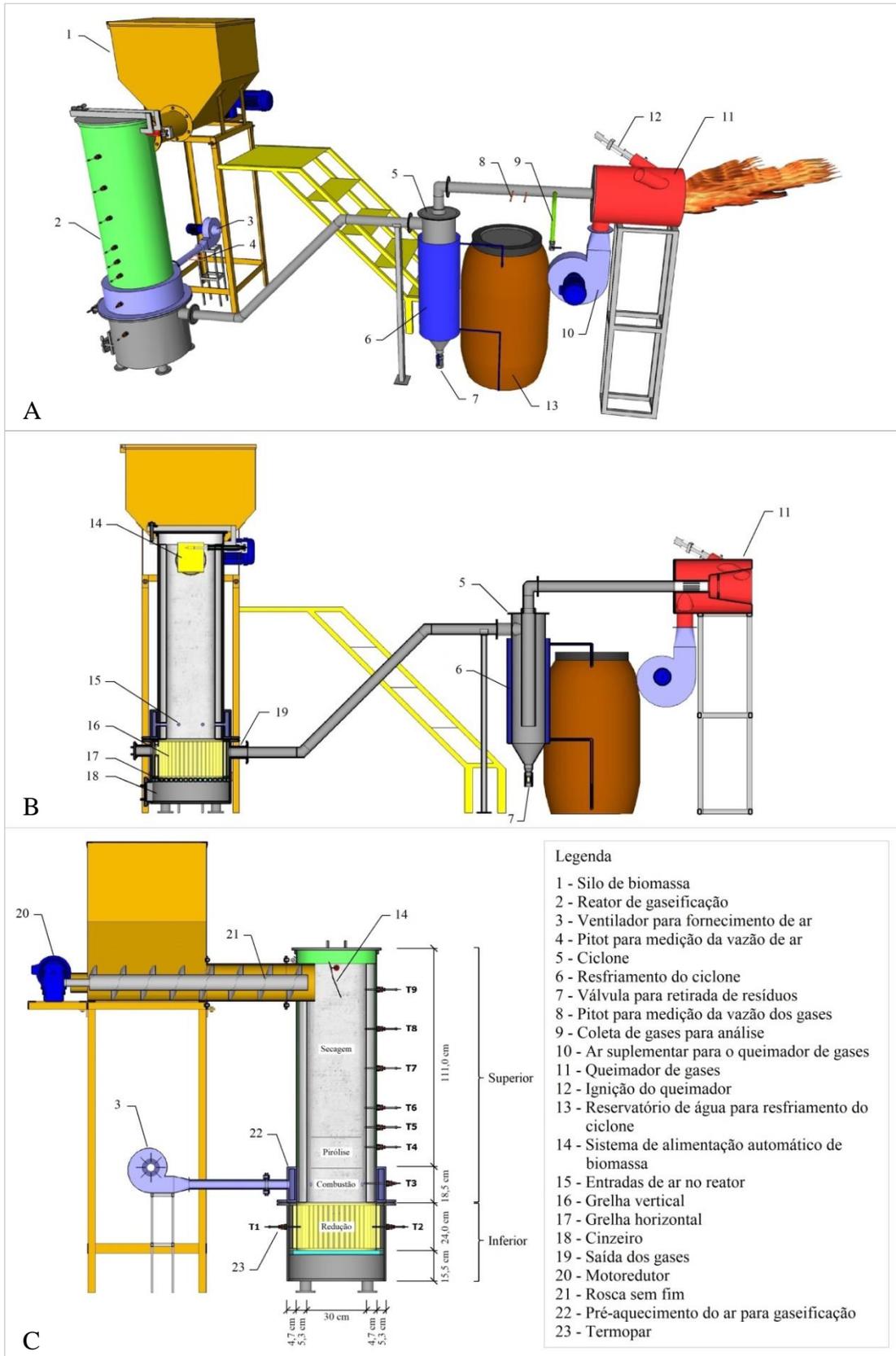
A análise termogravimétrica foi realizada utilizando equipamento DTG-60 da Shimadzu, conduzida sob atmosfera de gás nitrogênio, com vazão constante de 50 ml/min e taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Os termogramas foram obtidos a partir da temperatura de 50°C até a temperatura máxima de 600°C .

O poder calorífico superior foi obtido de acordo com a norma da EN 14918 (DIN, 2010b), empregando uma bomba calorimétrica adiabática IKA300[®].

3.2 Gaseificador de leito fixo e fluxo concorrente

Utilizou-se uma planta piloto de gaseificação de biomassa composta pelo gaseificador de leito fixo e fluxo concorrente, silo para alimentação de biomassa, ciclone para limpeza dos gases e pelo queimador de gases, Figura 1.

Figura 1 - Esquema da planta piloto de gaseificação de biomassa (A), corte no sentido longitudinal (B) e transversal (C)



Fonte: O autor.

O reator de gaseificação foi composto por uma seção superior na qual a biomassa fica armazenada, por uma seção de distribuição de ar em seu interior (Figura 1-15), por uma grelha vertical para coleta do gás (Figura 1-16) e por uma grelha horizontal (Figura 1-17) que sustenta a carga de biomassa e permite a separação das cinzas para um compartimento inferior no reator, Figura 1-18.

O reator de gaseificação possui altura interna de 1,69 m, diâmetro interno de 0,30 m na seção superior e 0,50 m na seção inferior, Figura 1C. O reator foi construído em aço carbono e revestido internamente por duas camadas de papel de fibra cerâmica, com 5 mm de espessura cada, para isolamento térmico. Na seção superior, internamente ao isolamento térmico, foi colocada uma camada de 4 cm de concreto refratário *Unicast 70N* para proteção das partes metálicas externas.

O ciclone para limpeza dos gases (Figura 1-5) possui uma camisa de resfriamento com água em circulação constante por meio de uma bomba de aquário, Figura 1-6. Na região inferior, foi instalada uma válvula para coleta de resíduos, Figura 1-7.

O queimador de gases (Figura 1-11) possuía sistema de ignição por meio de centelha elétrica e gás liquefeito de petróleo (Figura 1-12), e ventilador para fornecimento de ar para combustão dos gases, Figura 1-10.

O sistema de alimentação de biomassa consistia em um silo com rosca sem fim (Figura 1-21) acionada por um motoredutor (Figura 1-20). O acionamento do motoredutor foi realizado automaticamente por meio de sensor mecânico de nível de biomassa na região superior do reator, Figura 1-14.

O sistema de injeção de ar para gaseificação possuía um ventilador elétrico (Figura 1-3) controlado por inversor de frequência *WEG CFW 8*, o que possibilitava a variação da vazão de ar. O ar passava por um trocador de calor, onde foi pré-aquecido antes de entrar no reator, Figura 1-22.

Para monitoramento das temperaturas foram inseridos 9 termopares tipo K (T1 a T9) ao longo do reator, Figura 1C. A temperatura do ar de admissão e dos gases também foi obtida utilizando termopares tipo K. Para cálculos de perda de calor foram coletadas as temperaturas externas da parede do gaseificador com auxílio de um pirômetro e com base numa malha de pontos predefinida.

A vazão de ar para gaseificação e a vazão de gás foram obtidas, por meio de tubos *pitot* conectados a manômetros, nos pontos indicados na Figura 1-4 e na Figura 1-8, respectivamente. A coleta do gás para análise de sua composição foi feita no ponto indicado na Figura 1-9.

3.3 Gaseificação das biomassas

3.3.1 Descrição da operação do gaseificador

Inicialmente, o gaseificador e o silo foram abastecidos com biomassa e em seguida realizou-se a ignição do reator com auxílio de um maçarico a gás liquefeito de petróleo, mantendo o sistema em operação por no mínimo uma hora. Essa etapa tinha por objetivo formar as diferentes zonas de reação e simular o uso consecutivo do sistema. A gaseificação propriamente dita foi realizada no dia seguinte a essa etapa, para assegurar que a temperatura do reator estivesse próxima a do ambiente. Para cada biomassa foram feitas duas gaseificações, consideradas como repetições.

O momento da ignição do reator foi definido como tempo inicial para coleta de dados e posteriormente na confecção dos gráficos, nesse momento também foi acionada a chama piloto do queimador de gases e mantida até que o gás produzido sustentasse a própria chama.

O ar foi injetado na zona de combustão em maior quantidade no início da gaseificação visando acelerar a ignição do reator. No tempo inicial o inversor de frequência foi iniciado em 40 hertz. Após 5 e 10 minutos foi reduzido para 35 e 30 hertz, respectivamente, permanecendo nesta última frequência até o fim da gaseificação. A frequência final da gaseificação com carvão foi menor (± 18 hertz), essa mudança foi para que a temperatura na zona de combustão não ultrapassasse o limite de medição dos termopares de 1260 °C.

As medições das temperaturas, das vazões de biomassa, ar, gás e resíduos provenientes do ciclone foram realizadas a cada dez minutos.

3.3.2 Composição e poder calorífico inferior do gás

O gás foi coletado após o ciclone por meio de um tubo de aço inox conectado à tubulação de transporte. Os gases foram limpos utilizando o sistema de pré-lavagem composto por sete frascos tipo Dreschel conectados em sequência, acondicionados em uma caixa térmica e submersos em gelo. Os dois primeiros foram preenchidos com algodão para condensar o excesso de gases. No terceiro foi adicionado água destilada mais algodão e no quarto álcool etílico mais algodão. O quinto continha água destilada, no sexto e sétimo foi adicionado apenas álcool etílico. O gás ainda passava por um filtro de carvão ativado mais algodão antes de ser enviado ao analisador de gases.

Os gases não condensáveis, após a pré-limpeza, foram conduzidos até o sistema de limpeza do equipamento Gasboard 9030 Wuhan CUBIC Optoelectronics Co. Ltda., onde foram novamente lavados em água destilada e resfriados até 4 °C em um desumidificador e em seguida passados por um filtro de carvão ativado e algodão. Finalmente, foram limpos em filtros com capacidade de reter impurezas de até 3 µm (filtro FT1) e 1 µm (filtro FT2).

Na sequência, após a limpeza completa, os gases foram conduzidos para o sistema online de análise de gases, gasboard 3100 Wuhan CUBIC Optoelectronics Co. Ltda., que forneceu a composição percentual de CO, CO₂, CH₄, C_nH_m, H₂ e O₂. A medição foi contínua e foi realizada durante todo o tempo da gaseificação, sendo os dados armazenados a cada 10 segundos.

O poder calorífico inferior do gás foi estimado segundo Sales et al. (2017), pela multiplicação da concentração média de cada gás pelo seu respectivo poder calorífico inferior, conforme a Equação 1.

$$PCI_g = (12,696 CO) + (10,768 H_2) + (35,866 CH_4) \quad (1)$$

Em que:

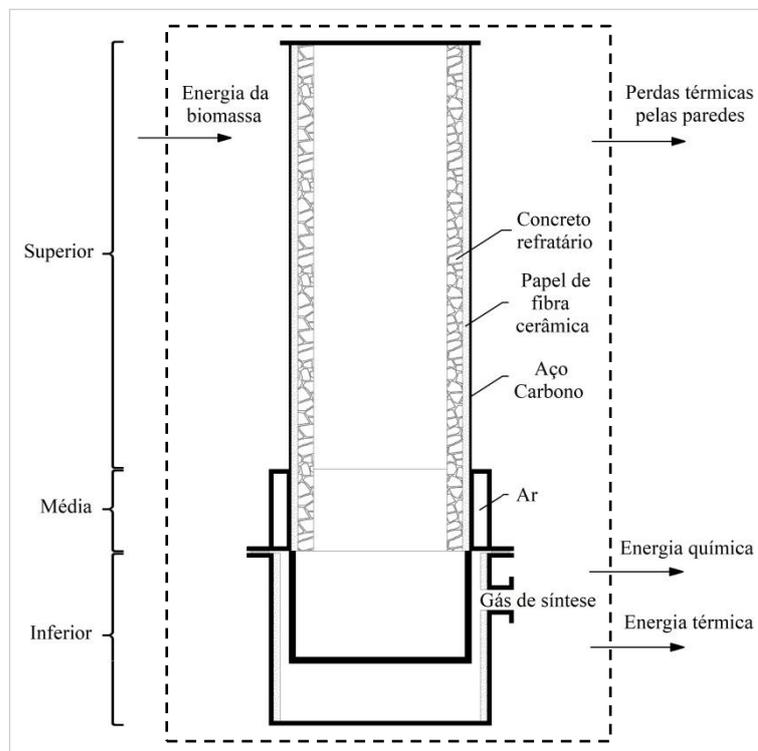
PCI_g = poder calorífico inferior do gás, em MJ/m³;

CO, H₂, CH₄ = concentração média de monóxido de carbono, hidrogênio e metano no gás, respectivamente, em %.

3.3.3 Balanço de massa e energia

Para os cálculos do balanço de massa e energia da gaseificação foi definido o volume de controle como sendo apenas o reator (Figura 2), de acordo com Andrade (2007). Nesse volume foi considerado como entradas, o consumo de biomassa, e saídas, a energia química e térmica do gás e as perdas de calor pelas paredes do reator. O restante da energia disponível da biomassa foi atribuído como outros produtos.

Figura 2 - Esquema definindo o volume de controle para determinação do balanço de massa e energia do reator



Fonte: O autor.

A vazão mássica de biomassa (kg/h) foi estimada pela multiplicação do número de rotações da rosca sem fim por hora (rotações/h) pela capacidade de transporte (kg/rotação). Para cada biomassa foi determinada a capacidade de transporte da rosca sem fim do silo, em kg/volta, e contabilizado o número de voltas da rosca sem fim durante cada gaseificação.

A vazão volumétrica de ar para gaseificação e do gás foi obtida pela multiplicação da velocidade de escoamento do fluido pela respectiva área da tubulação, conforme Equação 2. A velocidade de escoamento foi estimada a partir da pressão dinâmica, obtida por meio de tubos *pitot* acoplados a um manômetro, e da densidade do respectivo fluido, conforme Equação 3. Em ambos os casos, juntamente com a pressão dinâmica, foi coletada a temperatura para posterior obtenção da vazão volumétrica em condições normais de temperatura e pressão (ANDRADE, 2007), conforme Equação 4.

$$Q = V A 3600 \quad (2)$$

Em que:

Q = vazão volumétrica do fluido, em m^3/h ;

V = velocidade do fluido, em m/s ;

A = área da seção transversal da tubulação, em m^2 .

$$V = \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho_f}} \quad (3)$$

Em que:

V = velocidade do fluido, em m/s ;

Δp = diferença de pressão obtida pelo manômetro (pressão dinâmica), em Pascal (Pa);

ρ_f = densidade do fluido, em kg/m^3 .

$$Q_N = Q \left[\frac{273,15}{(273,15 + T)} \right] \quad (4)$$

Em que:

Q_N = vazão volumétrica em condições normais (0 °C e 1 atm), em Nm^3/h ;

Q = vazão volumétrica do fluido, em m^3/h ;

T = temperatura do fluido, em K.

A energia total disponível na biomassa foi calculada multiplicando a vazão mássica de biomassa pelo poder calorífico útil, conforme a Equação 5 (ANDRADE, 2007). Foi considerado que 1 kW é igual a 1 J/s.

$$q_T = m_b PCU_b \quad (5)$$

Em que:

q_T = taxa de calor total disponível, em kW;

m_b = vazão mássica de biomassa, em kg/h ;

PCU_b = poder calorífico útil da biomassa, em MJ/kg.

A energia química disponível no gás foi obtida pela multiplicação da vazão volumétrica de gás pelo seu poder calorífico inferior, conforme a Equação 6 (ANDRADE, 2007). Foi considerado que 1 kW é igual a 1 J/s.

$$q_g = Q_g \text{ PCI}_g \quad (6)$$

Em que:

q_g = taxa de calor disponível no gás produzido, em kW;

Q_g = vazão volumétrica de gás, em Nm³/h;

PCI_g = poder calorífico inferior do gás, em MJ/Nm³.

O calor perdido pelo gás para o meio foi estimado de acordo com a metodologia descrita por Andrade (2007), conforme a Equação 7. Foi considerado que 1 kW é igual a 1 J/s.

$$q_{gpm} = m_g c_{p_g} (T_g - T_a) \quad (7)$$

Em que:

q_{gpm} = taxa de perda de calor pelo gás para o meio, em kW;

m_g = vazão mássica de gás, em kg/h;

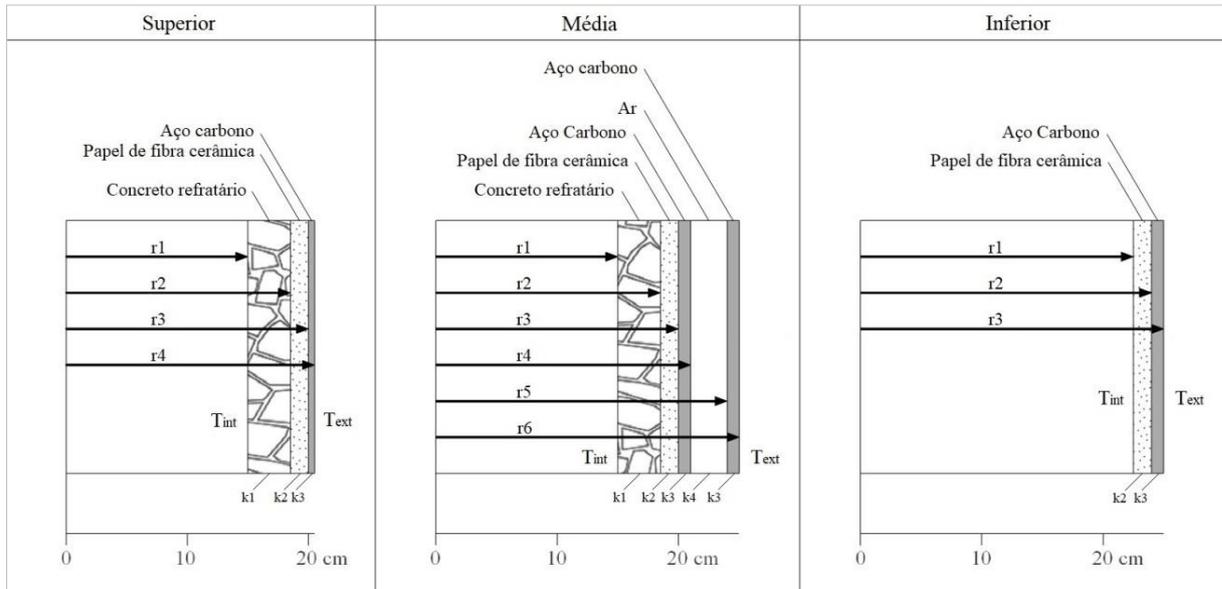
c_{p_g} = calor específico do gás, em KJ/kgK;

T_g = temperatura de saída do gás do reator, em K;

T_a = temperatura ambiente, em K.

As perdas de calor por condução pelas paredes do reator foram estimadas conforme a Equação 8 (ANDRADE, 2007), considerando as seções superior, média e inferior como apresentado na Figura 2. Cada uma das seções foi construída com diferentes camadas e materiais, como mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Composição das paredes do reator nas seções superior, média e inferior



Fonte: O autor.

$$q_{cd.} = \frac{(T_{int} - T_{ext})}{\sum_{i=1}^n \frac{\ln(r_{ext}/r_{int})}{2 \pi k L}} / 1000 \quad (8)$$

Em que:

$q_{cd.}$ = taxa de perda de calor por condução pela parede para o meio, em kW;

T_{int} = temperatura interna do reator, em K;

T_{ext} = temperatura externa da parede do reator, em K;

r_{ext} = raio externo do i-ésimo componente da parede, em m;

r_{int} = raio interno do i-ésimo componente da parede, em m;

k = condutividade térmica do material do i-ésimo componente da parede, em W/mK;

L = altura da seção, em m.

Foi considerando como “outros produtos” o carvão não convertido em gás, a energia térmica contida nas cinzas, a energia química do alcatrão, a energia gasta para manutenção da temperatura do reator e as demais perdas de calor que não foram identificadas durante a execução dos ensaios de gaseificação.

3.3.4 Eficiências do reator

A eficiência a frio foi obtida pela relação entre a energia química do gás e a da biomassa, Equação 9. A eficiência a quente considerou ainda a energia térmica liberada para o meio pelo gás, Equação 10 (ANDRADE, 2007).

$$\eta_f = \left(\frac{PCI_g Q_g}{PCI_b m_b} \right) 100 \quad (9)$$

$$\eta_q = \left(\frac{PCI_g Q_g + q_{gpm}}{PCI_b m_b} \right) 100 \quad (10)$$

Em que:

η_f = eficiência a frio da gaseificação, em %;

η_q = eficiência a quente da gaseificação, em %;

PCI_g = poder calorífico inferior do gás, em MJ/Nm³;

Q_g = vazão volumétrica do gás, em Nm³/h;

PCI_b = poder calorífico inferior da biomassa, em MJ/kg;

m_b = vazão mássica de biomassa, em kg/h;

q_{gpm} = taxa de perda de calor pelo gás para o meio, em MJ/h.

3.3.5 Razão de ar

Foi utilizado ar atmosférico como agente de gaseificação. A razão de ar foi calculada pela relação entre a quantidade consumida na gaseificação da biomassa e a quantidade estequiométrica necessária para sua combustão completa, Equação 11 e 12, segundo Guo et al. (2014). Para os cálculos, considerou-se o conteúdo de carbono, hidrogênio, enxofre e oxigênio na biomassa, bem como sua massa, em base seca, e livre de cinzas.

$$RA = (m_a / m_b)_{gaseif} / (m_a / m_b)_{comb} \quad (11)$$

Em que:

RA = razão de ar;

$(m_a / m_b)_{gaseif}$ = relação entre o fluxo mássico de ar e biomassa para gaseificação;

$(m_a / m_b)_{comb}$ = relação entre o fluxo mássico de ar e biomassa para combustão.

$$(m_a / m_b)_{\text{comb}} = \frac{1,293}{0,21} \left(1,866 \frac{C}{100} + 5,55 \frac{H}{100} + 0,7 \frac{S}{100} - 0,7 \frac{O}{100} \right) \quad (12)$$

Em que:

$(m_a / m_b)_{\text{comb}}$ = relação entre o fluxo mássico de ar e biomassa para combustão;

C, H, S, O = conteúdo de carbono, hidrogênio, enxofre e oxigênio na biomassa, respectivamente, em %.

3.3.6 Perfil de temperaturas

O perfil de temperaturas do gaseificador foi determinado para cada biomassa considerando as médias das temperaturas obtidas nas duas gaseificações. Os gráficos foram confeccionados a partir da ignição (tempo zero) até o tempo em que as temperaturas da zona de redução estabilizassem por no mínimo uma hora. Nos gráficos foram plotadas as temperaturas obtidas na zona de combustão, redução e pirólise, a temperatura do gás na saída do reator e a temperatura de chama na câmara de combustão.

A distribuição espacial das temperaturas no reator foi modelada por meio do processo de interpolação Inverso do Quadrado da Distância (IDW), utilizando o *software* R (R CORE TEAM, 2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização das biomassas

As características físicas e químicas das biomassas utilizadas na gaseificação encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Características físicas e químicas das biomassas gaseificadas

Biomassa	Ubs	DG	MV	Carbono Fixo	Cinzas	Extrativos	Lignina	Holocelulose	PCS
	(%)	kg/m ³	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	MJ/kg
Cavacos <i>in natura</i>	15,2	184,5	85,7	13,9	0,4	5,0	27,0	67,6	19,4
Cavacos torreficados	6,8	207,7	80,3	19,3	0,4	9,2	34,4	56,0	20,8
Pellets <i>in natura</i>	3,3	621,4	84,6	14,3	1,1	7,0	29,9	62,0	20,7
Pellets torreficados	2,6	585,9	80,8	17,7	1,5	7,1	39,2	52,1	21,7
Carvão vegetal	10,7	201,9	18,1	81,4	0,6	-	-	-	33,0

Fonte: O autor. Ubs = umidade em base seca; DG = densidade a granel; MV = materiais voláteis; Holocelulose = hemiceluloses mais celulose; PCS = poder calorífico superior.

O teor de umidade dos cavacos torreficados foi 55,3% inferior aos cavacos *in natura*. Os pellets *in natura* tiveram baixo teor de umidade, devido à secagem previa a gaseificação para evitar problemas com o excesso de vapor de água no topo do reator, que tende a desintegrá-los e conseqüentemente reduzir a permeabilidade aos gases na zona de redução. Por isso, os pellets torreficados tiveram apenas uma ligeira redução de umidade em relação aos não torreficados. A umidade do carvão vegetal foi igual a 10,7%, valor alto comparado ao carvão utilizado comercialmente. Este fato é atribuído ao longo tempo de armazenagem, inclusive em épocas chuvosas, fazendo com que absorvesse mais umidade do ambiente. A torrefação ocasiona a redução da umidade da biomassa pela eliminação de componentes estruturais menos estáveis termicamente, como as hemiceluloses, que possuem natureza hidrofílica (PENG et al., 2013). A alta umidade da biomassa reduz a temperatura do reator, demanda maior energia na zona de secagem para remoção da água da biomassa (SUSASTRIAWAN et al., 2017) e tende a produzir gás mais úmido e com menor eficiência de queima.

Observa-se que a densidade a granel dos cavacos aumentou enquanto a dos pellets reduziu com a torrefação. Os pellets possuem em média 3 vezes mais massa por unidade de volume que os cavacos e o carvão, o que pode diminuir sua reatividade na gaseificação pela redução da velocidade de desvolatilização na zona de pirólise. No entanto, biomassas mais densas contém maior quantidade de energia por unidade de volume, necessitam de menor espaço de armazenamento e viabilizam o transporte a maiores distâncias (MUAZU et al., 2017).

Houve efeito positivo da torrefação sobre o poder calorífico superior dos cavacos e dos pellets. Tanto a carbonização quanto a torrefação retiram componentes menos resistentes à temperatura e preservam os mais estáveis, como a lignina, que possuem maior poder calorífico (PENG et al., 2013). Para uma mesma densidade a granel, biomassas com maior poder calorífico possuem densidade energética superior (MAGALHÃES et al., 2018) e podem gerar gás com maior rendimento e poder calorífico (GONZÁLEZ-VÁZQUEZ et al., 2018), no entanto, isso não pode ser tomado como regra, pois esses parâmetros do gás dependem da composição química, granulometria e umidade da biomassa e condições operacionais do reator.

O carvão vegetal possui majoritariamente carbono fixo em sua composição imediata, ao contrário dos pellets e cavacos que possuem maior percentual de materiais voláteis. A torrefação reduziu o conteúdo de materiais voláteis e incrementou o percentual de carbono fixo nos cavacos e nos pellets. O maior conteúdo de materiais voláteis aumenta a liberação de

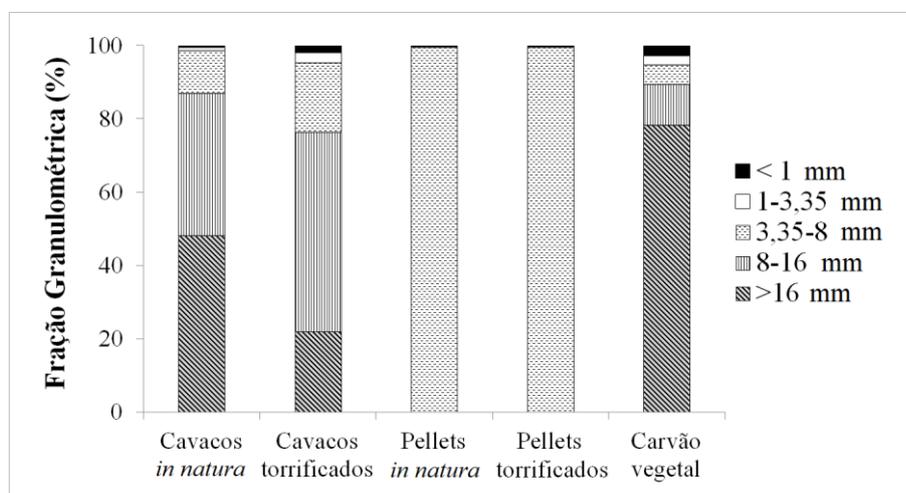
gases da biomassa durante a etapa de pirólise no reator, e conseqüentemente pode favorecer a produção, rendimento e o poder calorífico do gás (GONZÁLEZ-VÁZQUEZ et al., 2018).

O maior conteúdo de cinzas foi encontrado nos pellets, sendo incrementado com a torrefação. Para essas biomassas foi observada a formação de depósitos próximos às entradas de ar no reator, provenientes da fusão das cinzas. A biomassa, de modo geral, possui baixo teor de cinzas, no entanto, segundo Nunes et al. (2016), dependendo de sua composição e quantidade pode ocorrer a fusão e formação de depósitos, interferindo no funcionamento e levando a paradas não programadas dos sistemas para manutenção.

A torrefação promoveu o aumento do teor de extrativos, enquanto o teor de lignina aumentou proporcionalmente à redução do teor de holocelulose (celulose e hemiceluloses) tanto nos cavacos quanto nos pellets. As hemiceluloses são componentes estruturais menos estáveis termicamente na madeira, sendo degradados em menores temperaturas e responsáveis pela liberação de materiais voláteis (PARK et al., 2013), que na gaseificação são liberados na etapa de pirólise e na zona de redução participam das reações formadoras de gás.

Na Figura 4 observa-se que a torrefação dos cavacos aumentou o percentual de massa de frações granulométricas menores, não havendo esse efeito sobre os pellets. O carvão possui 79,3% da fração granulométrica superior a 16 mm, enquanto que os pellets possuem em média 99,6% da fração granulométrica entre 3,35 a 8 mm. Os cavacos *in natura* possuíam 48,3% de suas partículas maiores que 16 mm, enquanto os torrificados possuíam 54,4% de suas partículas com tamanho entre 8 e 16 mm. A menor granulometria favorece a desvolatilização da biomassa e produção de gás (HERNÁNDEZ et al., 2010), porém partículas muito pequenas e baixa mobilidade podem formar bolsões no gaseificador e nos silos.

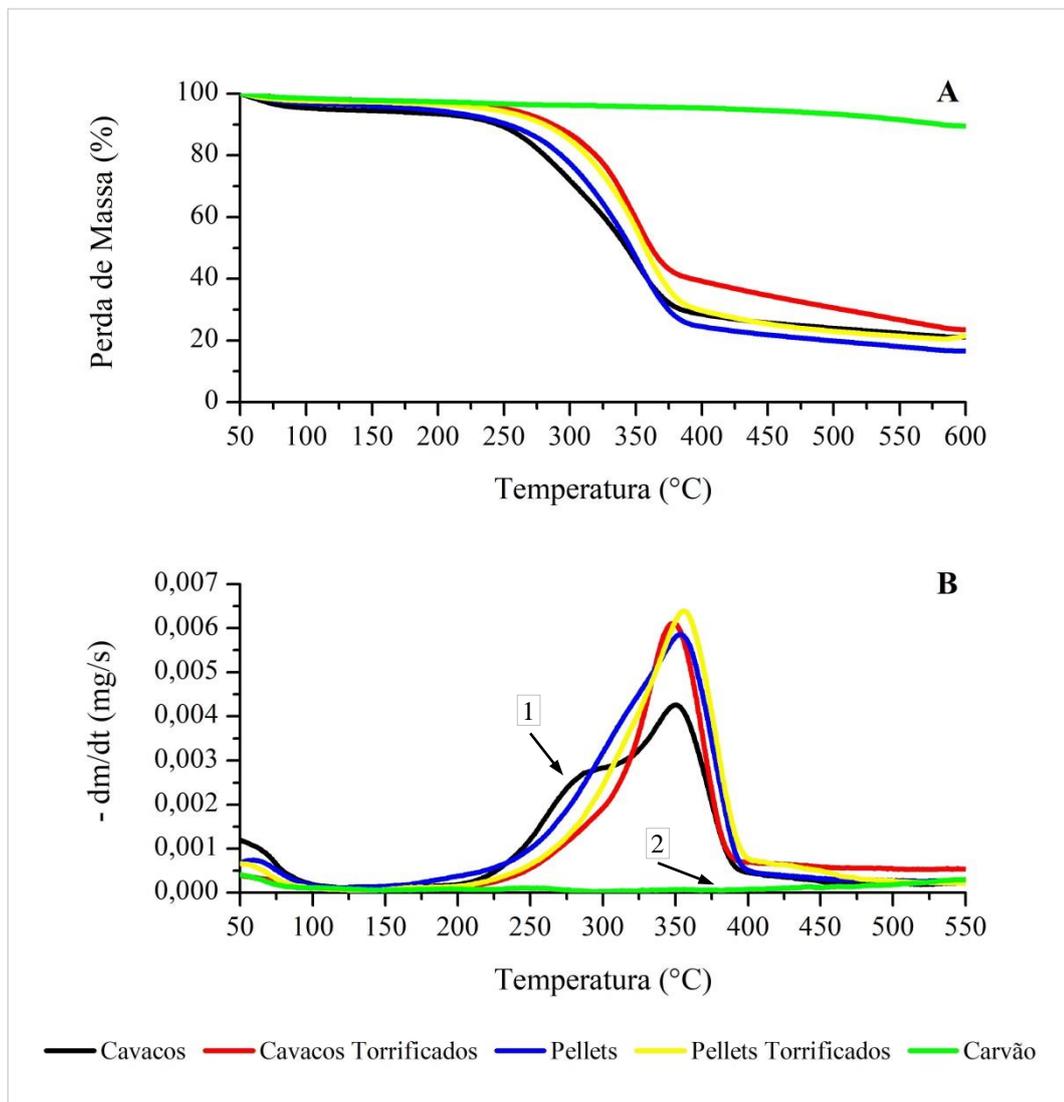
Figura 4 - Granulometria das biomassas utilizadas para gaseificação



Fonte: O autor.

Observa-se nas curvas termogravimétricas (TG) mostradas na Figura 5-A que o tratamento térmico aumentou a resistência à degradação térmica tanto dos cavacos quanto dos pellets. O carvão vegetal possui maior estabilidade térmica devido a estrutura rica em carbono. Na Figura 5-B fica evidente a presença de hemiceluloses nos cavacos *in natura*, observado pelo pico de degradação térmica na curva de DTG em temperaturas próximas a 300°C (seta 1). As biomassas torrificadas tiveram faixa de degradação térmica reduzida, com a máxima perda de massa próxima aos 350 °C. O carvão vegetal possui baixa perda de massa, sendo progressiva acima dos 400 °C (seta 2), a qual está associada a temperatura de sua produção.

Figura 5 - Curvas de TG (A) e DTG (B) para as biomassas utilizadas para gaseificação



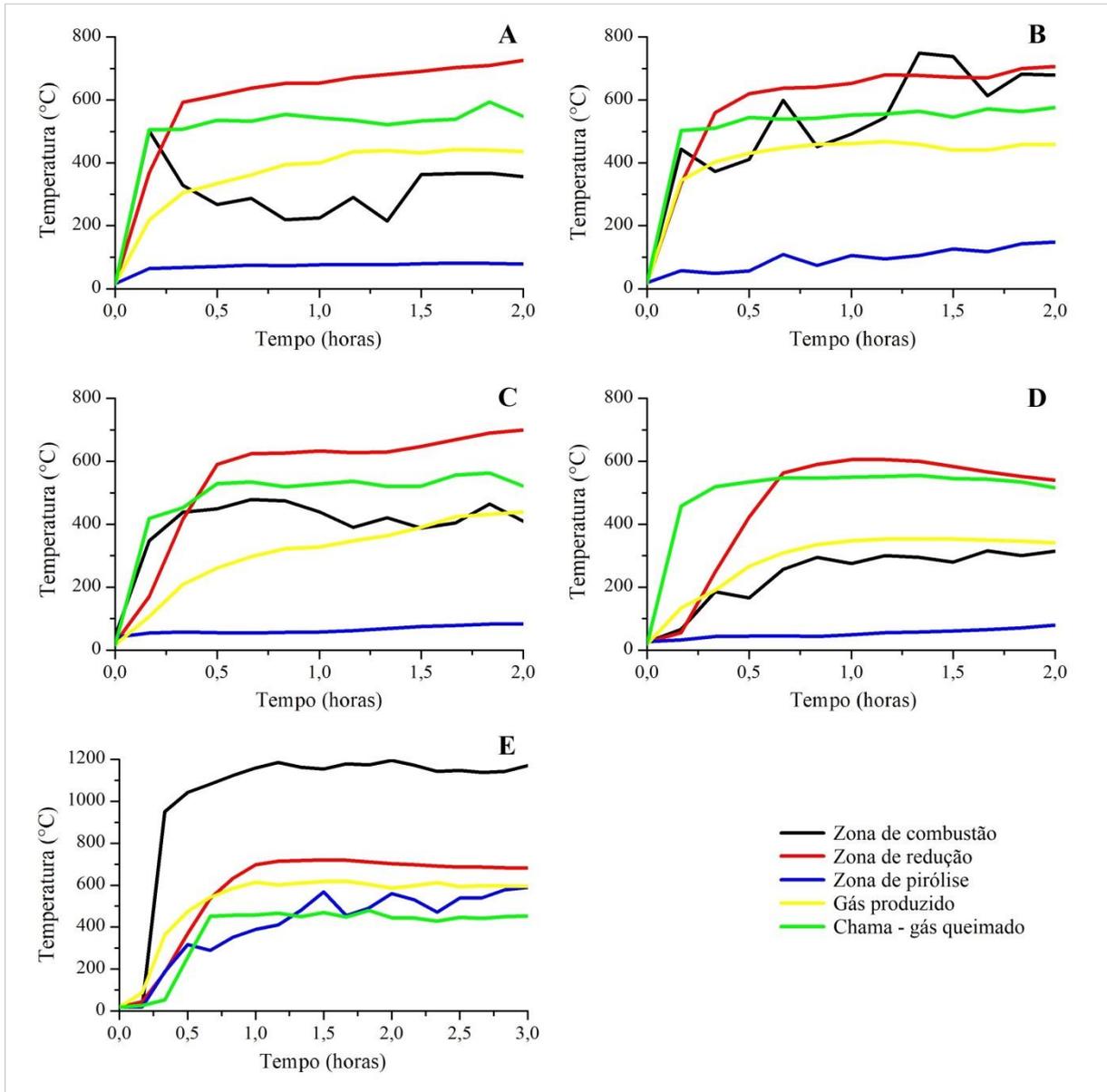
Fonte: O autor.

4.2 Perfil de temperaturas do reator

Analisando a Figura 6, observa-se que as temperaturas mais estáveis da chama e de saída do gás do reator foram obtidas nas gaseificações com as biomassas torrificadas e com carvão.

Constatou-se maior variação das temperaturas na zona de combustão para as gaseificações com cavacos *in natura* e torrificados em relação às demais biomassas. A maior temperatura na zona de combustão foi observada na gaseificação realizada com carvão vegetal. Vale lembrar que para essa biomassa, a temperatura na zona de combustão foi restringida ao limite de medição dos termopares. As temperaturas da zona de redução apresentaram menor variação independente da biomassa gaseificada, com valores entre 575 e 697 °C.

Figura 6 - Perfil de temperaturas das gaseificações com cavacos *in natura* (A), cavacos torreficados (B), pellets *in natura* (C), pellets torreficados (D) e carvão vegetal (E)



Fonte: O autor.

A zona de combustão foi delimitada como a região próxima à entrada de ar no reator, onde ocorrem reações de oxidação da biomassa e, geralmente, são observadas as maiores temperaturas. No entanto, neste trabalho observou-se maior temperatura na zona de combustão apenas na gaseificação com carvão vegetal, devido a sua menor produção de gás e, conseqüente, fluxo de biomassa mais lento no reator, favorecendo a estabilização das temperaturas e o estabelecimento das zonas de reação, Figura 7-E.

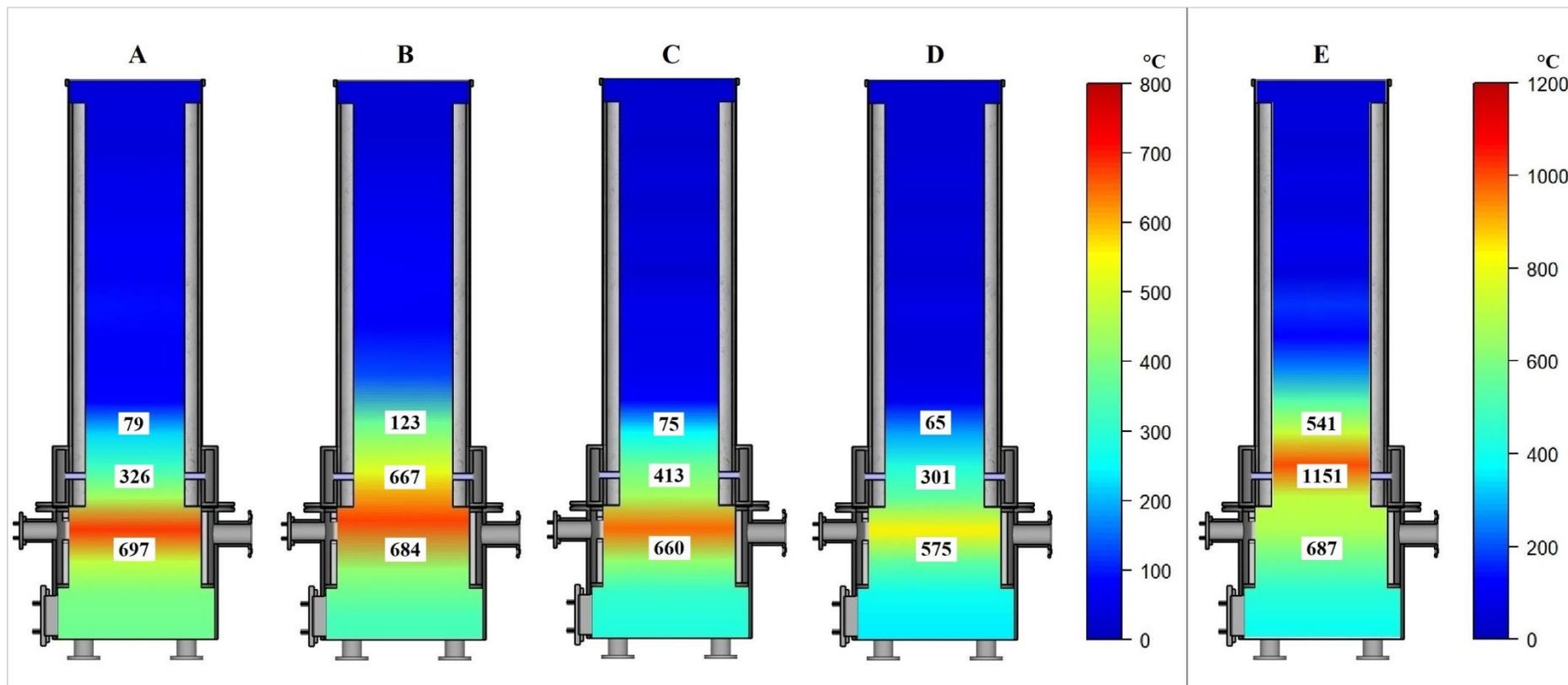
Nas gaseificações feitas com cavacos e pellets, *in natura* e torreficados, a zona de maior temperatura foi deslocada para a parte inferior do reator, sendo essa tendência atribuída

ao maior fluxo de biomassa e gases no sentido descendente, Figura 7. Para os cavacos torrificados, as zonas de reação foram maiores em relação aos não torrificados. Por outro lado, não foi observada a mesma tendência para os pellets *in natura* e torrificados. As menores temperaturas médias registradas, em todo o reator, foram observadas na gaseificação com pellets torrificados, Figura 7.

A movimentação descendente da zona de combustão limitou a zona de redução, desfavorecendo as reações que formam os gases combustíveis. Isso sugere a inserção de uma barreira física na parte superior da grelha vertical, que força os gases a passarem por toda a zona de redução antes de sair do reator.

Para todas as biomassas gaseificadas, a metade superior do reator atingiu temperaturas estáveis e inferiores a 110 °C (Figura 7), evidenciando a possibilidade de redução da altura do reator em projetos futuros. Vale ressaltar que essa região do reator não pode ser totalmente retirada, pois desempenha a importante função de secagem da biomassa.

Figura 7 - Esquemas com temperaturas médias após a estabilização do reator para as gaseificações com cavacos *in natura* (A), cavacos torrificados (B), pellets *in natura* (C), pellets torrificados (D) e carvão vegetal (E)



Fonte: O autor.

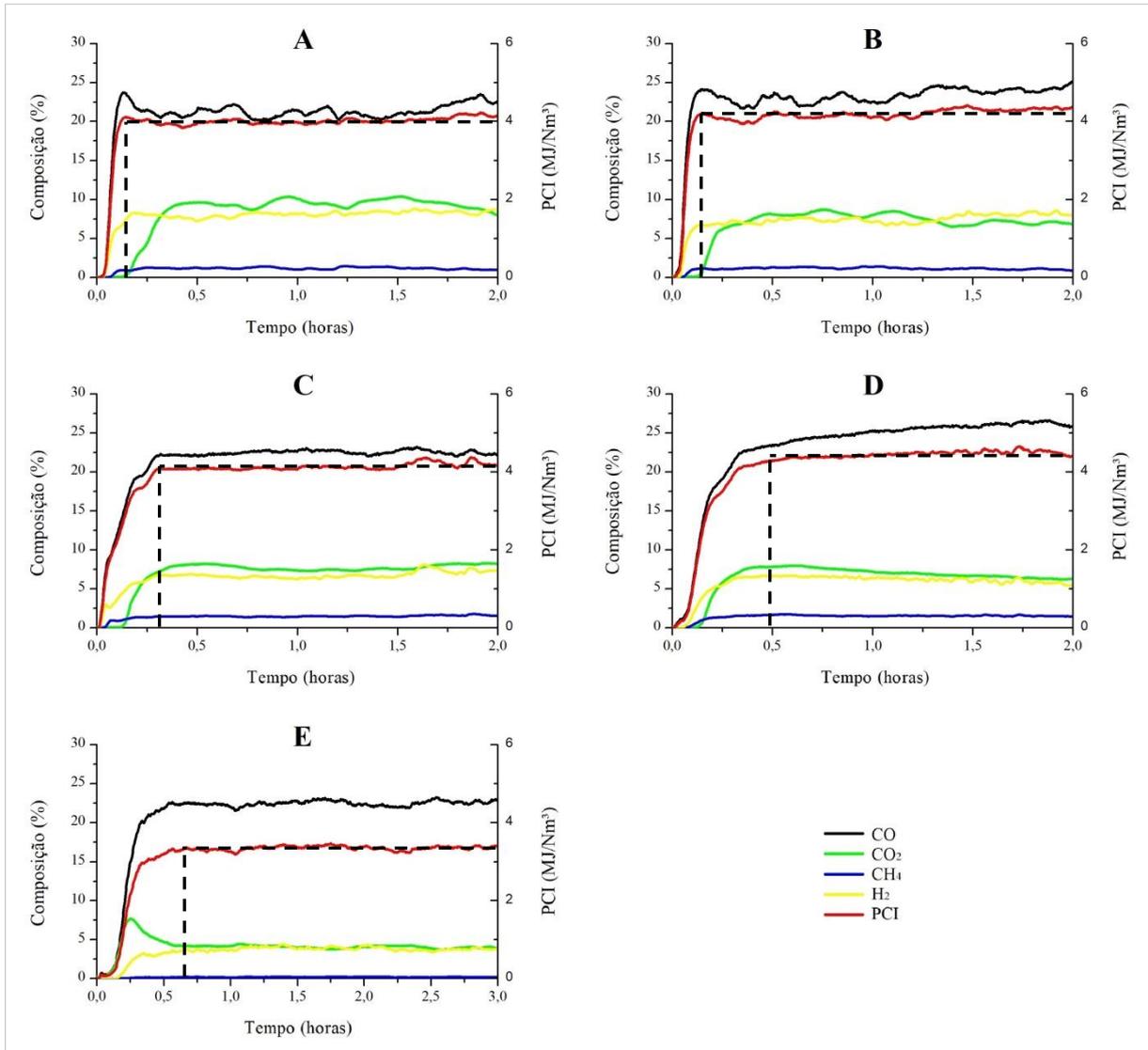
4.3 Composição do gás

Observa-se, na Figura 8, a tendência de redução do tempo necessário para estabilização dos gases combustíveis (CO, CH₄ e H₂) e conseqüentemente do poder calorífico do gás obtido da gaseificação dos cavacos torreficados em comparação com os *in natura*, o oposto foi observado nas gaseificações com pellets. A gaseificação com carvão demandou maior tempo para alcançar temperaturas que favorecessem as reações de redução e, conseqüentemente, a estabilização da composição dos gases. Na prática é desejável que tanto a vazão do gás quanto sua composição estabilize rapidamente, reduzindo assim o tempo de partida do gaseificador e o consumo de biomassa.

Para todas as biomassas, a variação do poder calorífico inferior do gás foi influenciada pela alteração no conteúdo de monóxido de carbono, devido a este ser o componente majoritário do gás, Figura 8.

O principal efeito da torrefação e peletização das biomassas foi o maior tempo até a estabilização da composição do gás, Figura 8. A peletização reduz a porosidade da biomassa, dificultando sua desvolatilização e a ocorrência das reações entre o meio sólido e gasoso. A torrefação promove a eliminação de parte dos componentes voláteis da biomassa, os quais podem ter papel fundamental nas reações de redução e na vazão de gás. O carvão vegetal possui o conteúdo materiais voláteis significativamente menor em relação às demais biomassas, explicando o maior tempo de estabilização da composição de seus gases.

Figura 8 - Composição e poder calorífico inferior do gás obtido dos cavacos *in natura* (A), cavacos torreficados (B), pellets *in natura* (C), pellets torreficados (D) e carvão vegetal (E).



Fonte: O autor. CO = monóxido de carbono; CO₂ = dióxido de carbono; CH₄ = metano; H₂ = hidrogênio; PCI = poder calorífico inferior. Linha pontilhada corresponde ao momento da estabilização do poder calorífico inferior do gás.

Observa-se, na Tabela 2, que as gaseificações realizadas com biomassas torreficadas produziram gás com maior percentual de CO (+ 12,7%) e menor de CO₂ (- 18,4%) e H₂ (- 12,1%) em relação às com biomassas *in natura*. O menor percentual de CO₂ pode estar relacionado a redução de compostos oxigenados durante a torrefação das biomassas.

Verificou-se a redução do percentual de metano apenas no gás obtido dos cavacos torreficados comparado ao dos *in natura*. O gás obtido na gaseificação com carvão apresentou menores concentrações de CO₂, CH₄, H₂ e poder calorífico inferior. Os maiores valores de poder calorífico inferior do gás foram obtidos dos cavacos e pellets torreficados.

Tabela 2 - Propriedades do gás e parâmetros do reator em função do tipo de biomassa gaseificada

Biomassa	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂	CO/CO ₂	H ₂ /CO	PCI	RA	η _{frio}	η _{quente}
	%	%	%	%			MJ/Nm ³	-	%	%
Cavacos	21,4	9,3	1,2	8,5	2,30	0,40	4,07	0,44	53,1	62,7
	(1,18)	(0,86)	(0,01)	(0,72)			(0,07)	(0,06)	(0,02)	(0,02)
Cavacos Torrificados	23,9	7,3	1,1	7,7	3,27	0,32	4,27	0,48	53,3	62,7
	(0,57)	(0,22)	(0,07)	(0,54)			(0,04)	(0,03)	(0,05)	(0,05)
Pellets	22,8	7,9	1,6	7,1	2,89	0,31	4,21	0,41	47,9	55,7
	(2,09)	(0,57)	(0,16)	(0,49)			(0,27)	(0,16)	(0,15)	(0,19)
Pellets Torrificados	25,9	6,7	1,6	6,1	3,87	0,23	4,50	0,24	30,0	33,9
	(0,02)	(0,15)	(0,07)	(0,08)			(0,03)	(0,003)	(0,04)	(0,04)
Carvão Vegetal	22,5	4,0	0,2	3,8	5,57	0,17	3,34	0,69	20,5	26,8
	(0,12)	(0,34)	(0,04)	(0,15)			(0,05)	(0,12)	(0,01)	(0,01)

Fonte: O autor. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão. CO = monóxido de carbono; CO₂ = dióxido de carbono; CH₄ = metano; H₂ = hidrogênio; CO/CO₂ = relação entre monóxido de carbono e dióxido de carbono; H₂/CO = relação entre hidrogênio e monóxido de carbono; PCI = poder calorífico inferior; RA = razão de ar; η_{frio} = eficiência a frio; η_{quente} = eficiência a quente.

O aumento da relação entre CO e CO₂ deveria ter correlação positiva com o rendimento das gaseificações devido ao menor percentual de gases totalmente oxidados, no entanto, foi observado o oposto. Supõe-se que o rendimento esteja mais relacionando a vazão do que a composição do gás, assim a presença de mais componentes oxigenados nas biomassas *in natura* teria maior relação com o percentual de CO₂ no gás e também com a vazão, o que não é observado nas biomassas torrificadas e no carvão.

A razão de ar obtida para as biomassas gaseificadas foi superior aos valores mencionados pela literatura, exceto para os pellets torrificados. O alto valor obtido para o carvão vegetal sugere a predominância de reações de oxidação parcial do carbono em relação à redução (LAN et al., 2018), justificando as elevadas temperaturas registradas em todo o reator e a alta relação entre CO e CO₂.

A baixa razão de ar verificada na gaseificação realizada com pellets torrificados corrobora com as menores temperaturas obtidas em todo o reator, o que provavelmente interferiu de forma negativa na vazão de gás, no entanto, positivamente sob sua composição.

São citados valores típicos da razão de ar entre 0,2 e 0,4 para gaseificação de biomassa (PEREIRA et al., 2012). Segundo Ahmad et al. (2016) a baixa razão de ar reduz a temperatura do reator e, conseqüentemente, a velocidade das reações na zona de redução, as quais são responsáveis pela produção de gás. Vale destacar que não foi possível alterar a razão de ar do

gaseificador devido ao efeito direto da vazão do ar sobre o consumo de biomassa. Dessa forma, não foi possível adotar a razão de ar recomendada pela literatura.

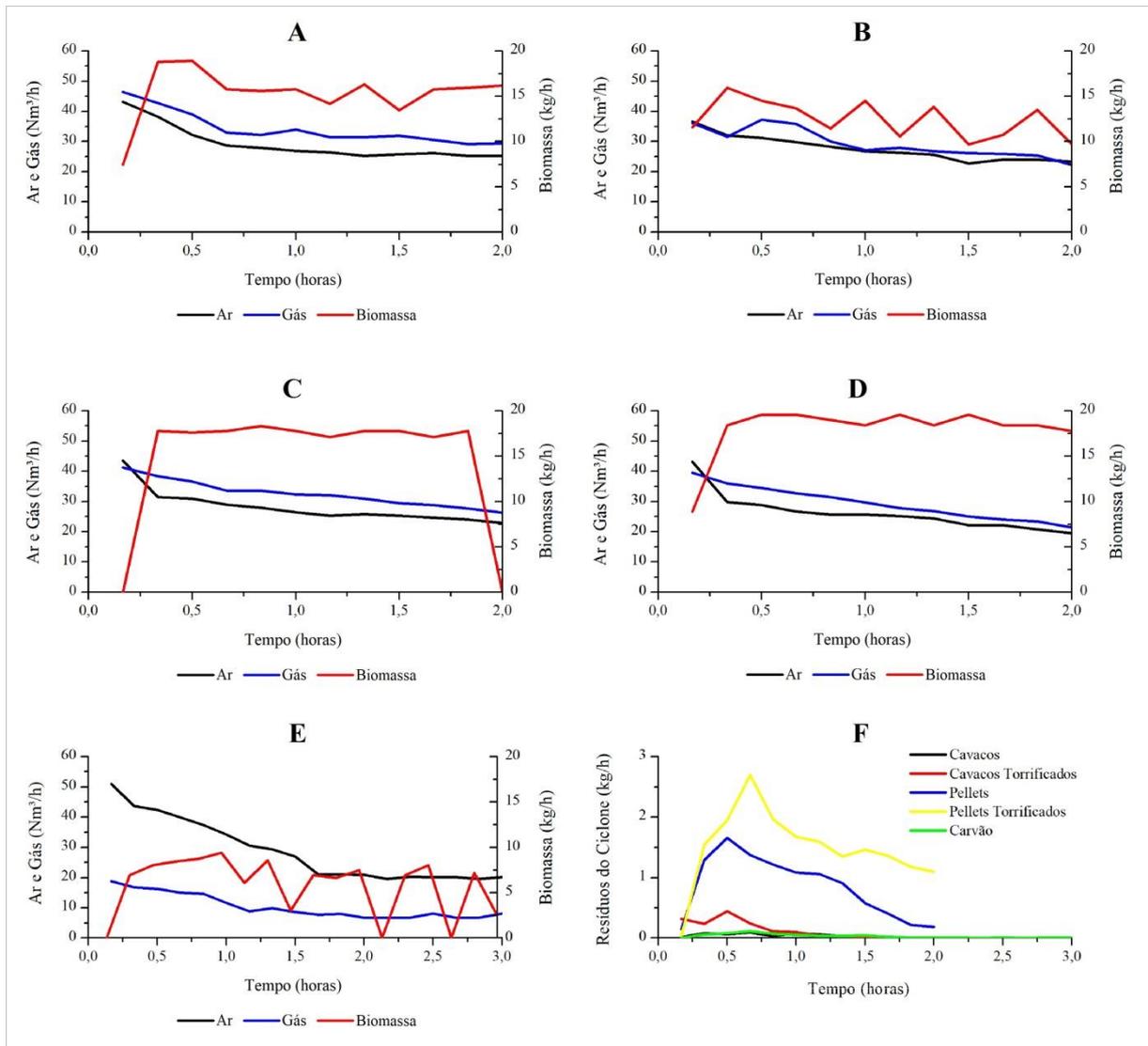
As maiores eficiências foram obtidas nas gaseificações com cavacos, não havendo diferenças entre os *in natura* e os torrificados. A menor eficiência foi observada na gaseificação com carvão vegetal, possivelmente aos efeitos combinados da maior granulometria, menor percentual de materiais voláteis e elevadas temperaturas do reator. Os pellets *in natura* tiveram eficiências significativamente superiores aos torrificados. Os menores rendimentos obtidos nas gaseificações com biomassas torrificadas em relação às *in natura* sugerem que a torrefação pouco favoreceu a produção de gás.

Visando o uso energético é desejável maior poder calorífico do gás, no entanto é importante considerar a eficiência do sistema de gaseificação em função do tipo de biomassa utilizada. Quando o objetivo é a transformação do gás em produtos químicos e combustíveis líquidos ou gasosos, torna-se necessário incrementar o conteúdo de H₂ em detrimento aos demais gases, a exemplo, a reação de *Fischer-Tropsch* que demanda a relação H₂/CO igual ou superior a 2:1 (MOLINO et al., 2016), a melhor relação obtida neste trabalho foi de 0,40 para os cavacos *in natura*. A redução demasiada da relação H₂/CO pode indicar a predominância de reações de oxidação gerando gases menos energéticos.

4.4 Balanço de massa e energia do sistema

Observa-se, na Figura 9-E, menor vazão do gás na gaseificação realizada com carvão vegetal em relação as demais biomassas, sendo consequência de sua baixa reatividade, a qual está relacionada à maior granulometria (Figura 4) e menor conteúdo de materiais voláteis, Tabela 1. O baixo consumo de carvão vegetal ocasionou maiores variações na alimentação de biomassa

Figura 9 - Vazões volumétricas de gás e ar e vazão mássica de biomassa para as gaseificações com cavacos *in natura* (A), cavacos torrificados (B), pellets *in natura* (C), pellets torrificados (D) e carvão vegetal (E), resíduos separados do gás pelo ciclone (F)



Fonte: O autor.

Nas gaseificações com pellets, *in natura* e torrificados, foi observado o abastecimento mais regular do reator, certamente, devido ao tamanho e forma homogêneos dessas biomassas. A vazão de gás para essas biomassas, apesar de reduzir, foi mais estável em relação às gaseificações com as demais biomassas.

Considerando a mesma granulometria (Figura 4) e vazões próximas de biomassa (Figura 9-C e Figura 9-D), a vazão do gás obtido na gaseificação com pellets torrificados foi menor que com pellets *in natura*, o que afetou negativamente o rendimento, Figura 10.

Devido à redução da vazão do gás ao longo das gaseificações com cavacos e pellets, *in natura* e torrificados, sugere-se a retirada do carvão residual formado na zona de redução do

reator, pois o mesmo produz gás com menor vazão e qualidade. Acredita-se que esse procedimento possa aumentar a eficiência do gaseificador em razão de manter a maior vazão do gás, sem alterar o fornecimento de ar e biomassa ao reator.

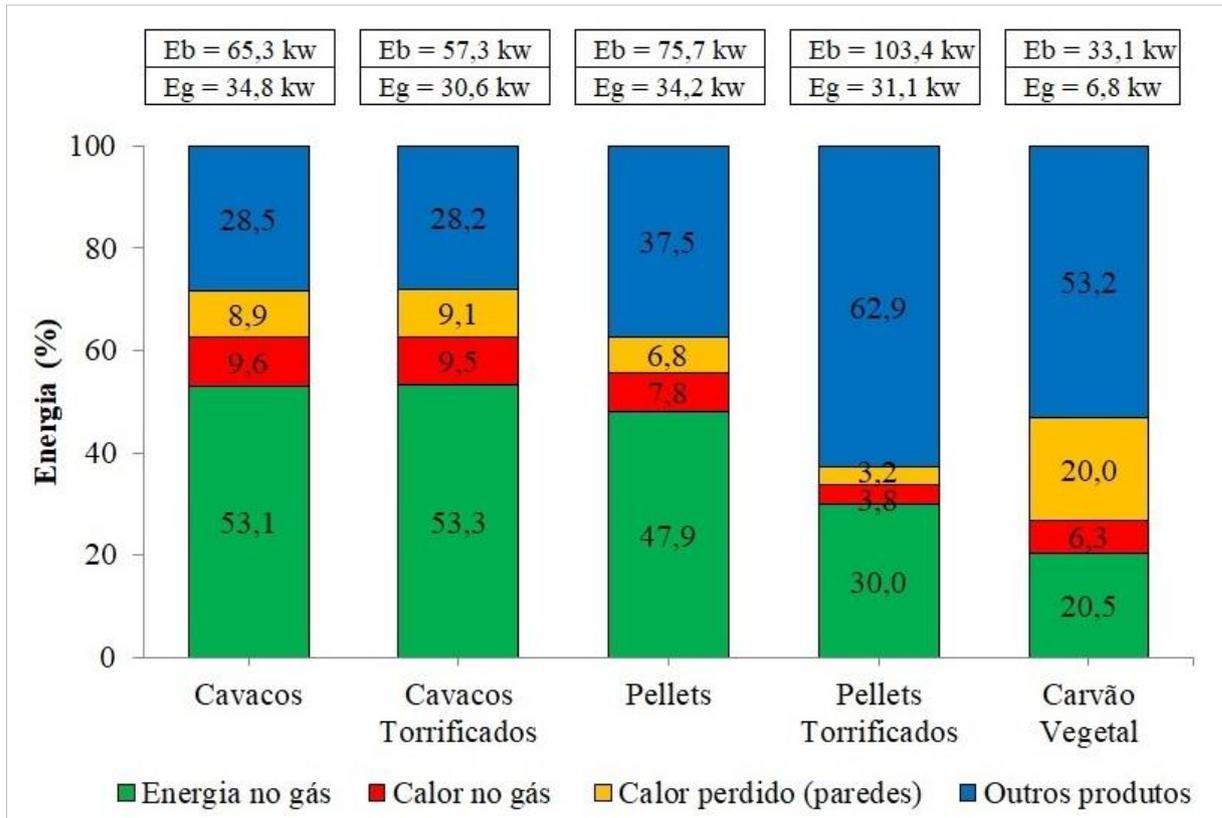
Observa-se, na Figura 9-F, que houve maior geração de resíduos nas gaseificações realizadas com pellets torreficados, seguido pelos pellets *in natura* e cavacos torreficados, evidenciando que a torrefação teve efeito negativo sobre a qualidade do gás. A geração de resíduos foi mais intensa no início das gaseificações e depois reduzida juntamente com a vazão de gás no decorrer do processo. Atribui-se esse fenômeno à formação de carvão na zona de redução, o qual gerou menor quantidade de resíduos.

Os resíduos coletados no ciclone provenientes das gaseificações feitas com carvão vegetal eram compostos, predominantemente, por pequenas partículas de carvão, não havendo presença de alcatrão. Em contrapartida, os resíduos obtidos para as demais biomassas eram de natureza líquida, com elevado conteúdo de água, presença de licor pirolenhoso e em alguns casos composto por uma fração densa, de aspecto pegajoso e imiscível na fase aquosa.

Observa-se, na Figura 10, maior taxa de calor no gás produzido nas gaseificações com cavacos *in natura* e torreficados, sendo atribuído às maiores vazões e temperaturas de saída dos gases do reator. As perdas de calor pela parede do reator foram maiores na gaseificação com carvão vegetal devido às elevadas temperaturas alcançadas. A fração de “outros produtos” foi maior nas gaseificações feitas com pellets *in natura* e torreficados e também com carvão vegetal, em função da menor conversão dessas biomassas em gás.

De modo geral, a operação do gaseificador foi simplificada nas gaseificações com cavacos, nas quais o sistema funcionava com maior estabilidade e independência do operador. As gaseificações com pellets foram mais trabalhosas, necessitando da secagem prévia devido a esse tipo de biomassa sofrer com o efeito da própria umidade no interior do reator. Nas gaseificações com carvão vegetal o maior desafio foi controlar a temperatura do equipamento para que não ultrapassasse o limite dos termopares e não afetassem a estrutura do reator.

Figura 10 - Balanço de energia em função da biomassa gaseificada



Fonte: O autor. Eb = energia na biomassa; Eg = energia no gás; Outros produtos = carvão não convertido em gás, energia térmica contida nas cinzas, energia química do alcatrão, energia gasta para manutenção da temperatura do reator e as demais perdas de calor que não foram identificadas.

A torrefação dos pellets teve efeito negativo sobre o rendimento em gás. Atribui-se esse resultado a redução de sua reatividade, causada pela combinação do tratamento térmico e da compactação, os quais diminuem a porosidade e a taxa de desvolatilização da biomassa.

O aproveitamento da biomassa foi mais efetivo nas gaseificações com cavacos *in natura* e torrificados, nas quais a energia referente à biomassa inserida no reator foi de 65,3 e 57,3 kw, respectivamente. Enquanto foram produzidos 34,8 e 30,6 kw de energia no gás, respectivamente, para os cavacos *in natura* e torrificados. O maior fluxo de energia da biomassa foi observado nas gaseificações com pellets torrificados, 103,4 kw, porém apenas 31,1 kw foram transferidos ao gás produzido. Sendo confirmado pelo seu baixo rendimento. Os menores fluxos de energia foram referentes às gaseificações com carvão vegetal, 33,1 kw para biomassa e 6,8 kw no gás, confirmando sua baixa produção de gás e rendimento.

5 CONCLUSÕES

A gaseificação de cavacos, pellets e carvão no gaseificador de leito fixo concorrente foi tecnicamente viável, no entanto, o desempenho e operação do reator foram afetados pelas características químicas e físicas de cada biomassa.

A vazão do gás diminuiu ao longo da gaseificação para todas as biomassas avaliadas.

A torrefação dos cavacos e pellets reduziu os percentuais de CO₂ (- 18,4%) e H₂ (- 12,1%), enquanto aumentou o de CO (+ 12,7%) no gás, contribuindo positivamente para o aumento do poder calorífico inferior.

O carvão vegetal produziu gás com composição inferior em relação aos demais, no entanto com menor quantidade de resíduos.

Os perfis de temperaturas obtidos nas gaseificações com cavacos e pellets, *in natura* e torreficados, evidenciaram o movimento descendente da zona de combustão e, portanto, limitando a zona de redução do reator.

As maiores eficiências foram obtidas nas gaseificações com cavacos, em média 53,2% de eficiência a frio, não havendo diferenças entre os *in natura* e os torreficados.

O balanço de energia indicou que uma parcela significativa da energia das biomassas foi definida como “outros produtos”, em média 42%. Acredita-se que a biomassa parcialmente gaseificada possa compor a maior parte desta parcela.

Visando aumentar a conversão das biomassas em gás, recomenda-se como melhorias para o gaseificador, a criação de uma barreira física para aumentar o tempo de residência dos gases na zona de redução e também a retirada do carvão acumulado nesta zona do reator.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8112: Análise química imediata do carvão vegetal**. Rio de Janeiro, : 8 p. 1986.

AHMAD, A. A.; ZAWAWI, N. A.; KASIM, F. H.; INAYAT, A.; KHASRI, A. Assessing the gasification performance of biomass: A review on biomass gasification process conditions, optimization and economic evaluation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1333-1347, 2016.

ANDRADE, R. V. **Gaseificação de Biomassa: Uma Análise Teórica e Experimental**. 2007. 227 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2007.

DIN - Deutsche Institut für Normung. **EN 14774-1: Determination of moisture content – Oven dry method – Part 1: Total moisture – Reference method.** Berlin: CEN: 10 p. 2010a.

DIN - Deutsche Institut für Normung. **EN 14918: Determination of calorific value.** Berlin: CEN: 63 p. 2010b.

DIN - Deutsche Institut für Normung. **EN 15103: Solid biofuels - Determination of bulk density.** Berlin: CEN: 14 p. 2010c.

DIN - Deutsche Institut für Normung. **EN 15149-1: Solid biofuels - Determination of particle size distribution - Part 1: Oscillating screen method using sieve apertures of 1 mm and above.** Berlin: CEN: 17 p. 2011.

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V. e LUDWIG, C. H. (Eds.). **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions.** ed. New York: J. Wiley, 1971. p. 241-266.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O papel**, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.

GONZÁLEZ-VÁZQUEZ, M. P.; GARCÍA, R.; GIL, M. V.; PEVIDA, C.; RUBIERA, F. Comparison of the gasification performance of multiple biomass types in a bubbling fluidized bed. **Energy Conversion and Management**, v. 176, p. 309-323, 2018.

GUO, F.; DONG, Y.; DONG, L.; GUO, C. Effect of design and operating parameters on the gasification process of biomass in a downdraft fixed bed: An experimental study. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 11, p. 5625-5633, 2014.

HERNÁNDEZ, J. J.; ARANDA-ALMANSA, G.; BULA, A. Gasification of biomass wastes in an entrained flow gasifier: Effect of the particle size and the residence time. **Fuel Processing Technology**, v. 91, n. 6, p. 681-692, 2010.

LAN, W.; CHEN, G.; ZHU, X.; WANG, X.; WANG, X.; XU, B. Research on the characteristics of biomass gasification in a fluidized bed. **Journal of the Energy Institute**, 2018.

MAGALHÃES, M. A. D.; CARNEIRO, A. D. C. O.; VITAL, B. R.; SILVA, C. M. S. D.; COSTA, E. V. S.; TRUGILHO, P. F. CHEMICAL PROPERTIES OF PELLETS OF *Pinus* sp. TORREFIED IN A SCREW TYPE REACTOR. **2018**, v. 48, n. 4, p. 10, 2018.

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.

MUAZU, R. I.; BORRION, A. L.; STEGEMANN, J. A. Life cycle assessment of biomass densification systems. **Biomass and Bioenergy**, v. 107, p. 384-397, 2017.

NUNES, L. J. R.; MATIAS, J. C. O.; CATALÃO, J. P. S. Biomass combustion systems: A review on the physical and chemical properties of the ashes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 235-242, 2016.

PANWAR, N. L.; KOTHARI, R.; TYAGI, V. V. Thermo chemical conversion of biomass – Eco friendly energy routes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 4, p. 1801-1816, 2012.

PARK, J.; MENG, J. J.; LIM, K. H.; ROJAS, O. J.; PARK, S. Transformation of lignocellulosic biomass during torrefaction. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 100, p. 199-206, 2013.

PENG, J. H.; BI, X. T.; SOKHANSANJ, S.; LIM, C. J. Torrefaction and densification of different species of softwood residues. **Fuel**, v. 111, p. 411-421, 2013.

PEREIRA, E. G.; DA SILVA, J. N.; DE OLIVEIRA, J. L.; MACHADO, C. S. Sustainable energy: A review of gasification technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 7, p. 4753-4762, 2012.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2017.

SALES, C. A. V. B.; MAYA, D. M. Y.; LORA, E. E. S.; JAÉN, R. L.; REYES, A. M. M.; GONZÁLEZ, A. M.; ANDRADE, R. V.; MARTÍNEZ, J. D. Experimental study on biomass (eucalyptus spp.) gasification in a two-stage downdraft reactor by using mixtures of air, saturated steam and oxygen as gasifying agents. **Energy Conversion and Management**, v. 145, p. 314-323, 2017.

SAMIRAN, N. A.; JAAFAR, M. N. M.; NG, J.-H.; LAM, S. S.; CHONG, C. T. Progress in biomass gasification technique – With focus on Malaysian palm biomass for syngas production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, n. Supplement C, p. 1047-1062, 2016.

SANSANIWAL, S. K.; PAL, K.; ROSEN, M. A.; TYAGI, S. K. Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 363-384, 2017.

SUSASTRIAWAN, A. A. P.; SAPTOADI, H.; PURNOMO. Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 989-1003, 2017.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 204 om-88: solvent extractives of wood and pulp**. Atlanta, USA. 1996.

WANG, L.; WELLER, C. L.; JONES, D. D.; HANNA, M. A. Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, n. 7, p. 573-581, 2008.

ZHANG, L.; XU, C.; CHAMPAGNE, P. Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 5, p. 969-982, 2010.

ZHANG, Z.; LIU, L.; SHEN, B.; WU, C. Preparation, modification and development of Ni-based catalysts for catalytic reforming of tar produced from biomass gasification. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 1086-1109, 2018.

CAPÍTULO III

OTIMIZAÇÃO DE GASEIFICADOR *DOWNDRAFT* E USO DE CATALISADORES PARA PRODUÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE

Resumo - O objetivo principal foi melhorar o desempenho e a produção de gás em gaseificador de leito fixo e fluxo concorrente por meio da inserção de barreira física na zona de redução e o uso de catalisadores a base minério de ferro e óxido de níquel. A barreira física foi previamente modelada e simulada via CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e inserida na zona de redução do gaseificador, forçando a passagem dos gases por toda essa região antes de saírem do reator. Os catalisadores foram confeccionados com materiais convencionais, facilmente encontrados no mercado, como concreto refratário, minério de ferro, calcário dolomítico e óxido de níquel. Os catalisadores foram colocados dentro de um reator de reforma, localizado após o reator principal de gaseificação. A temperatura para as reações foi cedida pelo próprio gás produzido pelo gaseificador. Utilizando cavacos de eucalipto como biomassa, realizou-se duas gaseificações para validação da barreira física e duas para os catalisadores, foi avaliado ainda o uso de vapor nas gaseificações com catalisadores. Foram obtidas as temperaturas do reator, vazões de biomassa, ar e gás, composição e poder calorífico inferior do gás. Posteriormente, determinou-se o balanço de massa e energia do sistema. A barreira física inserida na zona de redução não afetou a qualidade do gás e o rendimento, no entanto, a operação do reator foi facilitada, tornando mais estável. A adição de vapor teve baixo efeito sobre a composição e poder calorífico inferior do gás. O catalisador produzido com minério de ferro aumentou o teor de hidrogênio do gás, alcançando valor máximo de 10%. O catalisador de níquel ajustou a relação H_2/CO do gás para 2,3:1 em média, podendo ser considerado como gás de síntese. A maior relação H_2/CO foi obtida quando combinado o catalisador de minério com níquel e vapor.

Palavras-chave: *Computational Fluid Dynamics*; Minério de ferro; Óxido de níquel.

1 INTRODUÇÃO

A gaseificação é a conversão termoquímica da biomassa em gás, por meio da oxidação parcial, em temperaturas próximas a 1000°C. O gás formado é composto por hidrogênio (H₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), hidrocarbonetos, alcatrão e vapor de água (WANG et al., 2008; AHMAD et al., 2016; MOLINO et al., 2016).

A gaseificação é realizada em reatores denominados de gaseificadores, os de leito fixo utilizam o sistema de grelha que suporta a carga em seu interior, havendo o movimento vertical descendente da biomassa em função da ocorrência das reações e consequente consumo de material (SANSANIWAL et al., 2017). Especialmente os gaseificadores de fluxo concorrente, também denominados como *downdraft*, são reatores comprovadamente mais simples, além de produzirem gás com menores teores de alcatrão, facilitando o uso em motores de combustão interna, turbinas e afins (MOLINO et al., 2016). Nos gaseificadores concorrente a redução do alcatrão ocorre devido ao seu craqueamento na zona de alta temperatura na região de combustão, diferentemente dos outros tipos de reatores de leito fixo, contracorrente e fluxo cruzado (VALDERRAMA RIOS et al., 2018).

Dentre os usos do gás resultante da gaseificação, a forma mais simples é a combustão direta em queimadores para geração de energia térmica. Quando utilizado na cogeração, a combinação de processos de geração de calor e energia elétrica aumenta a eficiência de conversão (WANG et al., 2008; MOLINO et al., 2016). A geração de energia elétrica pode integrar diversas tecnologias, como a gaseificação combinada com turbinas a gás, a vapor ou ambas (ZANG et al., 2018) e motores de combustão interna, ambos acoplados a geradores (PEREIRA et al., 2012).

O gás pode ainda ser convertido produtos químicos diversos e também em combustíveis líquidos de maior poder calorífico (WANG et al., 2008; PARDO-PLANAS et al., 2017). A reação de *Fischer-Tropsch*, principal rota de conversão do gás em combustíveis e produtos químicos, demanda a relação H₂/CO de 2:1 ou superior, o que dificilmente é encontrado no gás produzido a partir de biomassa. Além disso, podem ser produzidos o biometano e o hidrogênio pelo uso de catalisadores específicos (PEREIRA et al., 2012; MOLINO et al., 2016).

Os principais desafios da gaseificação de biomassa são a redução da produção de alcatrão, aumento da relação H₂/CO e da eficiência dos reatores. A eficiência pode ser melhorada com modificações nas zonas de reação dos gaseificadores, porém segundo Valderrama Rios et al. (2018) devem ser economicamente viáveis e fáceis de implementar.

Para redução de custos e esforços construtivos podem ser empregadas técnicas de modelagem e simulação, como CFD (*Computational Fluid Dynamics*), para otimização do reator gaseificação.

O uso de catalisadores tem sido amplamente estudado visando, principalmente, a redução do alcatrão no gás (KOIKE et al., 2015). Segundo Sutton et al. (2001) as principais características de catalisadores para gaseificação de biomassa, além da efetividade na remoção do alcatrão, são a conversão do metano em CO e H₂ por meio de reações de reforma; aumento da relação H₂/CO visando a produção de gás de síntese; resistência em altas temperaturas; longos períodos de catálise sem desativação e fácil regeneração; e finalmente, devem ser acessíveis e ter baixo custo.

Os catalisadores são suportados por materiais resistentes a altas temperaturas, próximas a 800 °C, e comumente são utilizados o Al₂O₃, o SiO₂, o MgO, o CaO, dolomita, dentre outros (YUNG et al., 2009). Sendo os de natureza básica, mais eficazes na inibição da deposição de carbono sobre o catalisador (CHAN; TANKSALE, 2014).

Os catalisadores de ferro e níquel são comumente utilizados na gaseificação de biomassa. O níquel é comprovadamente efetivo na redução do alcatrão em reações de reforma a vapor e no aumento do conteúdo de hidrogênio no gás. No entanto, tem como desvantagem a rápida desativação pela deposição de carbono na superfície e pela sinterização (GALVITA et al., 2015; KOIKE et al., 2015; DE DIEGO et al., 2016; ZHANG et al., 2018). O ferro, além de catalisador, também é considerado promotor, possuindo a capacidade de aumentar a reatividade e estabilidade de catalisadores que são facilmente desativados (CHAN; TANKSALE, 2014).

O uso combinado do ferro e níquel em catalisadores é uma alternativa para contornar os problemas supracitados, sendo reportados resultados promissores pela literatura (WANG et al., 2011; ASHOK; KAWI, 2014; LI et al., 2014; DONG et al., 2017). No entanto, a maior parte dos trabalhos realizou a catálise em condições controladas de laboratório, tendo menos estudos de catalisadores para o gás bruto em condições operacionais. Ademais, a maioria utilizou catalisadores comerciais de alto desempenho, avaliando a catálise de compostos padrões como o tolueno, benzeno, fenol, naftaleno, etc (ZHANG et al., 2018).

Diante disso, torna-se necessário o desenvolvimento de catalisadores com atividade catalítica comprovada para a gaseificação de biomassa, produzidos com materiais acessíveis e de baixo custo.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Otimizar a produção de gás, em gaseificador de leito fixo e fluxo concorrente, por meio de modificações físicas na zona de redução e uso de catalisadores.

2.2 Específicos

Avaliar o efeito da inserção de uma barreira física na zona de redução sobre a qualidade do gás produzido e nos parâmetros operacionais do gaseificador.

Produzir catalisadores com materiais convencionais e de baixo custo, para catálise do gás bruto obtido na gaseificação de biomassa.

Avaliar o efeito de catalisadores a base minério de ferro e óxido de níquel sobre a qualidade do gás e nos parâmetros operacionais do gaseificador.

Avaliar o impacto da adição de vapor sobre a qualidade do gás e nos parâmetros operacionais do gaseificador.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Biomassa utilizada

A biomassa utilizada nas gaseificações foram cavacos de *Eucalyptus* sp., cuja composição física e química encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades físicas e químicas dos cavacos de eucalipto

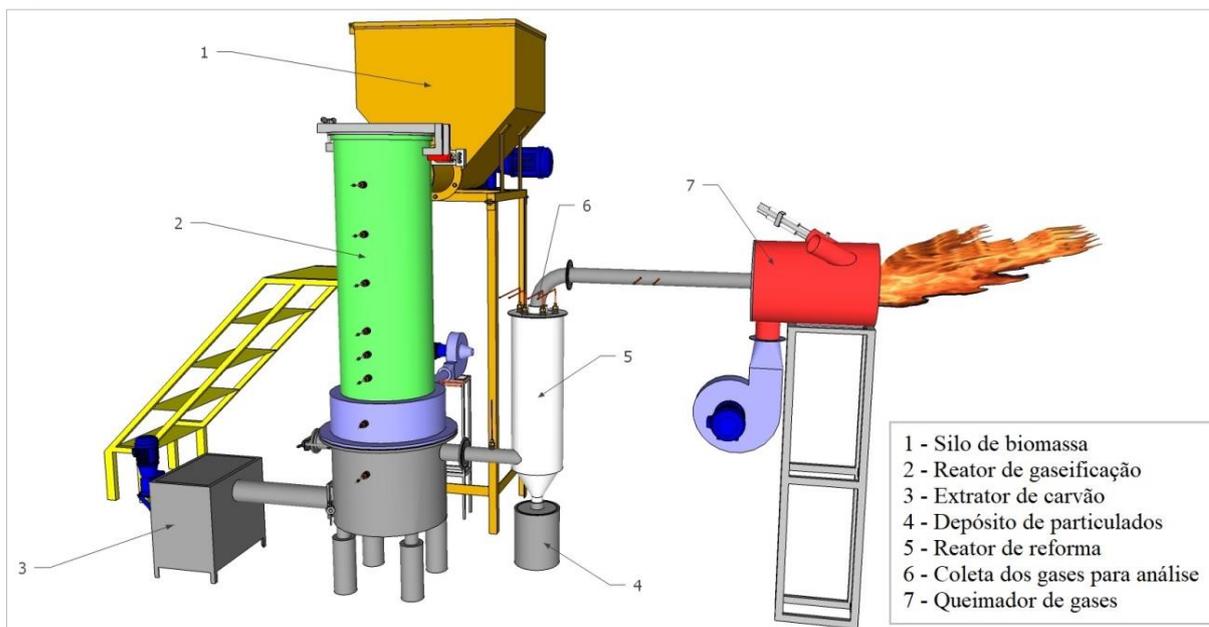
Propriedade	Unidade	Valores Médios
Umidade (base seca)	%	15,3
Densidade a granel	Kg/m ³	208,1
Materiais voláteis	%	85,3
Carbono fixo	%	14,3
Cinzas	%	0,3
Poder calorífico superior	MJ/Kg	19,5

Fonte: O autor.

3.2 Gaseificador downdraft

A planta piloto de gaseificação de biomassa é composta pelo gaseificador de leito fixo e fluxo concorrente, silo de biomassa, sistema para extração de carvão, reator para reforma e pelo queimador de gases, Figura 1. O gaseificador é mais bem descrito no Capítulo II.

Figura 1 - Esquema da planta piloto de gaseificação



Fonte: O autor.

O reator de gaseificação possui altura interna de 1,67 m e diâmetro interno de 0,30 m na seção superior e 0,40 m na zona de redução, Figura 1-2. O reator foi construído em aço carbono e revestido internamente por duas camadas de papel de fibra cerâmica, com 5 mm de espessura cada, para isolamento térmico. Internamente ao isolamento térmico, possui uma camada de 40 mm de concreto refratário *Unicast 70N* para proteção das partes metálicas externas.

O sistema injeção de ar para gaseificação utiliza um ventilador elétrico controlado por um inversor de frequência *WEG CFW 8*, possibilitando a variação na vazão volumétrica de ar.

O sistema de alimentação de biomassa é composto por um silo com rosca sem fim acionada por um motoredutor, Figura 1-1. O acionamento do motoredutor é realizado automaticamente por meio de um controlador de nível de biomassa na região superior do reator.

O reator para reforma dos gases foi construído em aço carbono, com dimensões internas de 0,20 m de diâmetro e 0,70 m de altura e revestido externamente com manta de fibra cerâmica para isolamento térmico, Figura 1-5.

O queimador de gases é composto por um sistema de ignição por meio de centelha elétrica e gás liquefeito de petróleo. Possui um ventilador para fornecimento de ar para combustão dos gases quando necessário, Figura 1-7.

Para monitoramento das temperaturas do reator foram inseridos nove termopares tipo k ao longo de sua extensão. A cada 10 minutos, foram medidas as vazões e as temperaturas do ar para gaseificação e também do gás produzido.

3.3 Barreira física na zona de redução

3.3.1 Modelagem e simulação

Foi idealizada uma barreira física na zona de redução do reator de gaseificação para forçar a passagem dos gases por toda a sua extensão e permitir o melhor contato desses com o leito de carvão.

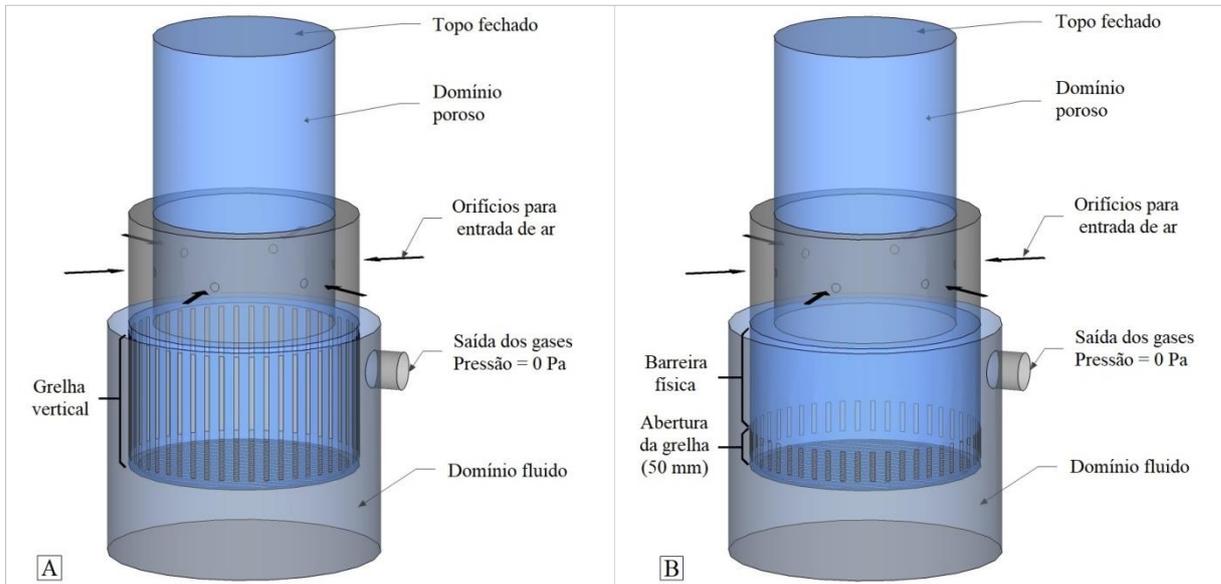
Para tanto, inicialmente procedeu-se a modelagem e simulação da zona de redução, com e sem a barreira física, utilizando a técnica CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e o *software* ANSYS CFX 11.0.

O escoamento dos gases dentro do gaseificador foi modelado para avaliar o efeito da configuração da grelha vertical na eficiência da gaseificação. A eficiência depende da interação entre os gases e o leito de cavacos e está associada aos coeficientes de transferência de calor e massa, definidos em função do número de Reynolds.

É importante ressaltar que o objetivo dessa análise não foi a modelagem das reações de combustão e redução. Sendo assim, as equações principais foram definidas pelas equações de Navier-Stokes.

O domínio computacional para modelagem foi definido pela região do gaseificador correspondente as zonas de redução e combustão, além de um subdomínio poroso estendido até 300 mm acima da zona de combustão. Um subdomínio fluido representou a região inferior correspondente ao cinzeiro e a região entre a grelha vertical e a parede do reator, onde os gases deslocam-se do leito poroso até a saída pelo duto em direção ao queimador. O ar necessário para gaseificação foi injetado em seis orifícios de 15 mm de diâmetro cada, equidistantes entre si, localizados na zona de combustão do reator, Figura 2.

Figura 2 - Esquema do domínio poroso e fluido e das condições de contorno consideradas na modelagem para a condição padrão (A) e com a barreira física (B)



Fonte: O autor.

Na configuração padrão, a grelha vertical compreendia toda a zona de redução (Figura 2A). Na configuração proposta, a altura da grelha foi reduzida de 240 mm para 50 mm na base da zona de redução (Figura 2B). Depois do teste de independência de malha, o domínio computacional foi discretizado com 874.045 elementos tetraédricos.

A modelagem teve como objetivo analisar o escoamento dentro do gaseificador, logo o fenômeno foi abordado como problema de escoamento em regime permanente em meio poroso com interface para domínio fluido. As seguintes simplificações foram adotadas:

- Fase fluida foi representada pela mistura de composição fixa: N_2 (60,78%), CO (21,40%), CO_2 (9,30%), e H_2 (8,52%).
- Processo isotérmico com temperatura média de 500 °C e propriedades do gás constantes.
- Leito de cavacos considerado como meio poroso com propriedades diferenciadas na região de combustão e redução.
- As equações principais correspondem as equações de Navier-Stokes (conservação de massa e momento) no regime permanente, foram adaptadas de Bustos Vanegas et al. (2018):

a) Para o domínio poroso:

$$\nabla \vec{v} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\rho_f}{\varphi} \nabla (\vec{v}\vec{v}) = -\varphi \nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} - \frac{\beta \mu (1-\varphi)^2}{d_p^2 \varphi^3} \vec{v} - \frac{\alpha \rho_f (1-\varphi)}{d_p \varphi^3} \vec{v}\vec{v} \quad (2)$$

b) Para o domínio fluido:

$$\nabla \vec{v} = 0 \quad (3)$$

$$\rho_f \nabla (\vec{v}\vec{v}) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (4)$$

Em que:

ρ_f = massa específica média do gás, em kg/m³;

μ = viscosidade média do gás, em Pa.s;

φ = porosidade do leito de partículas;

d_p = tamanho médio de partícula, em mm;

\vec{v} = vetor de velocidade, em m/s.

Os últimos termos da Equação 2 correspondem a força resistiva, estimada pela equação de Ergun ($\alpha = 1,75$; $\beta = 150$), representando as forças viscosas e de arrasto resultantes da interação entre as fases sólida e fluida no meio poroso. Esses termos foram calculados para cada região do gaseificador (redução e combustão), segundo as propriedades do meio poroso, Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades do meio poroso na região de combustão e redução

Leito de cavacos (região de combustão)	Valores Médios
Diâmetro de partícula (mm)	20
Densidade aparente (kg/m ³)	633
Densidade a granel (kg/m ³)	184
Porosidade	0,71
Leito de carvão de cavaco (região de redução)	
Diâmetro de partícula (mm)	14
Densidade aparente (kg/m ³)	230
Densidade a granel (kg/m ³)	97
Porosidade	0,58

Fonte: O autor.

As flutuações turbulentas foram modeladas usando o modelo $k-\varepsilon$ (PEDRAS; LEMOS, 2003; SAITO; LEMOS, 2010). A condição de conservação de fluxo de massa e de momento foram configurados na interface entre os domínios poroso e fluido.

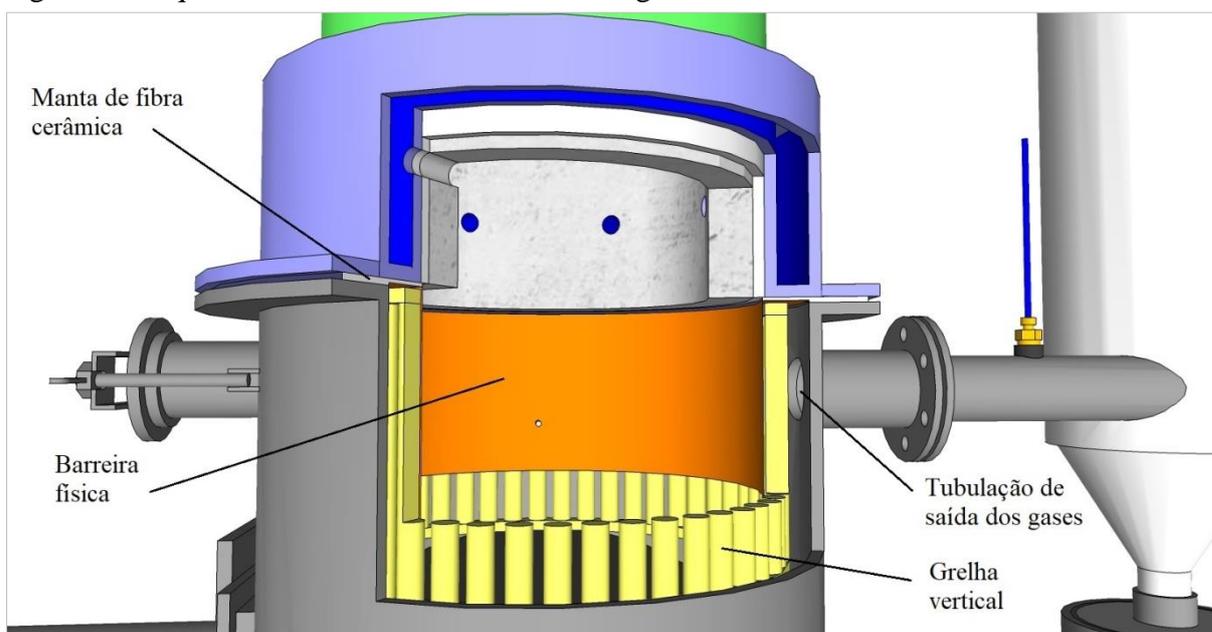
O ar foi admitido na região de combustão por seis orifícios a taxa de 0,00856 kg/s. A condição de pressão manométrica nula foi definida na saída do gaseificador. Foram estabelecidas condições de não deslizamento nas paredes e no topo do reator. Os esquemas de discretização de Euler de primeira ordem e de alta resolução foram usados para os termos turbulentos e advectivos, respectivamente. O critério de parada do processo iterativo foi estabelecido quando a raiz do erro quadrático médio (REQM) fosse $< 10^{-6}$.

3.3.2 Confeção da barreira física

Após a modelagem e simulação, fabricou-se a barreira física em chapa de aço inox 304 com 2 mm de espessura. A barreira foi composta por um cilindro com dimensões de 175 mm de comprimento e 395 mm de diâmetro, soldado a um flange com diâmetro externo de 475 mm. Esse conjunto foi inserido internamente à grelha vertical do reator, Figura 3.

Durante a montagem do reator, colocou-se um segundo flange de manta de fibra cerâmica sobre o flange de aço inox da barreira, forçando a passagem dos gases por toda a zona de redução.

Figura 3 - Esquema da barreira física inserida na grelha vertical



Fonte: O autor.

3.4 Uso de catalisadores

3.4.1 Produção dos catalisadores

Os materiais utilizados para produção dos catalisadores foram concreto refratário, minério de ferro, calcário dolomítico e óxido de níquel, conforme descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição dos produtos utilizados na confecção dos catalisadores

Produto comercial	Composto principal	Elemento principal	Função principal
Concreto refratário	69% Al ₂ O ₃	36,5% Al	Suporte estrutural para os demais componentes
Minério de ferro	72,1% Fe ₂ O ₃	50,4% Fe	Catalisador e inibidor da desativação do níquel
Calcário dolomítico	10% MgO 30% CaO	6,0% Mg 21,4% Ca	Neutralização da acidez do Al ₂ O ₃ para redução da deposição de carbono sobre o níquel
Óxido de níquel	96,7% NiO	76% Ni	Catalisador

Fonte: O autor.

Na Tabela 4 são apresentadas as proporções de cada produto utilizado para a confecção dos catalisadores. Vale salientar que as misturas de cada catalisador foram baseadas em testes preliminares, respeitando sempre a proporção de cinquenta por cento, em massa, correspondente ao concreto refratário. O calcário dolomítico foi utilizado apenas no catalisador de óxido de níquel para neutralização da acidez do suporte e redução da deposição de carbono.

Tabela 4 - Quantidade de cada produto utilizado na confecção dos catalisadores

Catalisador	Concreto refratário (Al)	Minério de ferro (Fe)	Calcário dolomítico (Mg) (Ca)	Óxido de níquel (Ni)
Minério de ferro (MF)	50 g (18,3 g)	50 g (25,2 g)	-	-
Óxido de níquel (ON)	50 g (18,3 g)	9 g (4,5 g)	30 g (1,8 g) (6,4 g)	11 g (8,4 g)

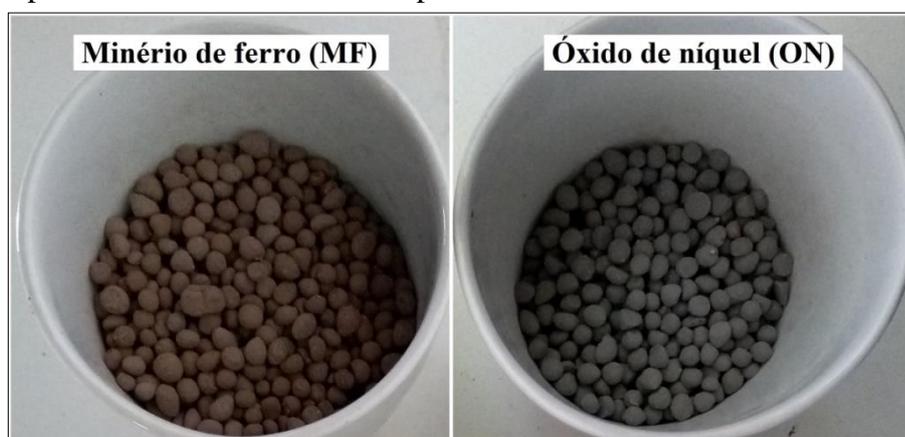
Fonte: O autor. Valores entre parênteses correspondem à quantidade do elemento químico fornecido pelo respectivo produto.

Para produção de cada catalisador, misturaram-se os produtos em um recipiente e adicionou-se água até a formação de uma massa de consistência média que possibilitasse a formação de aglomerados esféricos. A forma de aglomerados foi escolhida baseada em testes

preliminares, nos quais foi observado maior facilidade de produção, uso e regeneração dos catalisadores. Utilizando um aparato composto por palitos de madeira com a extremidade afinada, foram depositados aglomerados esféricos de cada mistura em uma superfície plana e previamente coberta por uma fina camada da mesma mistura.

Os aglomerados esféricos foram classificados em peneiras de 4 e 2 mm, utilizando a fração retida na peneira de 2 mm. Posteriormente, foram secos lentamente em ambiente sombreado, para a cura completa do concreto refratário. Os catalisadores foram calcinados em forno tipo mufla, a 650 °C por 6 horas, visando prepara-los para uso em altas temperaturas. Os catalisadores em sua forma final de uso podem ser observados na Figura 4.

Figura 4 - Aspecto visual dos catalisadores produzidos

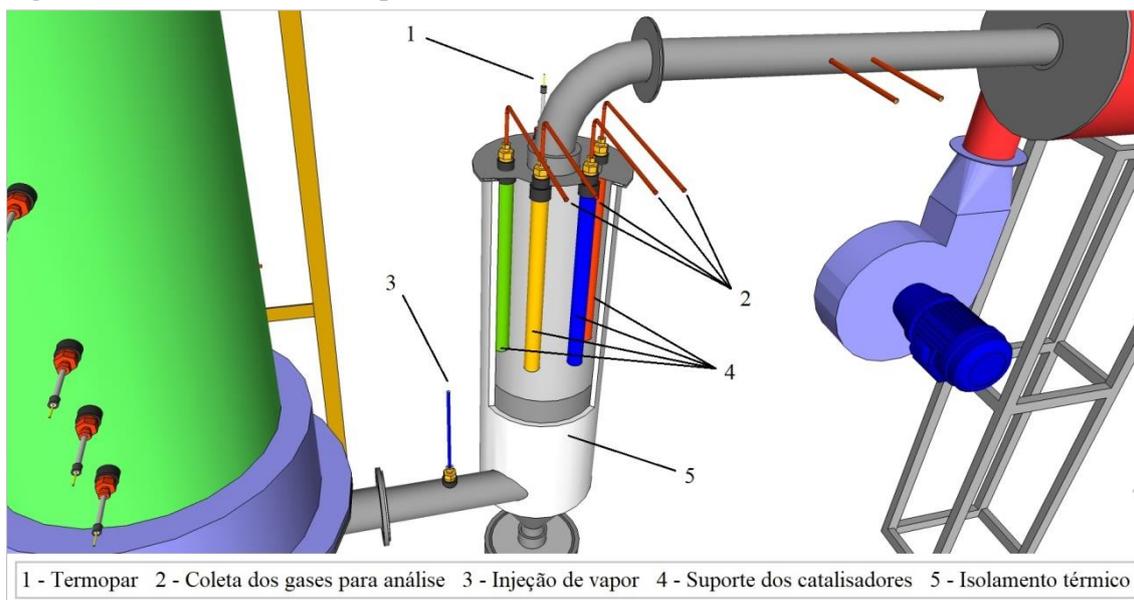


Fonte: O autor.

3.4.2 Reator de reforma para catálise dos gases

Os catalisadores foram inseridos no reator de reforma localizado após o reator principal de gaseificação, Figura 5.

Figura 5 - Reator de reforma para o uso de catalisadores



Fonte: O autor.

O reator de reforma foi construído para acomodação de até quatro suportes, nos quais foram inseridos os catalisadores, Figura 5-4. Cada suporte foi ligado a uma tubulação independente que conduzia o gás até o analisador, Figura 5-2. Em cada tratamento, o gás foi submetido a passagem pelo suporte por um período de meia hora, sendo um por vez e iniciando do suporte da esquerda para direita.

Os suportes dos catalisadores foram confeccionados com tubos de aço galvanizado com diâmetro interno de 27 mm e comprimento de 300 mm.

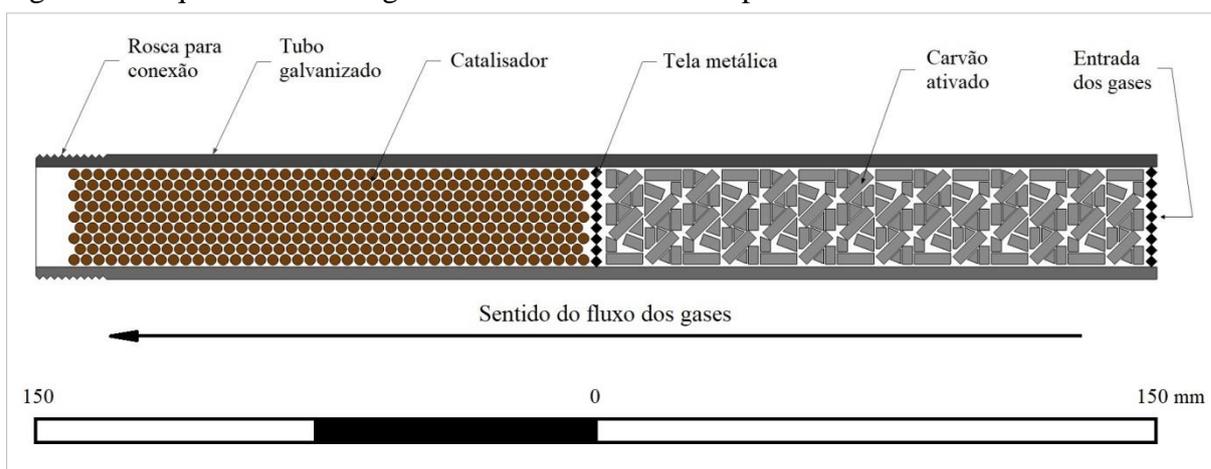
A temperatura dos catalisadores foi monitorada por meio de um termopar tipo k localizado na mesma posição dos suportes, Figura 5-1. A temperatura foi mantida pelo próprio calor do gás advindo do reator de gaseificação e pelo isolamento térmico do reator de reforma com manta de fibra cerâmica, Figura 5-5.

Para favorecer as reações de reforma foi utilizado vapor à 125 °C, sendo injetado por meio de um tubo de cobre inserido na tubulação de chegada dos gases ao reator de reforma, Figura 5-3.

3.4.3 Montagem dos catalisadores e condições experimentais

A montagem de cada catalisador nos suportes foi feita adicionando uma camada de carvão ativado e na sequência o(s) catalisador(es), sendo estas separadas por uma tela metálica, Figura 6.

Figura 6 - Esquema de montagem dos catalisadores no suporte



Fonte: O autor.

Os tratamentos foram definidos com base em resultados de testes preliminares e estão descritos na Tabela 5. Cada tratamento foi realizado por um período de uma hora, contabilizado após a estabilização da temperatura na zona de redução do gaseificador. Foram feitas duas repetições por tratamento (gaseificações).

Tabela 5 - Tratamentos realizados para avaliar o efeito dos catalisadores e vapor

Tratamento	Volume do catalisador / Volume do suporte		
	Carvão ativado	Minério de Ferro	Óxido de Níquel
Controle	50% (45 g)	-	-
Controle + vapor	50% (45 g)	-	-
MF	50% (45 g)	50% (100 g)	-
MF + vapor	50% (45 g)	50% (100 g)	-
MF + ON	33,3% (35 g)	33,3% (65 g)	33,3% (65 g)
MF + ON + vapor	33,3% (35 g)	33,3% (65 g)	33,3% (65 g)
ON	50% (45 g)	-	50% (100 g)
ON + vapor	50% (45 g)	-	50% (100 g)

Fonte: O autor. Valores entre parênteses correspondem a massa do respectivo componente adicionado ao suporte. MF = minério de ferro; ON = óxido de níquel.

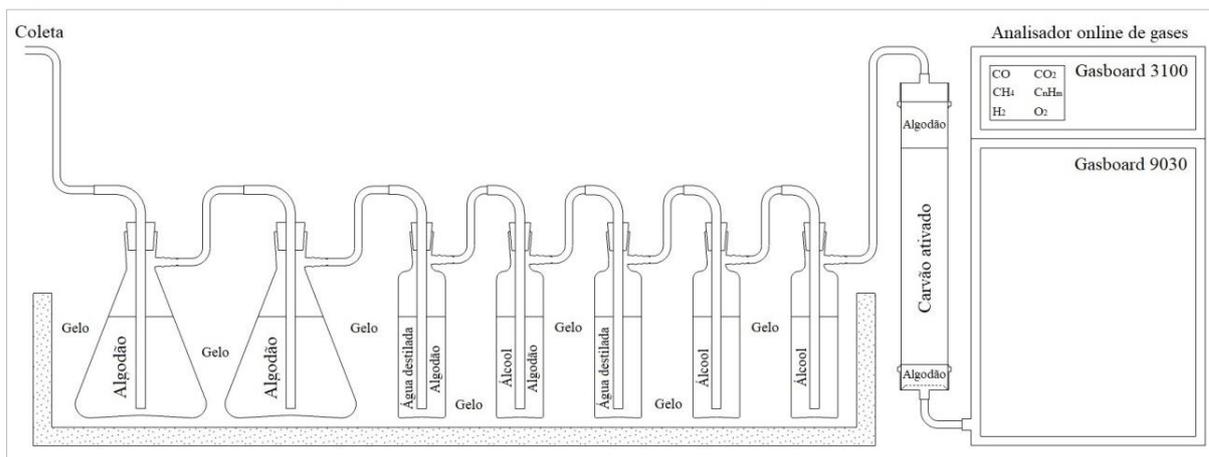
3.5 Parâmetros operacionais do reator e propriedades do gás produzido

3.5.1 Composição e poder calorífico inferior do gás

O gás foi coletado e limpo utilizando o sistema de pré-lavagem composto por sete frascos tipo Dreschel conectados em sequência, acondicionados em caixa térmica e submersos

em gelo. Os dois primeiros foram preenchidos com algodão para condensar o excesso de gases. No terceiro foi adicionado água destilada mais algodão e no quarto álcool etílico mais algodão. O quinto continha água destilada, no sexto e sétimo foi adicionado apenas álcool etílico. O gás também foi submetido à passagem por filtro de carvão ativado mais algodão antes de ser enviado ao analisador de gases, Figura 7.

Figura 7 - Esquema da sequência de limpeza e análise dos gases



Fonte: O autor.

Os gases não condensáveis, após a pré-limpeza, foram conduzidos até o sistema de limpeza do Gasboard 9030 Wuhan CUBIC Optoelectronics Co. Ltda. (Figura 7), onde foram novamente lavados em água destilada e resfriados até 4 °C em desumidificador e em seguida passados por filtro de carvão ativado e algodão. Foram ainda submetidos a limpeza final em filtros com capacidade de reter impurezas de até 3 µm (filtro FT1) e 1 µm (filtro FT2).

Na sequência, após a limpeza completa, os gases foram conduzidos para o sistema online de análise de gases, gasboard 3100 Wuhan CUBIC Optoelectronics Co. Ltda. (Figura 7), que forneceu a composição percentual de CO, CO₂, CH₄, C_nH_m, H₂ e O₂. A medição foi contínua, realizada durante todo o tempo da gaseificação, sendo os dados armazenados a cada 10 segundos.

O poder calorífico inferior do gás foi estimado segundo Sales et al. (2017), pela multiplicação da concentração média de cada gás pelo seu respectivo poder calorífico inferior, conforme a Equação 5.

$$PCI_g = (12,696 \text{ CO}) + (10,768 \text{ H}_2) + (35,866 \text{ CH}_4) \quad (5)$$

Em que:

PCI_g = poder calorífico inferior do gás, em MJ/m³;

CO, H₂, CH₄ = concentração média de monóxido de carbono, hidrogênio e metano no gás, respectivamente, em %.

3.5.2 Balanço de massa e energia

A vazão mássica de biomassa (kg/h) foi estimada pela multiplicação do número de rotações da rosca sem fim por hora (rotações/h) pela capacidade de transporte (kg/rotação). Foi determinada a capacidade de transporte da rosca sem fim do silo, em kg/volta, e contabilizado o número de voltas da rosca sem fim durante cada gaseificação.

A vazão volumétrica do ar para gaseificação e do gás produzido foi obtida pela multiplicação da velocidade de escoamento do fluido pela respectiva área da tubulação, conforme Equação 6. A velocidade de escoamento foi estimada a partir da pressão dinâmica, obtida por meio de tubos *pitot* acoplados a um manômetro, e da densidade do respectivo fluido, conforme Equação 7. Em ambos os casos, juntamente com a pressão dinâmica, foi coletada a temperatura para posterior obtenção da vazão volumétrica em condições normais de temperatura e pressão (ANDRADE, 2007), conforme Equação 8.

$$Q = V A 3600 \quad (6)$$

Em que:

Q = vazão volumétrica do fluido, em m³/h;

V = velocidade do fluido, em m/s;

A = área da tubulação, em m².

$$V = \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho_f}} \quad (7)$$

Em que:

V = velocidade do fluido, em m/s;

Δp = diferença de pressão obtida pelo manômetro, em Pascal (Pa);

ρ_f = densidade do fluido, em kg/m³.

$$Q_N = Q \left[\frac{273,15}{(273,15 + T)} \right] \quad (8)$$

Em que:

Q_N = vazão volumétrica em condições normais (0 °C e 1 atm), em Nm³/h;

Q = vazão volumétrica do fluido, em m³/h;

T = temperatura do fluido, em K.

A energia total disponível na biomassa foi calculada multiplicando a vazão mássica de biomassa pelo poder calorífico útil, conforme a Equação 9 (ANDRADE, 2007). Foi considerado que 1 kW é igual a 1 J/s.

$$q_T = m_b \text{ PCU}_b \quad (9)$$

Em que:

q_T = taxa de calor total disponível, em kW;

m_b = vazão mássica de biomassa, em kg/h;

PCU_b = poder calorífico útil da biomassa, em MJ/kg.

A energia química disponível no gás foi obtida pela multiplicação da vazão volumétrica de gás pelo seu poder calorífico inferior, conforme a Equação 10 (ANDRADE, 2007). Foi considerado que 1 kW é igual a 1 J/s.

$$q_g = Q_g \text{ PCI}_g \quad (10)$$

Em que:

q_g = taxa de calor disponível no gás produzido, em kW;

Q_g = vazão volumétrica de gás, em Nm³/h;

PCI_g = poder calorífico inferior do gás, em MJ/Nm³.

O calor perdido pelo gás para o meio foi estimado de acordo com a metodologia descrita por Andrade (2007), conforme a Equação 11. Foi considerado que 1 kW é igual a 1 J/s.

$$q_{gpm} = m_g c_{p_g} (T_g - T_a) \quad (11)$$

Em que:

q_{gpm} = taxa de perda de calor pelo gás para o meio, em kW;

m_g = vazão mássica de gás, em kg/h;

c_{p_g} = calor específico do gás, em KJ/kgK;

T_g = temperatura de saída do gás do reator, em K;

T_a = temperatura ambiente, em K.

As perdas de calor por condução pelas paredes do reator foram estimadas conforme a Equação 12 (ANDRADE, 2007).

$$q_{cd.} = \frac{(T_{int} - T_{ext})}{\sum_{i=1}^n \frac{\ln(r_{ext}/r_{int})}{2 \pi k L}} / 1000 \quad (12)$$

Em que:

$q_{cd.}$ = taxa de perda de calor por condução pela parede para o meio, em kW;

T_{int} = temperatura interna do reator, em K;

T_{ext} = temperatura externa da parede do reator, em K;

r_{ext} = raio externo do i-ésimo componente da parede, em m;

r_{int} = raio interno do i-ésimo componente da parede, em m;

k = condutividade térmica do material do i-ésimo componente da parede, em W/mK;

L = altura da seção, em m.

Foi considerando como “outros produtos”, as demais fugas de energia, a exemplo do carvão não convertido em gás, da energia térmica contida nas cinzas, da energia química do alcatrão, a energia gasta para manutenção da temperatura do reator e as demais perdas de calor que não foram identificadas durante a execução dos ensaios de gaseificação.

3.5.3 Eficiência do reator

A eficiência a frio foi obtida pela relação entre a energia química do gás e a da biomassa, Equação 13. A eficiência a quente considerou ainda a energia térmica liberada para o meio pelo gás, Equação 14 (ANDRADE, 2007).

$$\eta_f = \left(\frac{PCI_g V_g}{PCI_b m_b} \right) 100 \quad (13)$$

$$\eta_q = \left(\frac{PCI_g Q_g + q_{gpm}}{PCI_b m_b} \right) 100 \quad (14)$$

Em que:

η_f = eficiência a frio da gaseificação, em %;

η_q = eficiência a quente da gaseificação, em %;

PCI_g = poder calorífico inferior do gás, em MJ/Nm³;

Q_g = vazão volumétrica do gás, em Nm³/h;

PCI_b = poder calorífico inferior da biomassa, em MJ/kg;

m_b = vazão mássica de biomassa, em kg/h;

q_{gpm} = taxa de perda de calor pelo gás para o meio, em MJ/h.

3.5.4 Razão de ar

Foi utilizado ar atmosférico como agente de gaseificação. A razão de ar foi calculada pela relação entre a quantidade consumida na gaseificação da biomassa e a quantidade estequiométrica necessária para sua combustão completa, Equações 15 e 16, segundo Guo et al. (2014). Para os cálculos, foi considerado o conteúdo de carbono, hidrogênio, enxofre e oxigênio na biomassa, bem como sua massa, em base seca, e livre de cinzas.

$$RA = (m_a / m_b)_{gaseif} / (m_a / m_b)_{comb} \quad (15)$$

Em que:

RA = razão de ar;

$(m_a / m_b)_{gaseif}$ = relação entre o fluxo mássico de ar e biomassa para gaseificação;

$(m_a / m_b)_{comb}$ = relação entre o fluxo mássico de ar e biomassa para combustão.

$$(m_a / m_b)_{\text{comb}} = \frac{1,293}{0,21} \left(1,866 \frac{C}{100} + 5,55 \frac{H}{100} + 0,7 \frac{S}{100} - 0,7 \frac{O}{100} \right) \quad (16)$$

Em que:

$(m_a / m_b)_{\text{comb}}$ = relação entre o fluxo mássico de ar e biomassa para combustão;

C, H, S, O = conteúdo de carbono, hidrogênio, enxofre e oxigênio na biomassa, respectivamente, em %.

3.5.5 Perfil de temperaturas

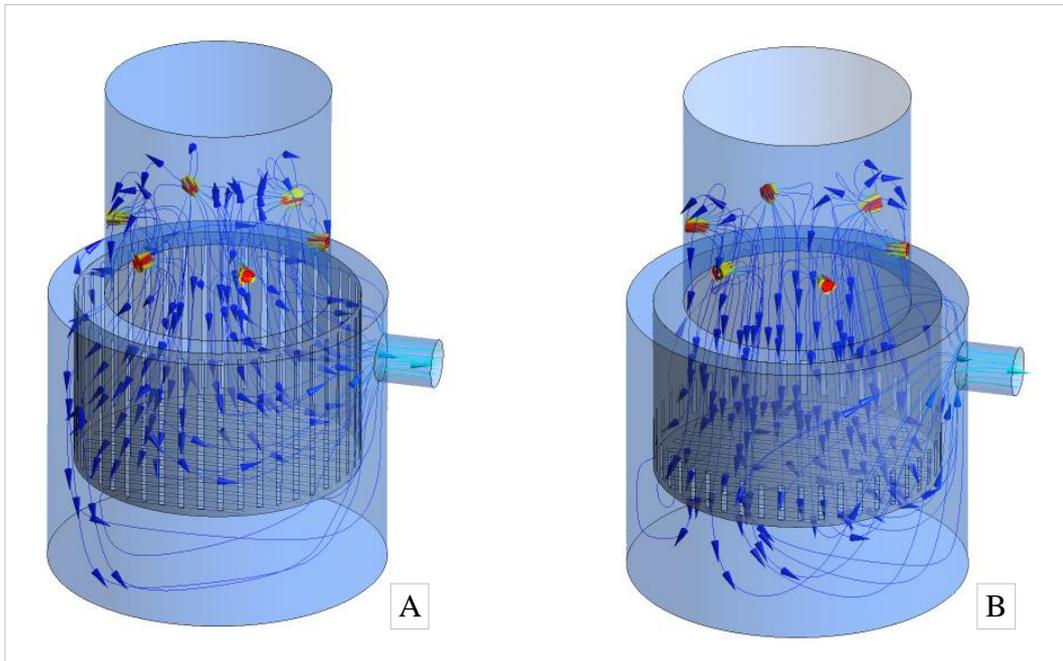
A distribuição espacial das temperaturas no reator, para a condição padrão e com barreira física, foi modelada a partir dos resultados de nove termopares do tipo k, por meio do processo de interpolação do Inverso do Quadrado da Distância (IDW), utilizando o *software* R (R CORE TEAM, 2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Barreira física na zona de redução

Na Figura 8 observam-se as correntes de gases simuladas para a configuração padrão e com a barreira física. Na configuração padrão (Figura 8A), observa-se que o gás sai pela grelha vertical sem permear completamente o leito de cavacos na região de redução. Como esperado, a barreira na grelha vertical (Figura 8B) forçou a passagem completa dos gases pelo leito, saindo na parte inferior da zona de redução. O tempo de residência máximo aumentou de 4,60 s para 6,90 s com a implementação da barreira. Segundo Valderrama Rios et al. (2018) o aumento do tempo de residência é benéfico para gaseificação, possibilitando a redução do conteúdo de alcatrão no gás. No presente estudo o alcatrão não foi quantificado, porém ficou evidente a redução devido ao ínfimo acúmulo nas tubulações, no reator de reforma e no queimador.

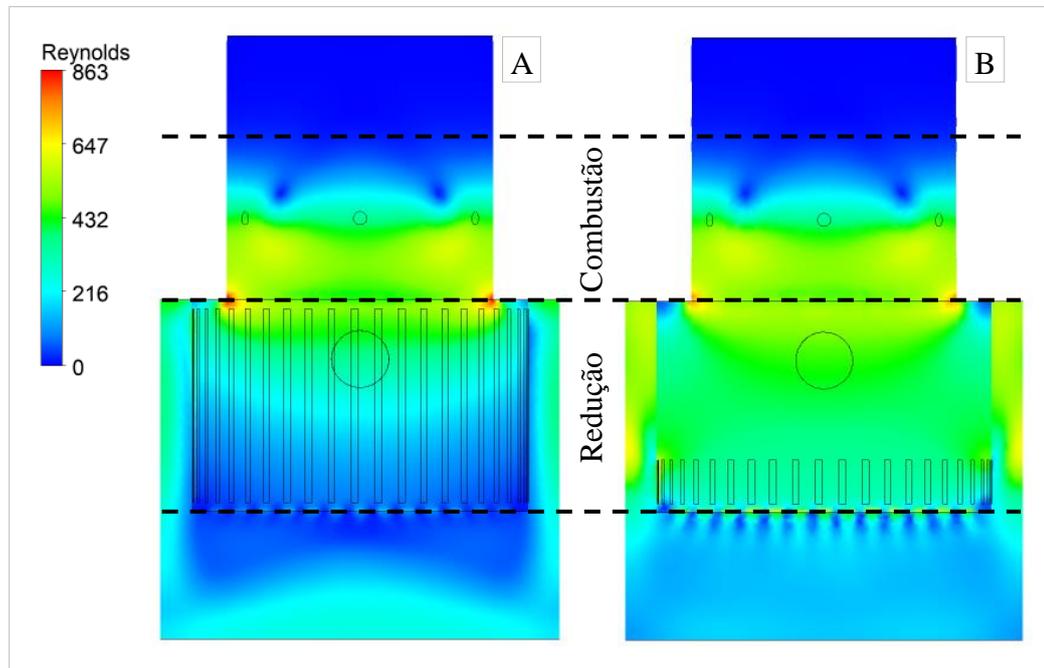
Figura 8 - Correntes simuladas no interior do gaseificador para a condição padrão (A) e com a barreira física (B)



Fonte: O autor.

O número de Reynolds, observado na Figura 9, foi calculado no plano central do gaseificador. Na configuração padrão (Figura 9A) pode se observar o baixo número de Reynolds na parte inferior da região de redução. Essa condição indica a pouca influência das forças de inércia, resultando em baixas taxas de reação nesses locais. Em meios porosos o fluxo torna-se turbulento para valores de Reynolds acima de 280 (LESAGE et al., 2004). A implementação da barreira resultou no incremento do número de Reynolds acima desse valor na região de redução, Figura 9B. Com essa condição espera-se melhorar a taxa de reação e, consequentemente, a eficiência do processo.

Figura 9 - Número de Reynolds no plano central do gaseificador para a condição padrão (A) e com a barreira física (B)



Fonte: O autor.

Diferente do esperado, a inserção da barreira física na zona de redução não resultou em alterações significativas na composição e no poder calorífico do gás. Apesar de pequenas variações, os parâmetros do gaseificador foram afetados negativamente, exceto a razão de ar, Tabela 6.

Tabela 6 - Composição e poder calorífico inferior do gás

Condição de gaseificação	Qualidade do gás						Parâmetros do gaseificador						
	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂	H ₂ /CO	PCI	Eg	Cg	Cp	Op	RA	η _f	η _q
	%	%	%	%	-	MJ/Nm ³	%	%	%	%	-	%	%
Padrão	21,4 (1,18)	9,3 (0,86)	1,2 (0,01)	8,5 (0,72)	0,40 -	4,07 (0,07)	54,4 (1,87)	9,9 (0,38)	7,2 (2,32)	28,5 (0,07)	0,44 (0,06)	53,1 (0,02)	62,7 (0,02)
Barreira Física	20,3 (0,18)	10,6 (0,38)	1,3 (0,17)	8,4 (0,08)	0,41 -	3,95 (0,03)	49,6 (1,38)	10,2 (0,11)	9,4 (0,21)	30,8 (1,06)	0,41 (0,03)	50,6 (0,01)	60,7 (0,01)

Fonte: O autor. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão. CO = monóxido de carbono; CO₂ = dióxido de carbono; CH₄ = metano; H₂ = hidrogênio; H₂/CO = relação entre hidrogênio e monóxido de carbono; PCI = poder calorífico inferior; Eg = energia contida no gás; Cg = calor contido no gás; Cp = calor perdido pelas paredes do reator; Op = outros produtos; RA = razão de ar; η_f = eficiência a frio; η_q = eficiência a quente.

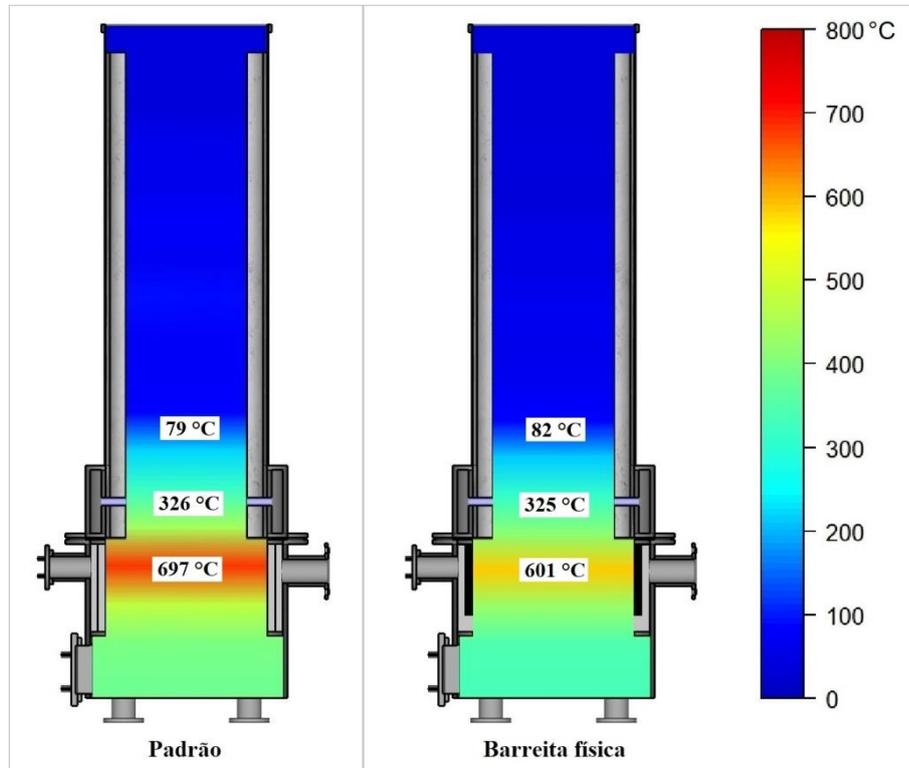
A principal vantagem do uso da barreira física foi a maior estabilidade de funcionamento do gaseificador, com menores variações entre as repetições, evidenciado pelos baixos desvios padrões, Tabela 6.

A estabilidade do funcionamento pode ser explicada pela menor variação no perfil de temperaturas com a utilização da barreira física, Figura 10. Ademais, como observado na Figura 8, a barreira física uniformizou as correntes de gases na zona de redução, favorecendo a estabilização do leito e das reações.

A menor temperatura na zona de redução (Figura 10) pode ter influenciado negativamente a energia contida no gás e os rendimentos do gaseificador, Tabela 6. A redução da temperatura na zona de redução pode ser justificada pelo maior calor contido no gás e pelas maiores perdas de calor pelas paredes do reator.

Segundo Murugan e Joseph Sekhar (2017) trabalhar com temperaturas adequadas nas zonas de reação do gaseificador permite aumentar a conversão da biomassa em gás, pois temperaturas muito baixas podem desfavorecer a ocorrência de reações ou torná-las incompletas. A redução de quase 100°C na temperatura na zona redução, influenciou de forma negativa o rendimento do gaseificador e também na divergência entre a simulação e o observado nos resultados experimentais. Recomenda-se modificar a zona de combustão do reator construindo um afunilamento para passagem dos gases, favorecendo o aumento da temperatura do leito nessa região.

Figura 10 - Esquemas com temperaturas do reator para as gaseificações com cavacos na condição padrão e com barreira física



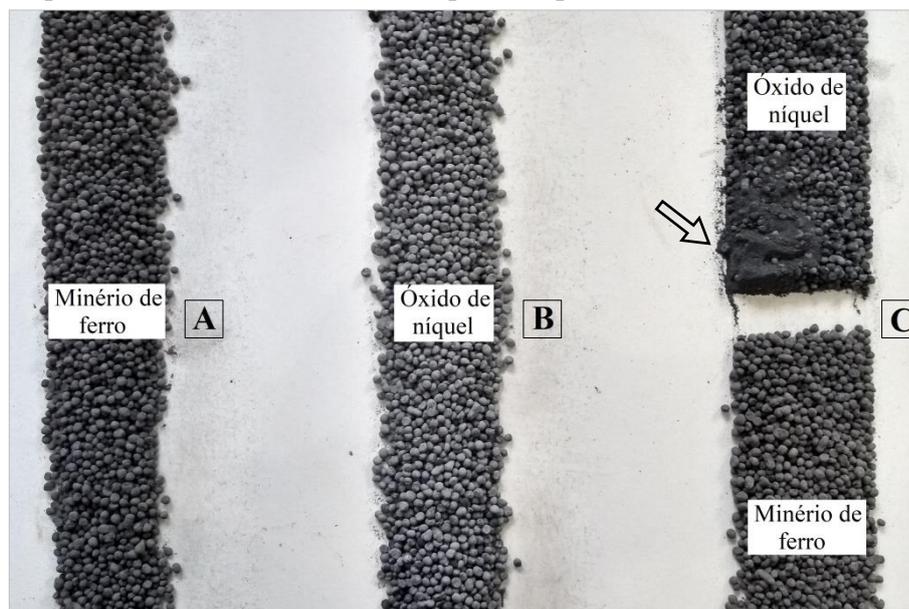
Fonte: O autor.

4.2 Uso de catalisadores

4.2.1 Aspecto visual dos catalisadores

Na Figura 11 observa-se o aspecto visual dos catalisadores após a gaseificação. A principal diferença foi a mudança na coloração se comparado aos catalisadores calcinados (Figura 4). A coloração acinzentada adquirida é devido a deposição de carbono na superfície.

Figura 11 - Aspecto visual dos catalisadores após o experimento



Fonte: O autor.

De modo geral, os catalisadores permaneceram íntegros após o experimento, havendo pequena geração de pó no catalisador produzido com minério de ferro (Figura 11A) e óxido de níquel (Figura 11B). No entanto, quando combinados no mesmo suporte (Figura 11C), foi observada significativa geração de pó (indicado pela seta) no catalisador de óxido de níquel.

Segundo Zhang et al. (2018) é necessário que o material de suporte tenha estreita interação com o componente ativo para que o catalisador mantenha integridade durante o uso. No caso do níquel, os precursores afetam significativamente essa interação, consequentemente o rendimento de conversão e a desativação, sendo mais utilizado o nitrato de níquel pelo baixo custo, alta efetividade e resistência durante a catálise do gás de biomassa.

O método de preparo do catalisador também afeta sua qualidade, sendo mais utilizada a impregnação, na qual o suporte é saturado com os demais componentes, podendo ser a seco ou a úmido. Essa técnica, de modo geral, proporciona fraca interação entre as partes e baixa dispersão do componente ativo (ZHANG et al., 2018). A co-precipitação é uma técnica promissora e tem como principais vantagens a formação de partículas menores com alta área superficial, forte interação entre as partes e boa dispersão do componente ativo (WANG et al., 2013). A técnica utilizada neste trabalho se assemelha à co-precipitação, no entanto, gera partículas com tamanhos significativamente maiores.

O material de suporte influencia diretamente a atividade dos catalisadores, o mais utilizado em catalisadores de níquel é a alumina, fonte de Al_2O_3 , tem eficiência em reações de reforma a vapor, resistência térmica e permite a boa dispersão do componente ativo. No

entanto, devido a sua natureza ácida, ocorre facilmente a deposição de carbono na superfície do catalisador e, conseqüentemente, a redução da atividade do componente ativo. Uma solução para minimizar a deposição de carbono é uso de suportes básicos como MgO, CaO, Ca₂O₃, porém permitem baixa dispersão do componente ativo e exibem pequena área superficial (YUNG et al., 2009; ZHANG et al., 2018). No preparo do catalisador de óxido de níquel deste trabalho foi adicionado calcário dolomítico como fonte de MgO e CaO na tentativa de aumentar a efetividade do componente ativo pela neutralização da acidez do concreto refratário.

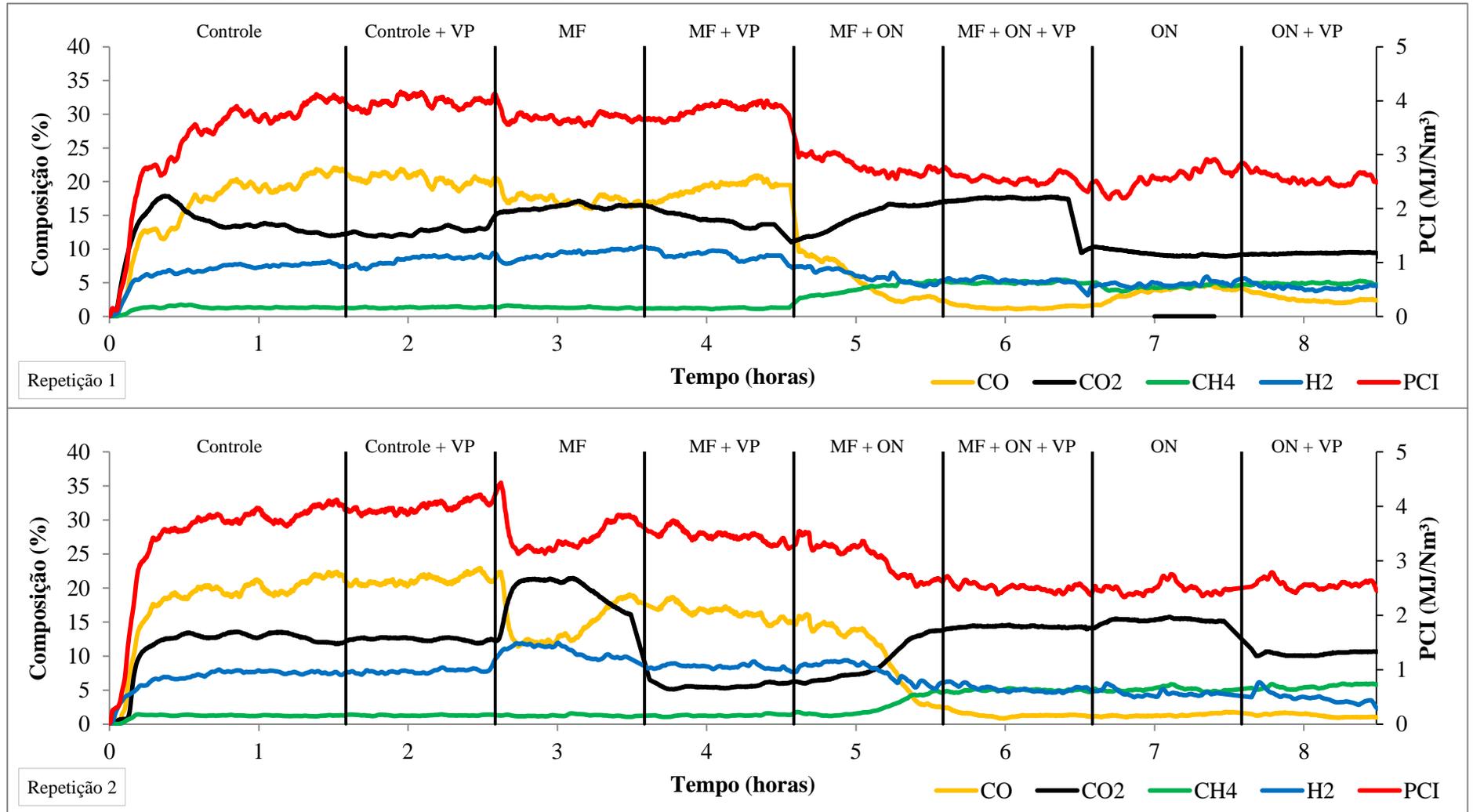
Metais de transição, como o ferro, cobalto, manganês e cobre, são utilizados como promotores, potencializando a ação do níquel e retardando a desativação. O ferro é um importante promotor pelo potencial de formar ligas com o níquel em catalisadores suportados por Al₂O₃ (WANG et al., 2011). A adição de ferro ao catalisador de níquel suportado por Al₂O₃ também foi avaliada por Dong et al. (2017), os autores observaram aumento da produção de hidrogênio com o uso dos catalisadores, e que o incremento da relação entre ferro e níquel promoveu pequeno decréscimo no conteúdo de hidrogênio e significativa redução da deposição de carbono. Li et al. (2014) observaram que o catalisador de níquel combinado a Fe, Mg e Al, na proporção entre ferro e níquel de 0,25, teve maior desempenho catalítico para conversão de alcatrão em gases, sendo superior aos catalisadores que não houve a combinação entre ferro e níquel.

Vale ressaltar que, após a primeira repetição do experimento, os catalisadores foram novamente calcinados a 650 °C por 6 horas e reutilizados na segunda repetição. Segundo Li et al. (2014) a regeneração altera as características dos catalisadores, reduzindo a atividade catalítica em sucessivas reciclagens e reuso.

4.2.2 Composição e poder calorífico inferior do gás

Na Figura 12 pode ser observado que os tratamentos afetaram a composição e poder calorífico inferior do gás. É notória as diferenças nas variações para um mesmo tratamento entre as repetições, sendo atribuídas ao reuso dos catalisadores.

Figura 12 - Composição e poder calorífico inferior do gás



Fonte: O autor. VP = vapor; MF = minério de ferro; ON = óxido de níquel; CO = monóxido de carbono; CO₂ = dióxido de carbono; CH₄ = metano; H₂ = hidrogênio; PCI = poder calorífico inferior.

A adição de vapor teve por objetivo aumentar o conteúdo de hidrogênio no gás e favorecer reações de reforma, no entanto, foi observado o aumento do hidrogênio apenas no tratamento controle, não ficando evidenciado a ocorrência das reações de reforma a vapor, sendo justificado pela baixa temperatura do vapor utilizado.

Nas gaseificações convencionais (controle), o poder calorífico inferior do gás foi influenciado pelo conteúdo de monóxido de carbono, componente majoritário do gás, Figura 12. Todos os catalisadores reduziram o conteúdo de monóxido de carbono, e conseqüentemente o poder calorífico inferior. Esse efeito foi mais acentuado em tratamentos realizados com catalisadores produzidos com óxido níquel, onde foram observados valores de monóxido de carbono inferiores a 10%. Outro efeito dos catalisadores de níquel foi o aumento do conteúdo de metano no gás, no tratamento de níquel combinado com vapor houve incremento de 4 vezes, Tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades do gás proveniente de gaseificações controle e com catalisadores

Tratamento	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂	H ₂ /CO	PCI	TCat.
	%	%	%	%	-	MJ/Nm ³	° C
Controle	20,0 (0,42)	13,0 (0,17)	1,3 (0,07)	7,6 (0,03)	0,38 -	3,81 (0,03)	433,3 (11,79)
Controle + Vapor	20,7 (0,67)	12,6 (0,17)	1,3 (0,07)	8,3 (0,67)	0,40 -	4,00 (0,01)	411,7 (28,76)
MF	15,8 (1,94)	18,1 (2,43)	1,3 (0,01)	10,0 (0,63)	0,64 -	3,54 (0,17)	413,7 (13,2)
MF + Vapor	18,1 (2,42)	9,7 (5,91)	1,2 (0,05)	8,8 (0,40)	0,49 -	3,68 (0,33)	399,5 (11,08)
MF + ON	6,9 (4,36)	12,5 (4,58)	3,5 (1,40)	6,7 (1,38)	1,13 -	2,85 (0,20)	415,3 (49,03)
MF + ON + Vapor	1,2 (0,04)	16,0 (2,29)	5,0 (0,04)	5,0 (0,23)	4,19 -	2,51 (0,04)	400,2 (24,28)
ON	2,8 (2,04)	12,2 (4,42)	4,8 (0,55)	4,6 (0,33)	2,25 -	2,58 (0,10)	446,0 (49,5)
ON + Vapor	1,7 (0,74)	9,9 (0,62)	5,3 (0,43)	3,8 (0,39)	2,37 -	2,52 (0,02)	410,5 (58,69)

Fonte: O autor. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão. CO = monóxido de carbono; CO₂ = dióxido de carbono; CH₄ = metano; H₂ = hidrogênio; H₂/CO = relação entre hidrogênio e monóxido de carbono; PCI = poder calorífico inferior do gás; TCat = temperatura de uso dos catalisadores; MF = minério de ferro; ON = óxido de níquel.

Para uso como gás de síntese, é necessário obter a relação H₂/CO mínima de 2:1, sendo verificada nos tratamentos com catalisadores de níquel. A maior relação H₂/CO foi observada no tratamento combinando os catalisadores de minério e níquel com adição de

vapor, chegando a 4,19:1. Ashok e Kawi (2014), avaliando catalisadores de níquel com suporte de ferro e alumina, obtiveram relação H_2/CO de 4,5.

O aumento da relação H_2/CO nos tratamentos com catalisadores teve efeito direto no decréscimo do poder calorífico inferior do gás e foi ocasionada pela expressiva redução do conteúdo de monóxido de carbono em relação ao de hidrogênio, Tabela 7.

Baseado no uso do gás como combustível para geração de energia térmica, o melhor tratamento foi o controle com vapor, por apresentar maior poder calorífico inferior. Porém quando o objetivo é o uso do gás em motores ou turbinas é desejável que, além do poder calorífico, tenha maior concentração de hidrogênio, sendo assim, o mais indicado seria a gaseificação realizada com catalisador de minério de ferro. O hidrogênio possui velocidade de combustão superior ao monóxido de carbono (MCLEAN et al., 1994), tornando mais estável o funcionamento dos motores e permitindo ajustes na curva de potência.

É importante no desenvolvimento de catalisadores para gaseificação de biomassa considerar a formação dos produtos, bem como a proporção daqueles de interesse em função do uso, como é o caso da relação H_2/CO para gás de síntese. Segundo Zhang et al. (2018) os maiores desafios no desenvolvimento de catalisadores de níquel para reforma a vapor são a elevada atividade catalítica e resistência a deposição de carbono, a sinterização e o envenenamento por enxofre.

A reforma do alcatrão por meio de catalisadores compreende diversas reações como as listadas na Tabela 8 (ZHANG et al., 2018), as quais podem ou não acontecer simultaneamente, sendo difícil inferir com exatidão a ocorrência de determinada reação.

Confrontando os resultados Tabela 7 com as reações listadas na Tabela 8, possivelmente, ocorreu a reação gás água de *shift* quando utilizado o catalisador de minério de ferro, devido ao aumento do conteúdo de hidrogênio e dióxido de carbono em detrimento a redução de monóxido de carbono. Outra reação de possível ocorrência é a metanação nos tratamentos com catalisadores de níquel, onde foi observado o aumento do conteúdo de metano. Ambas as reações são exotérmicas e favorecidas em baixas temperaturas.

Tabela 8 - Principais reações envolvidas na conversão do alcatrão

Processo	Reações
Reforma com vapor	$C_nH_m + nH_2O \rightarrow (n + m/2)H_2 + nCO$
Reforma a seco	$C_nH_m + nCO_2 \rightarrow (m/2)H_2 + 2nCO$
Craqueamento	$C_nH_m \rightarrow C + C_xH_y + \text{gases}$
Hidro craqueamento ou hidro reforma	$C_nH_m + H_2 \rightarrow CO + H_2 + CH_4 + \dots + \text{carbono}$
Reação gás água de <i>shift</i>	$CO + H_2O \leftrightarrow H_2 + CO_2$ $\Delta H = - 41 \text{ kJ/mol}$
Metanação	$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$ $\Delta H = - 206 \text{ kJ/mol}$

Fonte: Zhang et al. (2018)

As reações de reforma, de craqueamento e conversão do metano em monóxido de carbono e hidrogênio são endotérmicas e favorecidas em temperaturas elevadas. No presente estudo as temperaturas do reator de reforma foram relativamente baixas, próximas a 400 °C. A limitação das temperaturas no reator de reforma se deu pela dificuldade no aumento da temperatura do reator principal, visto que este fornecia calor através do gás para as reações de reforma.

Segundo Valderrama Rios et al. (2018) as temperaturas comumente utilizadas na operação de catalisadores de níquel estão entre 750 a 950 °C, as quais favorecem o tempo de atividade do catalisador e diferentes equilíbrios reacionais, bem como a proporção dos produtos gerados. No entanto, temperaturas extremamente elevadas podem também causar desativação dos catalisadores, pela ação direta do calor na sinterização dos metais ou pela perda de resistência mecânica do catalisador (YUNG et al., 2009).

Vale ressaltar que o uso de temperaturas elevadas para catálise demanda energia térmica externa, ocasionando elevação dos custos. Logo um dos propósitos deste trabalho, foi aproveitar o calor contido no gás para fornecimento de temperatura para atuação dos catalisadores. No entanto, as baixas temperaturas alcançadas no reator de reforma parecem ter deslocado os equilíbrios reacionais no sentido contrário ao esperado.

4.2.3 Balanço de massa e energia

Na Tabela 9 são apresentados os balanços de massa e energia das gaseificações em função dos tratamentos.

Tabela 9 - Balanço de massa e energia e parâmetros operacionais do gaseificador

Tratamento	Biomassa	Ar	Gás	Energia na Biomassa	Energia no Gás	η_f
	kg/h	Nm ³ /h	Nm ³ /h	kW	kW	%
Controle	13,5 (1,65)	27,3 (1,53)	28,6 (0,33)	207,9 (25,30)	108,9 (2,24)	52,8 (5,44)
Controle + Vapor	13,4 (1,74)	23,2 (2,22)	27,9 (1,31)	205,5 (26,79)	111,7 (4,94)	54,7 (4,76)
MF	13,0 (1,11)	24,3 (1,02)	25,4 (1,11)	200,7 (17,1)	89,9 (0,47)	45,0 (4,06)
MF + Vapor	13,2 (0,31)	24,8 (1,19)	27,1 (1,04)	203,4 (4,84)	99,5 (5,19)	48,9 (1,39)
MF + ON	13,0 (0,09)	24,6 (3,74)	25,0 (3,92)	200,4 (1,32)	71,8 (16,09)	35,8 (7,82)
MF + ON + Vapor	11,9 (0,50)	23,4 (1,15)	24,1 (0,15)	182,7 (7,75)	60,4 (0,69)	33,1 (1,81)
ON	13,0 (1,33)	26,4 (4,99)	25,1 (4,59)	199,4 (20,48)	64,9 (14,33)	32,3 (3,88)
ON + Vapor	13,4 (1,48)	25,4 (4,61)	26,5 (2,93)	206,3 (22,76)	66,8 (7,00)	32,4 (0,17)

Fonte: O autor. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão. MF = minério de ferro; ON = óxido de níquel; η_f = eficiência a frio.

Observa-se na Tabela 9 que variações no consumo de biomassa foram afetadas pela injeção de ar para gaseificação.

As mudanças nas vazões de ar e gases estão associadas a permeabilidade do leito de reação no gaseificador, de modo que, a maior movimentação do leito, favorece a percolação dos gases e do ar, refletindo no aumento das vazões e, conseqüentemente, no consumo de biomassa. A “energia na biomassa” (Tabela 9) está diretamente associada ao seu consumo pelo reator, visto que durante os ensaios de gaseificação não ocorreram variações em suas propriedades físicas e químicas, principalmente em seu poder calorífico útil.

Nos tratamentos realizados com catalisadores e adição de vapor considerou-se o poder calorífico inferior do gás tratado para os cálculos de produção de energia e rendimento do reator. Dessa forma, observa-se significativa redução de energia nos tratamentos com catalisadores, devido a redução do poder calorífico inferior do gás, Tabela 9. A maior produção de energia foi obtida na gaseificação controle com adição de vapor (111,7 kW) e a menor quando combinados os catalisadores de minério e níquel mais vapor (60,4 kW).

O rendimento (η_{frio}) seguiu a mesma tendência, variando entre 54,7% para a gaseificação controle realizada com a adição de vapor e 32,3% para as realizadas com catalisador de níquel, tendo o catalisador de minério combinado com níquel mais a adição de

vapor e o catalisador de níquel mais adição de vapor obtido valores médios de 33,1 e 32,4%, respectivamente.

5 CONCLUSÕES

A barreira física inserida na zona de redução não melhorou a qualidade do gás e no rendimento do reator, no entanto, a operação do reator foi facilitada, tornando mais estável.

A adição de vapor teve pequeno efeito sobre a composição e poder calorífico inferior do gás.

O catalisador de minério de ferro teve como principal efeito o aumento do conteúdo de hidrogênio no gás, alcançando 10%.

O catalisador de níquel aumentou a relação H_2/CO do gás para 2,3:1, em média, podendo ser considerado como gás de síntese.

A maior relação H_2/CO foi obtida quando combinado o catalisador de minério com níquel e vapor.

Catalisadores para gaseificação de biomassa, produzidos com materiais convencionais e utilizados em reator de reforma após o gaseificador, resultaram em modificações significativas na composição do gás, devendo ser considerado o uso final do gás para escolha do melhor tratamento.

Os resultados evidenciaram a viabilidade técnica dos catalisadores de ferro e níquel para gaseificação de biomassa, no entanto é necessário o desenvolvimento de novos estudos visando determinar proporções mais adequadas dos componentes, aumento da resistência mecânica dos aglomerados, avaliações do tempo até a desativação e de ciclos de reuso dos catalisadores.

REFERÊNCIAS

AHMAD, A. A.; ZAWAWI, N. A.; KASIM, F. H.; INAYAT, A.; KHASRI, A. Assessing the gasification performance of biomass: A review on biomass gasification process conditions, optimization and economic evaluation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1333-1347, 2016.

ANDRADE, R. V. **Gaseificação de Biomassa: Uma Análise Teórica e Experimental**. 2007. 227 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2007.

ASHOK, J.; KAWI, S. Nickel–Iron Alloy Supported over Iron–Alumina Catalysts for Steam Reforming of Biomass Tar Model Compound. **ACS Catalysis**, v. 4, n. 1, p. 289-301, 2014.

BUSTOS-VANEGAS, J. D.; MARTINS, M. A.; CARNEIRO, A. D. C. O.; FREITAS, A. G.; BARBOSA, R. C. Thermal inertia effects of the structural elements in heat losses during the charcoal production in brick kilns. **Fuel**, v. 226, p. 508-515, 2018.

CHAN, F. L.; TANKSALE, A. Review of recent developments in Ni-based catalysts for biomass gasification. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 428-438, 2014.

DE DIEGO, L. F.; GARCÍA-LABIANO, F.; GAYÁN, P.; ABAD, A.; MENDIARA, T.; ADÁNEZ, J.; NACKEN, M.; HEIDENREICH, S. Tar abatement for clean syngas production during biomass gasification in a dual fluidized bed. **Fuel Processing Technology**, v. 152, p. 116-123, 2016.

DONG, L.; WU, C.; LING, H.; SHI, J.; WILLIAMS, P. T.; HUANG, J. Development of Fe-Promoted Ni–Al Catalysts for Hydrogen Production from Gasification of Wood Sawdust. **Energy & Fuels**, v. 31, n. 3, p. 2118-2127, 2017.

GALVITA, V. V.; POELMAN, H.; DETAVERNIER, C.; MARIN, G. B. Catalyst-assisted chemical looping for CO₂ conversion to CO. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 164, p. 184-191, 2015.

GUO, F.; DONG, Y.; DONG, L.; GUO, C. Effect of design and operating parameters on the gasification process of biomass in a downdraft fixed bed: An experimental study. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 11, p. 5625-5633, 2014.

KOIKE, M.; LI, D.; WATANABE, H.; NAKAGAWA, Y.; TOMISHIGE, K. Comparative study on steam reforming of model aromatic compounds of biomass tar over Ni and Ni–Fe alloy nanoparticles. **Applied Catalysis A: General**, v. 506, p. 151-162, 2015.

LESAGE, F.; MIDOUX, N.; LATIFI, M. A. New local measurements of hydrodynamics in porous media. **Experiments in Fluids**, v. 37, n. 2, p. 257-262, 2004.

LI, D.; KOIKE, M.; WANG, L.; NAKAGAWA, Y.; XU, Y.; TOMISHIGE, K. Regenerability of Hydrotalcite-Derived Nickel–Iron Alloy Nanoparticles for Syngas Production from Biomass Tar. **ChemSusChem**, v. 7, n. 2, p. 510-522, 2014.

MCLEAN, I. C.; SMITH, D. B.; TAYLOR, S. C. The use of carbon monoxide/hydrogen burning velocities to examine the rate of the CO+OH reaction. **Symposium (International) on Combustion**, v. 25, n. 1, p. 749-757, 1994.

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.

MURUGAN, P. C.; JOSEPH SEKHAR, S. Species – Transport CFD model for the gasification of rice husk (*Oryza Sativa*) using downdraft gasifier. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 139, p. 33-40, 2017.

PARDO-PLANAS, O.; ATIYEH, H. K.; PHILLIPS, J. R.; AICHELE, C. P.; MOHAMMAD, S. Process simulation of ethanol production from biomass gasification and syngas fermentation. **Bioresource Technology**, v. 245, p. 925-932, 2017.

PEDRAS, M. H. J.; LEMOS, M. J. S. COMPUTATION OF TURBULENT FLOW IN POROUS MEDIA USING A LOW-REYNOLDS $K-\epsilon$ MODEL AND AN INFINITE ARRAY OF TRANSVERSALLY DISPLACED ELLIPTIC RODS. **Numerical Heat Transfer, Part A: Applications**, v. 43, n. 6, p. 585-602, 2003.

PEREIRA, E. G.; DA SILVA, J. N.; DE OLIVEIRA, J. L.; MACHADO, C. S. Sustainable energy: A review of gasification technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 7, p. 4753-4762, 2012.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2017.

SAITO, M. B.; LEMOS, M. J. S. A macroscopic two-energy equation model for turbulent flow and heat transfer in highly porous media. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, n. 11, p. 2424-2433, 2010.

SALES, C. A. V. B.; MAYA, D. M. Y.; LORA, E. E. S.; JAÉN, R. L.; REYES, A. M. M.; GONZÁLEZ, A. M.; ANDRADE, R. V.; MARTÍNEZ, J. D. Experimental study on biomass (eucalyptus spp.) gasification in a two-stage downdraft reactor by using mixtures of air, saturated steam and oxygen as gasifying agents. **Energy Conversion and Management**, v. 145, p. 314-323, 2017.

SANSANIWAL, S. K.; PAL, K.; ROSEN, M. A.; TYAGI, S. K. Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 363-384, 2017.

SUTTON, D.; KELLEHER, B.; ROSS, J. R. H. Review of literature on catalysts for biomass gasification. **Fuel Processing Technology**, v. 73, n. 3, p. 155-173, 2001.

VALDERRAMA RIOS, M. L.; GONZÁLEZ, A. M.; LORA, E. E. S.; ALMAZÁN DEL OLMO, O. A. Reduction of tar generated during biomass gasification: A review. **Biomass and Bioenergy**, v. 108, p. 345-370, 2018.

WANG, H.; MILLER, J. T.; SHAKOURI, M.; XI, C.; WU, T.; ZHAO, H.; AKATAY, M. C. XANES and EXAFS studies on metal nanoparticle growth and bimetallic interaction of Ni-based catalysts for CO₂ reforming of CH₄. **Catalysis Today**, v. 207, p. 3-12, 2013.

WANG, L.; LI, D.; KOIKE, M.; KOSO, S.; NAKAGAWA, Y.; XU, Y.; TOMISHIGE, K. Catalytic performance and characterization of Ni-Fe catalysts for the steam reforming of tar from biomass pyrolysis to synthesis gas. **Applied Catalysis A: General**, v. 392, n. 1, p. 248-255, 2011.

WANG, L.; WELLER, C. L.; JONES, D. D.; HANNA, M. A. Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, n. 7, p. 573-581, 2008.

YUNG, M. M.; JABLONSKI, W. S.; MAGRINI-BAIR, K. A. Review of Catalytic Conditioning of Biomass-Derived Syngas. **Energy & Fuels**, v. 23, n. 4, p. 1874-1887, 2009.

ZANG, G.; TEJASVI, S.; RATNER, A.; LORA, E. S. A comparative study of biomass integrated gasification combined cycle power systems: Performance analysis. **Bioresource Technology**, v. 255, p. 246-256, 2018.

ZHANG, Z.; LIU, L.; SHEN, B.; WU, C. Preparation, modification and development of Ni-based catalysts for catalytic reforming of tar produced from biomass gasification. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 1086-1109, 2018.

CONCLUSÕES GERAIS

A gaseificação possui maior complexidade em relação aos demais processos de conversão da biomassa em energia. No Brasil ainda é incipiente, voltada principalmente para pesquisas. No entanto, a disponibilidade de biomassa vegetal e a demanda crescente por fontes renováveis de energia podem impulsionar o uso desta técnica. Certamente, as maiores dificuldades são o baixo conhecimento sobre o assunto, atraso tecnológico e a falta de incentivos governamentais para o setor. As grandes vantagens da gaseificação são a possibilidade de geração de energia distribuída, fornecimento de múltiplos produtos e a agregação de valor a biomassa e seus coprodutos.

A diversidade de biomassas deve ser considerada para escolha da tecnologia de gaseificação, ou mesmo para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de reatores. A fonte de biomassa irá afetar ainda o rendimento do processo bem como a qualidade do gás produzido, havendo necessidade em alguns casos de pré tratamentos que a torne mais utilizável para gaseificação.

Modificações em reatores podem demandar tempo e recursos financeiros, obtendo resultados não satisfatórios devido às complexas condições de reação. A qualidade do gás pode ser alterada com o uso de catalisadores apropriados, a exemplo, o a base de níquel pode facilmente ajustar a relação H_2/CO para produção de gás de síntese. Os catalisadores tem papel fundamental na produção de gás com qualidade superior destinado para transformação produtos químicos diversos, destacando aqueles com baixo custo e capacidade de catálise do gás bruto de biomassa.