

Reatores de Leito Fixo Concorrente e Fluidizado Borbulhante na Gaseificação da Biomassa Quando Utilizados para Geração de Energia Elétrica

Geisllan J. Felix, Hiago V. Miranda, Pedro H. Teixeira,
Tiago G. Pereira & Márcio J. Dias

Este artigo visou demonstrar e aprofundar o conhecimento na área de gaseificação de biomassa, tendo como objetivo fazer uma revisão de literatura dos reatores fixo concorrente e fluidizado borbulhante, bem como apresentar as vantagens e as desvantagens de suas utilizações em diferentes geradores de potência. O processo de construção do artigo baseou-se em pesquisas literárias utilizando as plataformas Web Of Science, Science Direct, Scielo, LILACS, Scopus, Pubmed, ACM com intuito de buscar artigos, teses e revistas que pesquisaram sobre os temas: biomassa; biomassa por gaseificação; vantagens e desvantagens da utilização dos reatores de leito fixo concorrente e fluidizado borbulhante na gaseificação da biomassa. O reator de leito fixo obteve melhor resultado quando se trata de baixo custo de construção, granulometria do combustível e valores de hidrogênio. O reator de leito fluidizado borbulhante destacou-se quando se trata de menor quantidade de impurezas e baixo teor de alcatrão.

Palavras-chave: *biomassa; gaseificação; leito fixo concorrente; leito fluidizado borbulhante.*

This article aimed to demonstrate and deepen the knowledge in the biomass gasification area, with the objective of doing a literature review of the concurrent fixed and bubbling fluidized reactors, as well as presenting the advantages and disadvantages of their use in different power generators. The article construction process was based on literary research using the Web Of Science, Science Direct, Scielo, LILACS, Scopus, Pubmed, ACM platforms in order to search for articles, theses and magazines that researched on the topics: biomass; gasification biomass; advantages and disadvantages of the use of concurrent fixed bed reactors and bubbling fluidized gasification of biomass. The fixed bed reactor achieved better results when it comes to low construction costs, fuel granulometry and hydrogen values. The bubbling fluidized bed reactor stood out when it comes to the least amount of impurities and low tar content.

Keywords: *biomass; gasification; concurrent fixed bed; bubbly fluidized bed.*

Introdução

Com o passar dos anos, cada vez mais os países e a população que neles vivem, estão se preocupando e conscientizando a respeito da conservação do meio ambiente, e com isso se torna necessário obter métodos de produzir energia elétrica de forma limpa e renovável. Vale lembrar que quanto mais desenvolvido se torna um país maior será o seu consumo de energia, com isso os meios utilizados para obter energia elétrica atualmente se destacam em gerar energia através de fontes não renováveis¹.

As fontes de energia não renováveis são qualquer tipo de energia extraída de elementos encontrados na natureza e que por sua vez tendem a ficar escassos, como o combustível fóssil (petróleo, gás natural, etc.) e elementos radioativos utilizados em usinas nucleares (plutônio, urânio, etc.). Dentre as fontes de energia não renováveis, o petróleo ainda se destaca como o centro da economia atual, mas esse cenário vem caminhando para uma breve mudança. Cada vez mais os países estão investindo na criação de fontes de energia alternativas, para que seja substituída uma grande parte dessas fontes não renováveis por fontes renováveis¹⁻³.

As fontes de energia renováveis são aquelas que mesmo utilizando elementos encontrados na natureza, não se esgotam. Dentre diversos tipos de energia renováveis disponíveis atualmente, as mais conhecidas são a energia hidrelétrica, solar, eólica, geotérmica, biomassa, etc. Estudos revelam que o impacto ambiental gerado por esses tipos de fonte de energia são muitas das vezes nulos ou muito baixos em relação aos impactos gerados pelas fontes de energia não renováveis^{3,4}.

A geração de energia renovável por meio da utilização de biomassa vem se destacando nas últimas décadas, embora pareça ser um método novo, esse tipo de fonte de energia já vem sendo usado a mais de 100 anos. Por vários anos a biomassa ficou esquecida, resultado da baixa no preço da energia e combustível disponível, mas com o decorrer dos anos essa realidade mudou, o preço desses insumos

crecem cada vez mais. Com esses aumentos desordenados de preço e de certa forma com o aumento dos impactos ambientais causados pelos métodos não renováveis, o estudo da utilização da biomassa ressurgiu e tem sido visto como uma boa alternativa de substituição às fontes não renováveis pela baixa emissão de poluentes².

Portanto, a biomassa surge com uma ideia muito interessante com objetivo de utilizar resíduos de madeira, agrícolas, ou até mesmo resíduos urbanos e industriais, o que de certa forma estaria relacionado à geração de energia através de resíduos que provavelmente iriam parar em lixões e aterros. No Brasil, esse tipo de geração de energia já é realidade e se destaca dentre os outros países por estar bastante avançado no processo de gaseificação de biomassa utilizando resíduos de cana de açúcar, madeira e folhas^{1,2,4}.

A gaseificação de biomassa, além de ser uma fonte de energia renovável também traz benefícios para o meio ambiente durante a sua produção, isso porque ela absorve o carbono da atmosfera, fazendo com que haja um balanço neutro durante o processo de produção de energia, contribuindo assim de maneira positivo na redução do efeito estufa, resultado de uma absorção de gás carbônico produzido durante o processo através de plantas que mantêm a concentração do gás sem alterações².

Uma das principais vantagens do processo de gaseificação da biomassa é a alta quantidade de gases produzidos no produto, especialmente o gás de síntese. O gás de síntese, também conhecido como Syngas, trata-se de uma mistura de monóxido de carbono e hidrogênio, a mistura desses dois gases forma um produto desejável no processo térmico de conversão de matéria prima sólida, especialmente no processo de gaseificação^{13,14}.

Dentro das pesquisas realizadas, encontra-se um dos principais motivos para novos desenvolvimentos de energias renováveis, é existente determinados tipos de energias renováveis como biomassa, geotérmica, hidrelétrica sendo a mais reconhecida e utilizada para geração de energia elétrica, oceânica, solar, vento. Todas com o mesmo objetivo, sendo eles reduzir o impacto

estrutural ao meio ambiente. Energias renováveis resulta em converter ciclos naturais, em energias, tendo como características ser inesgotáveis^{10,26}.

PRINCIPAIS FONTES DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

- **Energia gerada pelo processamento de Biomassa:** O processo de gaseificação consiste em uma série de reações simultâneas, como a pirólise, seguida da gaseificação e a combustão. Em outras palavras o processo se resume em quatro etapas, primeiramente a biomassa é colocada no interior do reator onde começa o processo de secagem, logo após começa a segunda parte do processo que consiste em realizar a pirólise. Nesse processo de pirólise a biomassa entra em contato com uma temperatura que varia de 400 e 800°C, onde ocorre uma espécie de pré-queima fazendo com que a biomassa se transforme em uma espécie de carvão vegetal, após o processo de pirólise ocorre à gaseificação propriamente dita, que é onde ocorre à queima desse carvão onde gera os gases usados na quarta etapa do processo denominada como combustão. Já nesse processo, os gases gerados pela queima são usados em motores à combustão e até mesmo em turbinas que tem um papel fundamental na geração de energia⁷.
- **Energia eólica:** É o aproveitamento da energia cinética correspondida pelo o vento, denominada inicialmente como cata-ventos a principal utilização da época por volta de 200 A.C natural da Pérsia era para bombear água e moagem de grãos. Atualmente é uma das principais fontes de energias renováveis, composto por hélices na vertical projeto aerodinâmico, transformando trabalho mecânico em energia elétrica. Atualmente em território brasileiro existe estudo para implantar a energia eólica, foi escolhido o estado do Ceará de acordo com os estudos é o estado onde possui maior fluxo de vento^{10,11}.

- **Energia solar:** Comumente conhecida como energia fotovoltaica, essa geração de energia consiste em obter a radiação fornecida pelo sol, por meio de elementos eletrônicos construídos para que a coleta da radiação seja armazenada corretamente e aplicada conforme a necessidade do usuário. De acordo com as pesquisas o princípio da geração fotovoltaico foi em 1839 Edmond Becquerel, analisando que alguns tipos de metais geram pequenas diferenças de potencial^{11,12}.

GERAÇÕES POR MEIO DE ENERGIA DE BIOMASSA

A geração de energia por biomassa está relacionada à extração de bagaços, madeiras, restos de animais entre outros tipos de resíduos. De acordo com os estudos a biomassa foi dividida em dois grupos para facilitar o entendimento e para separar qual o seu tipo de aplicação e extração, sendo assim tendo a biomassa tradicional e biomassa moderna^{11,12}.

Biomassa em um ponto de vista ecológico abrange a quantidade total de matéria viva que existe em um ecossistema ou população, podendo ser de origem animal ou vegetal. De forma geral pode se dizer que biomassa nada mais é do que resíduos humanos, podendo eles ser subprodutos da pecuária, resíduos de origem agrícola, exploração de madeiras, dejetos humanos, lixos, dentre outros. A ideia de usar resíduos na geração de energia ou calor foi uma maneira muito eficaz de usar algo que está em abundância no mundo (resíduos agrícolas, dejetos humanos, etc.) para resolver três problemas que afetam os dias atuais, sendo eles a falta de geração de energia de forma limpa, acabar com uma parte dos lixos acumulados da humanidade e diminuir o nível de carbônico do planeta. A diminuição do nível de carbono só é possível quando essa geração de energia por biomassa é feita por meio do processo de gaseificação, durante esse processo, o carbono é absorvido da atmosfera, fazendo com que haja um balanço neutro durante o processo de produção

de energia, o que contribui de certa forma na redução do efeito estufa^{2, 4, 10}.

O processo de geração de energia por meio da biomassa mais comentado e estudado na atualidade é o processo de gaseificação. Nesse tipo de processo, ocorre uma conversão termoquímica da biomassa em um produto gasoso combustível, que posteriormente pode ser usado em motores à combustão com a intenção de gerar energia ou calor para diversos tipos de aplicação^{1,10,11}.

PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO DA BIOMASSA

A gaseificação trata-se de um processo que tem o objetivo de converter biomassa em energia através da transformação termoquímica do material. Esse processo de conversão termoquímica transforma o combustível de entrada do reator (biomassa), em um produto gasoso combustível, que posteriormente é usado em diversas aplicações, como motores a combustão, geradores de energia, grandes motores em indústrias, geradores de calor, turbina a vapor, dentre outras aplicações^{18,20}.

O produto final de uma gaseificação tem relação direta ao tipo de biomassa utilizado como: combustível, tamanho da biomassa e tipo de reator utilizado, podendo ele ser por fluxo ascendente (*updraft*), fluxo descendente (*downdraft*) ou leito fluidizado. Essas características determinam a qualidade do gás combustível gerado, se esse gás não apresentar em sua composição óxidos de nitrogênio, pode se dizer que se trata de um gás de síntese, o que significa que pode ser utilizado na produção de combustíveis como amônia, gasolina e diesel. O reator de gaseificação baseia-se em uma construção simples que utiliza apenas a gravidade para a biomassa percorrer por todas as zonas descritas na figura 01^{15,19,20,29}.

O reator utilizado no processo de gaseificação de biomassa depende de quatro etapas bem definidas no seu interior, separadas por zonas onde cada uma tem o seu objetivo e características específicas. Essas zonas são fabricadas de forma sequencial e simultânea ao decorrer do fluxo por onde passa a biomassa. Essas zonas presentes no interior do reator são denominadas de desumidificação, pirólise, oxidação e redução^{19,20}.

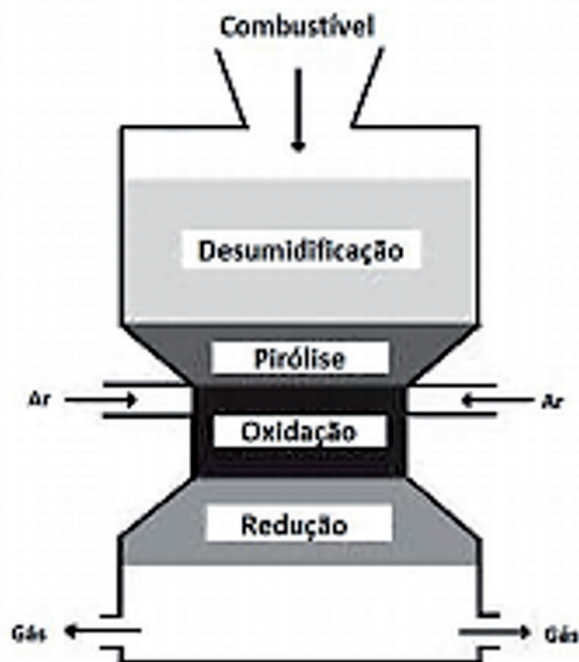


Figura 1: Zonas do reator. Fonte: Prabir, 2018²⁹

DESUMIDIFICAÇÃO

A primeira zona encontrada no reator de gaseificação é a zona de desumidificação também conhecida em outras literaturas como zona de secagem, essa região tem o objetivo de eliminar a umidade presente em toda a biomassa que está sendo usada como combustível no reator. A desumidificação ocorre através dos gases em altas temperaturas que fluem ascendentemente, resultado da transformação termoquímica que ocorre nas zonas localizadas mais abaixo do reator. Para evitar que durante o processo de secagem o material venha se decompor por conta do calor, é utilizada uma técnica de manter a temperatura entre 70 e 200 graus célsius, o que de fato é uma temperatura relativamente baixa^{20,22}.

A umidade que é expelida da biomassa é repassada para os gases, isso influencia de forma direta na eficiência térmica geral do gaseificador e no poder calorífico do mesmo, um ponto de extrema importância nessa etapa do

processo é inspecionar para que a desumidificação ocorra de forma eficaz, pois a gaseificação de uma biomassa com uma taxa de umidade muito elevada gera gases de baixa qualidade além de ocasionar diversos problemas como o excesso de fumaça gerado durante o processo^{20,22}.

PIRÓLISE

A segunda zona encontrada no reator de gaseificação é a zona de pirólise também conhecida como zona de desvolatilização. Essa área é formada por reações do tipo endotérmica, responsável pela degradação termoquímica da biomassa em um local ausente de oxidante. As zonas inferiores à zona de pirólise (zona de oxidação e redução) fornecem a energia de ativação que é necessária para ocorrer o processo de pirólise que geralmente começa a acontecer em torno de 200°C. Durante o processo de pirólise a biomassa que se encontrava na zona de desumidificação desce para a zona de pirólise onde ocorre a degradação térmica irreversível da biomassa^{20,22}.

O processo de pirólise baseia-se em transferir o calor para a partícula por meio de convecção, irradiação e condução. O calor é absorvido pela biomassa aumentando sua temperatura média onde começam a serem realizadas as principais reações. O controle dos parâmetros de controle e otimização nessa região é considerado muito difícil por se tratar de uma gradiente de temperatura não linear em função do tempo. A qualidade e a quantidade de gases gerados dependem do tempo de residência da biomassa na zona de pirólise, onde nessa fase a granulometria do combustível e a temperatura média da zona interferem diretamente nesses dois quesitos^{20,22}.

OXIDAÇÃO

A terceira zona encontrada no reator de gaseificação é a zona de oxidação, também conhecida como zona de combustão. Essa zona é responsável por abastecer todas as outras zonas com o seu calor que pode variar entre 700 a 2000°C. Nessa zona o combustível sólido chega

praticamente transformado em uma mistura gasosa, resultado das reações que ocorreram na zona de pirólise, na zona de pirólise a biomassa já é parcialmente oxidada resultando em um aumento de temperatura devido a algumas reações altamente exotérmicas, dentre tanto é difícil dizer o que está sendo queimado nessa zona^{20,22,23}.

Muitas aplicações de oxidação parcial da biomassa foram surgindo com o tempo, à oxidação parcial da biomassa com o oxigênio produzem gases que apresentam maiores valores de aquecimento quando comparado com o modelo tradicional, sendo esse o modelo que oxida a biomassa com o ar que de qualquer forma se trata de duas tecnologias importantes quanto se trata de aproveitamento energético da biomassa^{20,22,23}.

REDUÇÃO

A quarta e última zona encontrada no reator, é a zona de redução, também conhecida como zona de gaseificação. Essa região trabalha com temperaturas entre 800 e 1100°C onde ocorrem as reações endotérmicas. O processo acontece da seguinte forma, na zona de oxidação ocorre uma geração de gases que posteriormente alcançam a zona de redução, nessa zona há uma grande deficiência de oxigênio, pois o mesmo oxigênio já foi consumido na zona de oxidação. O fato de essa zona ser conhecida como zona de gaseificação, ocorre pelo fato que é nela que ocorre de fato a gaseificação do coque, que é formado por monóxido de carbono e hidrogênio. A temperatura típica de trabalho de um reator de fluxo descendente (*downdraft*) e leito fluidizado gira em torno de 700 a 900°C^{20,22,23}.

TIPOS DE PROCESSOS DE GASEIFICAÇÃO

Com o surgimento da gaseificação de biomassa, diversas tecnologias foram utilizadas para melhorar cada vez mais os resultados no processo de gaseificação, a escolha do tipo de gaseificador é determinada pela característica da biomassa, entre elas, o teor de umidade, teor de cinza e o tamanho da biomassa em questão. O

gaseificador se trata de um tipo de reator químico onde ocorrem algumas reações. No interior desse reator químico a biomassa perde umidade, aquece, sofre o processo de pirólise, oxida e se deteriora durante toda a extensão do reator, sobrando assim como produto final uma mistura de cinzas e combustível gasoso. Em resumo, como já citado acima, ocorrem quatro processos distintos dentro do reator químico, a secagem da biomassa, pirólise, oxidação e redução. Dentre os vários tipos de processos destacam-se os gaseificadores em leito fixo (fluxo ascendente e fluxo descendente) e leito fluidizado (leito fluidizado borbulhante e leito fluidizado circulante)^{4-6,15}.

GASEIFICAÇÃO EM LEITO FIXO

A gaseificação por leito fixo, conhecida também em outras literaturas como gaseificação em leito móvel descendente, tem esse nome pelo fato de que ocorre em operações contínuas, na medida em que o gaseificador é alimentado com a biomassa e as cinzas são retiradas, ocorre um movimento do material do topo para o fundo do reator. Os reatores ou gaseificadores que mais se destacam, são os modelos verticais, onde a gaseificação ocorre em forma de camadas no interior do leito, sendo essas camadas os quatro processos considerados os mais importantes da gaseificação, sendo eles o processo de secagem, pirólise, oxidação ou combustão e redução^{18, 20}.

Gaseificadores de leito fixo, é classificado de acordo com a direção em que o fluxo do gás gerado no processo percorre, podendo ele ser classificado como gaseificação *updraft* ou *downdraft*, o que se relaciona diretamente se o fluxo de gás gerado for ascendente e descendente respectivamente. Cada um desses modelos se enquadra em um tipo de produto final, e com isso em um tipo específico de aplicação, tratando cada caso com as características necessárias e particulares. Essa variação dos modelos de gaseificadores fixo pode ser vista melhor na figura 2²⁰⁻²⁴.

Estudos comprovam que os gaseificadores de leito fixo, é o tipo de gaseificador que apresenta uma maior eficiência quando trabalhada com combustível de alta densidade e granulometria grossa. Uma característica que faz com que esse modelo de gaseificador seja o mais utilizado atualmente é o fato de ser um modelo relativamente mais fácil de projetar

e, sobretudo, manusear. Outra característica importante é o fato de que nesse tipo de gaseificador, a matéria a ser gaseificada se move apenas por gravidade, esse método é muito usado quando trata se de quantidade pequena de biomassa, vale lembrar que tanto os gaseificadores de leito fixo poderiam ser desenvolvido para aumentar sua capacidade, porém até os dias atuais isso ainda não foi uma prioridade. Esse tipo de geração de energia elétrica tem sido usado na alimentação de motores à combustão interna com capacidade de 100 kW a 10 MW^{4,5,6,20}.

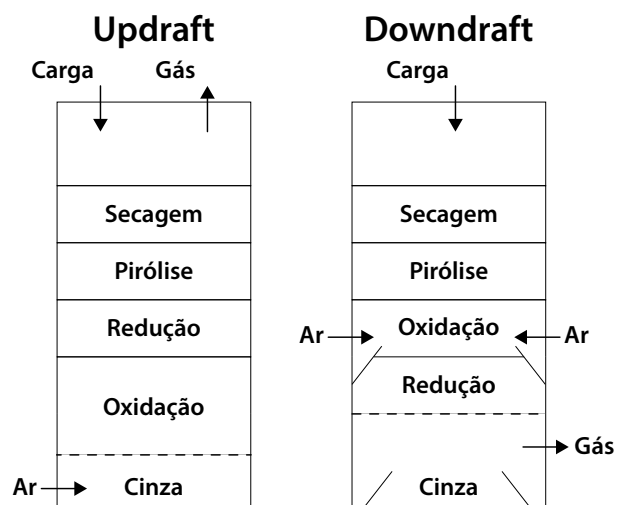


Figura 2: Tipos de gaseificadores de leito fixo. Fonte: Belgiorino et al. 2003²⁴

FLUXO ASCENDENTE (UPDRAFT)

O gaseificador de fluxo ascendente é também conhecido como gaseificador *updraft*, nesse tipo de gaseificador a alimentação é realizada pelo topo enquanto o vapor d'água e o ar é alimentado por meio de uma grelha localizada na base do gaseificador, onde muitas vezes se encontra coberta de cinzas. Nesse tipo de configuração, ao contrário da gaseificação *downdraft*, os gases gerados são expelidos pela parte superior do reator. Consequência disso, na parte onde ocorre a pirólise, o alcatrão formado no processo é carregado juntamente com as correntes de gases quentes, o que resulta em um produto final de gás com alto teor de alcatrão^{20,24}.

Um ponto positivo desse tipo de gaseificador, é a capacidade de trabalhar com matéria prima composta de teor inorgânico elevado, como é o caso dos resíduos urbanos abundantes em grandes cidades. Outro ponto positivo e não menos importante dessa configuração é a elevada troca de calor que ocorre dentro do reator entre os gases gerados e a alimentação inserida no reator, resultando assim em uma saída de gases com temperatura baixa^{20,24}.

O gaseificador *updraft* é utilizado na gaseificação de carvão há mais de 150 anos, contando com uma grande quantidade de gaseificadores funcionando até os dias atuais em todo o mundo. Mas como tudo tem um ponto negativo, esse tipo de gaseificador por produzir um alto teor de alcatrão, exige uma limpeza do gás antes que seja possível a aplicação do mesmo em motores e turbinas, sendo assim essa configuração de reator não é indicado para veículos motorizados^{4,5,6,20}.

FLUXO DESCENDENTE (DOWNDRAFT)

O gaseificador de fluxo descendente é também conhecido como gaseificador *downdraft*, esse tipo de gaseificador têm alguns requisitos para o tipo de combustível, como forma, umidade, tamanho, cinzas, conteúdo, densidade aparente e um tolerável teor de alcatrão. Sendo assim, esse tipo de gaseificador é um tipo muito característico usado para combustíveis, porém seu desempenho depende de diversos fatores, podendo eles ser baseados nas propriedades do combustível usado no processo de fabricação, condições de operação, experiência do operador e nível de manutenção^{16,24}.

Um ponto negativo do gaseificador *downdraft* é a umidade, ela afeta de forma direta e negativa a eficiência da combustão. Isso ocorre pelo fato de nesse tipo de gaseificador a umidade é projetada para ser expelida nas zonas de secagem e carbonização do reator, isso resulta no consumo de grande parte da energia que estaria disponível para ser usada nas reações que ocorrem na maior parte do produtor de gás, gerando assim uma redução na eficiência de conversão do sistema. Estudos foram capazes de determinar que o gaseificador *downdraft* necessite combustível com menos de 30% de umidade para que seja

produzido combustível de grande eficiência^{16,24}.

Esse tipo de gaseificador, ao contrário do anterior, produz gases com baixo teor de alcatrão e material particulado. A baixa concentração de alcatrão ocorre devido ao gás passar por uma zona de alta temperatura que torna possível o craqueamento dos alcatrões formados durante o processo de gaseificação. A implantação do gaseificador *downdraft* é limitada, pois existem dificuldades na obtenção de uma distribuição homogênea de ar em reatores de grandes diâmetros. Outro problema comum nesse tipo de gaseificador é a dificuldade de manuseio, já que necessita de partículas menores de matéria prima, o tamanho recomendado das partículas corresponde a um oitavo da garganta do reator. Mesmo diante das características apresentadas desse tipo de gaseificador, pode se determinar que ele seja sim indicado para motores à combustão interna^{4,5,6,17}.

LEITO FLUIDIZADO

O leito fluidizado tem por objetivo introduzir um fluxo gasoso geralmente na direção vertical seguindo sentido ascendente, fazendo com que esse fluxo gasoso atravesse o leito, que por sua vez está repleto de material granular inerte. Desta forma o material recebe energia transferida pelo gás aplicado no fluxo, o que vem a auxiliar a decomposição térmica do material processado^{18,24}.

Esse tipo de gaseificador é muito usado na conversão termoquímica da turfa há muitos anos. Ele se resume em aplicar um gás como meio fluidizante, para arrastar a biomassa com o objetivo de aumentar o contato dela com o elemento oxidante para aumentar as taxas de reação. Existem dois tipos de reatores de leito fluidizados, sendo eles o reator de leito fluidizado borbulhante e o reator de leito fluidizado circulante, como demonstrado na figura 3 a seguir^{4,5,6,24}.

Um dos motivos da escolha pela utilização do gaseificador por leito fluidizado é o fato de ele proporcionar que haja uma grande movimentação entre o material granulado no interior da região fluidizada. Essa característica permite que ocorra uma homogeneização da temperatura no interior do gaseificador, o que por sua vez permite o surgimento dos

três processos importantes na qualidade do produto final, sendo eles a pirólise, combustão fragmentação ou redução simultânea do material em diversos pontos do leito, o que melhora de forma efetiva a qualidade dos produtos obtidos no processo. Esse tipo de tecnologia de gaseificação é muito utilizada devido sua vantagem, sendo elas o controle de temperatura, transferência de calor, contato do gás favorável, dentre outros^{18,19}.

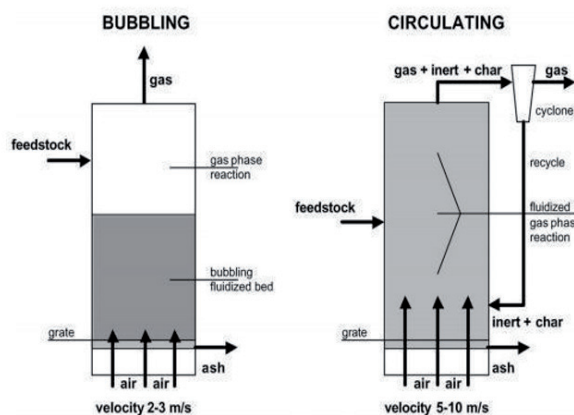


Figura 3: Tipos de gaseificadores de leito fluidizado. Fonte: Belgiorno et al. 2003²⁴

LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE

Esse tipo de gaseificador foi criado na década de 1920 por Fritz Winkler, muitas das vezes tratado como a mais antiga aplicação dentre os leitos fluidizados. Esse modelo esteve em uso por muitos anos na gaseificação de carvão com mais de 10.000 reatores BFB (*Bubbling Fluidized Bed*) em uso em todo o mundo. O reator de leito fluidizado borbulhante típico é composto por um forno e uma seção onde ocorre troca de calor por convecção, esse tipo de reator é também conhecido como leito fluidizado lento ou estacionário^{16,24}.

Um fato interessante sobre esse modelo de reator é o fato de por terem qualidades significativas eles quase substituíram os reatores de leito fixo em grande parte do mundo. Dentre suas características positivas destaca-se que

o reator de leito fluidizado borbulhante pode ser projetado e construído para que seja possível queimar qualquer tipo de combustível, até mesmo carvão com cinzas, não é preciso à implantação de plantas caras de preparação de combustível, como é exigida em casos de utilização de carvão como combustível^{16,24}.

Pontos negativos da utilização desse tipo de reator é o fato de mesmo podendo ser projetado e construído para utilização de qualquer tipo de combustível, o reator necessita de modificações o que acaba sendo um processo bem caro. Essa configuração também exige uma pegada bem maior comparada ao reator de leito fluidizado circulante, isso faz com que a queima do reator de leito fluidizado borbulhante seja inadequada, fora que ocorrem casos de erosões nos tubos do leito o que dificulta de certa forma a queima de carvão de alta qualidade^{16,24}.

LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE

O gaseificador de leito fluidizado circulante se tornou conhecido mundialmente principalmente no mercado de geração de energia elétrica, muito procurada por apresentar benefícios tais como, operação eficiente e mínimo efeito no meio ambiente. Ele foi desenvolvido na década de 1980, e atua com capacidade variando entre 1 MW a 340 MW se tornando um reator com tecnologia avançada para unidades de pressão atmosférica^{16,24}.

O reator em questão é conhecido internacionalmente por CFB (*Circulating Fluidized Bed*), ele ao contrário de outros modelos de reatores não necessita de supervisão nos queimadores a procura de chamas apagadas, sendo que nessa configuração não há chamas o que traz benefícios em termo financeiro por conta de não precisar contar com um sistema sofisticado de monitoramento. A combustão é detectada por termopares que constantemente medem a temperatura. O grande estoque de material sólido também auxilia de forma positiva no processo, o que permite ao operador aplicar medidas corretivas no reator se caso detectar algum problema, isso só é possível por que o grande estoque torna o processo mais lento^{16,24}.

ASPECTOS RELEVANTES QUE LEVAM AO REAPROVEITAMENTO DE BIOMASSA

A importância do reaproveitamento de certos tipos de biomassa é de grande proveito, pois pode minimizar os impactos ambientais, que alguns combustíveis fósseis, e resíduos urbanos trazem ao meio ambiente. Uma grande preocupação hoje no mundo é a quantidade de combustível que é consumida através de veículos e grandes termelétricas ao redor do mundo, que através da queima em motores resultam em grandes quantidades de gases como, gás carbono e dióxido de carbono gases responsáveis pelo aquecimento da temperatura na terra. Uma maneira de minimizar esses impactos, e a utilização da biomassa como forma de fonte de energia renovável, pela sua vasta distribuição é pela vasta abundância, mas ela se torna menos atraente em alguns aspectos, devido à dificuldade de centralizar usinas para a geração em grande escala, a dificuldade de encontrar novas tecnologias para geração de energia que diminuem impactos ambientais, levou a estudos em gaseificação de biomassa^{26,27}.

Outra dificuldade encontrada foi resolver uma questão do descarte dos Resíduos urbanos, que por sua vez eram descartados em céu aberto, onde ali esses resíduos entravam em decomposição gerando gases poluentes e o chorume líquido escuro que polui os lençóis freáticos, ao passar dos anos foram construídos os aterros sanitários que em vez de descartá-los em qualquer lugar, hoje com os grandes estudos realizados na área de gaseificação de biomassa, alguns países já implantaram reatores para reaproveitar os resíduos urbanos para geração de energia através da gaseificação da biomassa^{26,27}.

Uma grande questão ambiental envolvida no uso de energia fóssil está envolvida na extração da matéria prima e na conversão em combustíveis, como transportes, transformação, distribuição e consumo final, que podem impactar no meio ambiente de forma indiretamente e diretamente: Indiretamente com a degradação costeira dos mares por vazamentos de petróleo, e diretamente com a poluição do ar através da queima de combustíveis fósseis nas termelétricas. As energias geradas através da biomassa

e fotovoltaica, não e livres totalmente de agentes poluentes, elas possuem uma concentração menor em relação às outras utilizadas, a biodiversidade vai ser mais afetada pelos processos de geração hídrica e nuclear, contudo os acidentes mais graves identificados nas termelétricas, nucleares e grandes hidrelétricas^{26,27}.

Um grande aspecto econômico hoje em dia, é um incentivo da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que compra a energia gerada dos microgeradores de energia fotovoltaica, onde essa pequena parte é inserida na rede de distribuição, a gaseificação tem uma grande crescente econômica com a crise do petróleo em 1973, onde teve uma grande demanda por novas tecnologias e novas fontes de energias renováveis, quando a crise do petróleo terminou a gaseificação seu avanço freado pela baixa do barril do petróleo, e com isso um desinteresse em novos estudos por gaseificação, mas com o passar dos anos gradativamente foi retomado novos estudos devidos a grande poluição e novos tratados assinados por diversos países para conter o avanço do aquecimento global, para existir maior participação para geração de energias renováveis na matriz nacional, mais incentivos legais são necessário para o melhor aperfeiçoamento de novas tecnologias^{26,27}.

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA NO BRASIL

O Brasil por ser um país com grandes fontes de energias renováveis, e com uma potencialidade territorial e climática, destaca-se por ter diferentes tipos de climas e solos. Sendo assim o coloca em uma posição privilegiada como uma grande matriz energética. Contudo sobre esse contexto no Brasil ao conteúdo energético tendo como insumos de biomassa como, cavaco de madeira, bagaço de cana, casca de arroz, dentre outros. Todos esses utilizados para geração de energia^{25,27,28}.

Considerando os insumos, a madeira do eucalipto se destaca por ter tido um grande aumento das suas áreas plantadas, onde inicialmente o seu plantio era voltado para fins ornamentais, ao passar dos anos ele foi utilizado para diversas aplicações na indústria, em formas de cavacos,

aparos, briquete, pellets, hoje o Brasil é um dos países com maior volume de plantios de florestas. Estudos estimam um potencial energético de 10 GW de energia obtidos de resíduos da extração no mundo. A maioria desses resíduos é obtida de forma segura direto do processamento, ou do processamento da madeira ou da celulose^{25,27,28}.

O arroz é outro tipo de cultura, onde tem sua produtividade anual, e tem sua plantação concentrada no Sul e no centro oeste, por ter uma grande produção anual, a casca contribui com apreciável quantidade de energia, estando disponível o ano todo. Devido a sua baixa densidade da casca do arroz, onde um metro cúbico pesa somente 120 kg, uma ideia utilizada é a briquetadeiras, onde formará peças cilíndricas com maior densidade, assim para um melhor aproveitamento da sua queima. Segundo a ANEEL (2018), a geração de energia elétrica proveniente da casca do arroz como biomassa, foi um potencial instalado de 45,333 MW, totalizando 0,1% da produção energética brasileira. Estudos desenvolvidos apontam que cerca de 2 kg de casca de arroz é necessário para gerar 1 kWh de eletricidade no processo de gaseificação de leito fixo. Com o processo por leito fluidizado são necessários entre 1,7 kg e 1,9 kg de casca de arroz para cada kWh gerado. Outro ponto abordado na casca do arroz e o aproveitamento de suas cinzas que contêm elevado teor de sílica (mais que 90%), este será valorizado se suas partículas tiverem pureza e superfície específica, elas são aplicadas na fabricação de células fotovoltaicas, construção civil, eletrônica, cerâmicas, e indústria química. O reator indicado para o processo de gaseificação é o de leito fluidizado, devido a sua baixa densidade e baixo ponto de fusão das cinzas tornam o uso ineficiente em outros tipos de reatores^{25,27,28}.

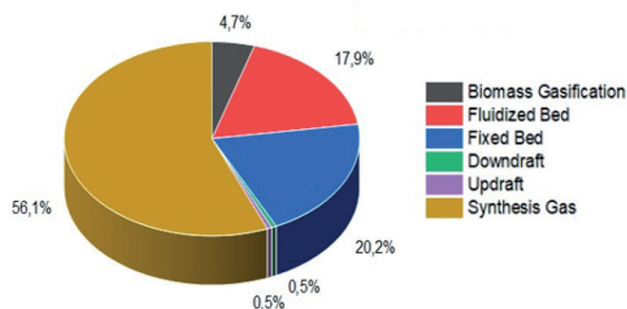
A cana e outro tipo de cultura bastante utilizados na gaseificação, por ter seu cultivo em todo território nacional, depois de extraído e filtrado o caldo da cana para, fabricação de açúcar e álcool, os resíduos obtidos são o bagaço e a torta, o bagaço ao sair tem aproximadamente 30 % da massa da cana e 50 % de umidade, para um melhor aproveitamento da biomassa da cana, nota-se que seu poder calorífico vai ser em função do teor de umidade contida, esse fator de suma importância, pois um material com elevado nível de

umidade terá um menor rendimento energético. O plano nacional de energia destacou que o potencial de geração de energia através do bagaço da cana em 2010 seria de 1.670 MW, se fosse investido em novas tecnologias e nova instalação esse potencial seria de 2.170 MW no mesmo ano. O mesmo plano nacional de energia prognosticou que esse potencial seria ainda maior se fosse em conjunto com novas tecnologias de geração sendo elas, o biogás, digestão anaeróbica, é incineração de gás natural, com tudo isso esse potencial em 2020 chegaria a mais de 12,4 GW. Outro ponto é que as maiorias das usinas já utilizam o bagaço da cana, não para fazer gaseificação, mas para geração de energia utilizando grandes caldeiras para queima^{25,27,28}.

Visando demonstrar e aprofundar o conhecimento na área de gaseificação de biomassa, esse trabalho tem por objetivo fazer a revisão de literatura dos reatores fixo concorrente e fluidizado bem como apresentar as vantagens e as desvantagens de suas utilizações em diferentes geradores de potência.

Metodologia

Este trabalho foi desenvolvido a fim de melhor conhecer o processo da gaseificação da biomassa verificando as vantagens e desvantagens da utilização dos reatores, fixo concorrente e fluidizado borbulhante. Para tanto, inicialmente, foram desenvolvidos estudos literários sobre o processo de gaseificação da biomassa, bem como as formas de como esses gases podem ser gerados: reator de leito fixo concorrente; reator de leito fluidizado borbulhante. Em segundo momento, a fim de realizar uma investigação científica por meio de revisão sistemática, foram realizadas pesquisas e buscas de: artigos, teses, livros, revistas, entre outras fontes utilizando as plataformas Web Of Science, Science Direct, Scielo, LILACS, Scopus, Pubmed, ACM. Nas primeiras buscas, foram utilizadas apenas as palavras “biomassa” e “biomassa por gaseificação” e ou “*biomass*” and “*biomass gasification*”, pois as mesmas elucidam o objetivo geral do trabalho. Os resultados das buscas estão apresentados no gráfico abaixo.



REPRESENTAÇÃO NUMÉRICA	
PALAVRAS CHAVES	RESULTADOS
Biomass Gasification	9.642
Fluidized Bed	36.968
Fixed Bed	41.703
Downdraft	1.110
Updraft	1.059
Synthesis Gás	115.665
TOTAL	206.147

Gráfico 1: Registro de Busca. **Fonte:** dos autores

Ao todo, foram encontrados 206.147 envolvendo as palavras chaves iniciais. A partir dos dados iniciais, deu-se início a utilização dos filtros com intuito de selecionar os artigos em função do tema. Para tanto, foram utilizados os seguintes filtros: “gaseificação da biomassa”, “desumidificação”, “pirólise”, “oxidação”, “redução”, em seguida destacou qual o objetivo traçado, sendo ele realizar uma revisão de literatura dos tipos de reatores com; “leito fluidizado borbulhante” e ou “*bubbling fluidized bed*”, “BFB”, “leito fixo concorrente” e ou “*concurrent fixed bed*”, “*downdraft*”.

A partir da utilização dos filtros, foram selecionados 56 trabalhos que apresentaram melhor compatibilidade em relação aos nossos objetivos de pesquisa, sendo eles: pesquisar as vantagens e desvantagens da gaseificação da biomassa utilizando o reator de leito fixo concorrente e fluidizado borbulhante. Fazendo parte dessas 56 bases úteis utilizadas no presente artigo tivemos; 34 artigos, 3 livros, 8 teses e 11 revistas. Para melhor compreensão

dos resultados foi confeccionado um quadro em que se descrevem as vantagens e desvantagens da utilização de cada um dos reatores: Reator fixo concorrente e reator fluidizado borbulhante, bem como se discute as melhores aplicações de cada reator para diferentes tipos de geradores de potência.

Resultados e Discussão

Com base nas pesquisas realizadas dos reatores fixo e fluidizado com o intuito apresentar as vantagens e as desvantagens de suas utilizações em diferentes geradores de potência, foram selecionados dois tipos de reatores que são mais indicados e utilizados na gaseificação de biomassa com ênfase na produção de gás de síntese eficaz que posteriormente pode ser usado em motores à combustão ou turbinas geradoras de energia. Dentre os diversos tipos de reatores, neste artigo foi feita uma comparação entre os modelos de reatores de leito fixo *downdraft* e o reator de leito fluidizado borbulhante, para que no final seja possível distinguir qual o melhor reator indicado para cada aplicação disponível, destacando as vantagens e desvantagens de cada um. A seguir a tabela 1 demonstra algumas condições de características dos reatores em questão.

Tabela 1: Características dos reatores de leito fixo e fluidizado. **Fonte:** Do autor.

REATOR DE LEITO FIXO DOWNDRAFT	
VANTAGENS	DESvantagens
Construção relativamente simples	Requer baixa umidade do combustível a ser utilizado
Baixo custo de construção e operação	Baixa eficiência de conversão de matéria orgânica em gás de síntese
Flexibilidade de insumos/ combustível neles inseridos	Contaminantes no gás de síntese
Pouca complexidade de operação	Baixo poder calorífico do gás produzido

Tabela 1: Características dos reatores de leito fixo e fluidizado.

Fonte: Do autor - *continuação*

Baixa necessidade de oxidantes	Tamanho das partículas de combustível deve ser bem especificado
Capacidade de operar em temperaturas baixas	Processo em grande escala tende a ter problemas de não uniformidade de temperatura
Aceitam alimentação de partículas de diferentes tamanhos	Restrição de granulometria do material a ser utilizado como combustível (não pode ser muito pequeno)
Gás produzido relativamente limpo	Alta temperatura do gás produzido (saída)
Pouco arraste de cinzas	
Alta eficiência de conversão	
REATOR DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE	
VANTAGENS (Pressão atmosférica)	DESvantagens (Pressão atmosférica)
Alta flexibilidade em relação à taxa de alimentação do combustível	A temperatura do leito está limitada pela temperatura de sinterização das cinzas
Alta capacidade volumétrica	Pode existir alta concentração de partículas no gás produzido com altos teores de carbono nas cinzas
Fácil controle da temperatura do leito	Possíveis problemas com alcatrão durante o resfriamento do gás até temperaturas relativamente baixas
Baixas emissões de nox e sox	Dificuldade na escalabilidade para plantas de grande porte
Operações com ampla variedade na composição do combustível (alto conteúdo de cinzas e umidade)	Pode haver aglomeração do leito

Tolera variações da qualidade do combustível	Demora na partida
Grande tolerância à granulometria de combustível	Sistema de alimentação
Excelente distribuição da temperatura do leito	
Possibilidade de processo catalítico no leito	
Moderados níveis de alcatrão no gás	
Pode operar a carga parcial	
Alta eficiência de conversão	
(Pressurizado)	(Pressurizado)
Aumento da produção de gás para o mesmo volume de reator	Sistema de alimentação pressurizado é mais complexo
Menor consumo interno e redução das sinterizações das cinzas	Aumento de conteúdo de metano no gás
	Custos de equipamentos mais altos

Segundo Andrade (2007, p.38), o produto final que se deseja obter de um reator é um gás, que seja o mais adequado possível, ou seja, que tenha uma melhor pureza e um bom poder calorífico. A tabela 2 mostra alguns valores com termos de qualidade do gás gerado para cada tipo de reator analisado usando como agente de oxidação apenas o ar. Observa-se que o reator de leito fixo concorrente (*downdraft*) obteve um melhor poder calorífico. Quando se refere à pureza do gás, deve-se observar o percentual de particulado e de alcatrão presente no gás após todo processo de gaseificação, pois esses percentuais que vão

definir o quão puro será o gás gerado. Contudo na tabela 3 demonstra os valores das quantidades de particulados e alcatrões encontrados em diferentes reatores, presente no gás de biomassa. As propriedades dos gases gerados nos reatores em termos de concentração podem variar a depender do seu agente de gaseificação e sua pressão na operação do reator.

Tabela 2: Comparação da composição do gás gerado para os reatores analisados. **Fonte:** Bridgwater, 1995³⁰.

Características do gás gerado						
Tipo	Composição do gás [vol. %, base seca].					PCS
	H2	CO	CO2	CH4	N2	MJ/ m3
Leito fluidizado	9	14	20	7	50	5,4
Leito fixo concorrente (Down-draft)	17	21	13	1	48	5,7

Tabela 3: Quantidade de alcatrão presente no gás gerado por meio dos reatores analisados. **Fonte:** Quak, 1999³¹

Tipo de gaseificador	Teor de alcatrão
<i>Downdraft</i>	15 – 500 mg/Nm ³
<i>Updraft</i>	30 – 150 g/Nm ³
Leito fluidizado	< 5 g/Nm ³

De acordo com Hasler (1999, p.02), o alcatrão é um dos produtos mais indesejáveis encontradas nos gases gerados por biomassa, sua composição e quantidade podem variar de acordo com o tipo de reator utilizado para o processo de gaseificação, o alcatrão é uma substância betuminosa, com forte odor, que se obtém de matérias orgânicas. O resfriamento é um método utilizado para limpeza do

gás, que tem por finalidade a remoção do alcatrão pela condensação. Outro método de remoção desse alcatrão é o craqueamento térmico, pois a quantidade de alcatrão encontrada pode variar de acordo com a temperatura utilizada no processo, que quanto maior a temperatura do leito menor será a concentração de alcatrão no gás gerado, bons níveis de alcatrão são gerados entre 1000 e 1300 °C.

A tabela 3 demonstra com clareza que no contexto de quantidade de alcatrão presente no gás gerado em cada um dos reatores analisados, o reator de leito fluidizado se destaca de forma positiva atingindo os menores valores de teor de alcatrão, o que é de grande importância na característica de um gás limpo. De acordo com os artigos estudados, para que seja possível que um motor a combustão interna funcione de maneira satisfatória o gás gerado por biomassa deve conter valores menores que 100 mg/Nm³ de teor de alcatrão.

Cada reator possui características particulares que contribui muito na hora de definir qual o melhor reator a ser usado para cada aplicação, uma característica de grande importância é a dimensão do combustível com qual o reator consegue operar de forma eficiente, se esse item não for observado corretamente há um risco muito grande de ocorrer problemas operacionais durante o processo de gaseificação. Conforme afirmado por Andrade (2007, p.40), geralmente os reatores de leito fixo conseguem operar com combustível de maior dimensão quando comparado com os reatores de leito fluidizado, isso ocorre pelo fato de que no reator de leito fixo há uma necessidade de que haja espaço para que seja possível o ar e os gases da gaseificação fluir com mais facilidade. Já os reatores de leito fluidizado conseguem operar apenas com combustível de menor dimensão, pois ao contrário dos reatores de leito fixo não tem uma necessidade de que haja espaços para o ar e os gases de gaseificação fluir, já que o reator de leito fluidizado já conta com uma injeção de fluido externo e acrescido durante todo o processo. A tabela 4 demonstra com clareza as dimensões de combustível recomendadas para diferentes tipos de reatores.

Ao observar a tabela 4, nota se que o reator de leito fixo consegue operar com combustíveis bem maiores quando comparado com o reator de leito fluidizado. Essa

característica deve ser levada em conta na hora da escolha do reator, pois a escolha do reator vai depender de qual tipo de biomassa será utilizada no processo de gaseificação. Sabendo disso, o reator de leito fixo é muito utilizado para queimar biomassas como lenha, bagaço de cana, resíduos urbanos, dentre outros. Já o reator de leito fluidizado por se tratar de um reator que opera com combustíveis de menor tamanho, é recomendado e muito utilizado na queima de casca de arroz, serragem, dentre outros tipos de biomassa.

Tabela 4: Dimensão do combustível para diferentes tipos de gaseificadores. **Fonte:** Handbook of Advanced Technologies for Energy Conversion of Biomass³².

Tipo de gaseificador	Dimensão do combustível (cm)
Leito fixo concorrente (“downdraft”)	1 -- 10
Leito fixo contracorrente (“updraft”)	0,5 -- 5
Leito fluidizado borbulhante	< 2
Leito fluidizado circulante	< 1

Conforme afirmado por Hasler (1999, p.3), todo gás gerado no processo de gaseificação de biomassa contém certa quantidade de contaminantes, para ser aplicado em algum sistema gerador, o mesmo deve ser o mais limpo possível, a fim de eliminar qualquer tipo de falha ao ser aplicado em motor de combustão interna ou turbina de gás. A tabela 5 demonstra as características exigidas para o funcionamento correto dos motores de combustão interna e turbina a gás. Nota-se que em termos de qualidade do gás, a turbina a gás exige uma pureza maior do gás para que seja possível seu correto funcionamento, já os motores de combustão interna são menos suscetíveis quanto à limpeza do gás.

A tabela 5 demonstra a qualidade do gás requerido para cada gerador de potência, neste caso foi selecionado duas aplicações mais utilizadas para os dois tipos de reatores analisados. Para a aplicação em motores de combustão interna é notório que não é preciso à composição de um gás muito limpo, o que nesse caso facilitaria a aplicação por não ser necessário investir recursos em equipamentos de purificação e limpeza dos gases. Já a aplicação do gás em turbinas é possível analisar que há a necessidade de se obter um gás com um nível de pureza maior, sabendo que se esse gás não for devidamente limpo pode ocasionar em erosões situados nas pás da turbina, resultado do choque causado pelos materiais particulados durante as altas rotações que as turbinas são submetidas.

Tabela 5: Qualidade do gás requerida para geradores de potência. **Fonte:** Hasler, 1999³³.

Equipamento de geração de potência	Particulados [mg/Nm ³]	Dimensão do particulado [µm]	Alcatrão [mg/Nm ³]	Metais pesados [mg/Nm ³]
Motor de combustão interna	< 50	< 10	< 100	
Turbina a gás	< 30	< 5		0,24

Ao longo dos estudos realizados sobre gaseificação de biomassa, observou-se um vasto campo de aplicação dos gases gerados, os reatores de leito fixo obtiveram melhores resultados quando se trata de baixo custo de construção, granulometria do combustível e valores de hidrogênio. Já o reator de leito fluidizado se destacou quando se trata de geração de gases de melhor qualidade de limpeza, considerando o baixo teor de alcatrão presente nos gases gerados por esse tipo de reator, outros pontos positivos na utilização desse reator é a sua capacidade de trabalhar com um volume de combustível (biomassa) bem maior do que o reator de leito fixo, fácil controle de temperatura

de operação fazendo com que não haja a necessidade de operador fazendo o controle manual, possibilidade de operar com biomassa com alto conteúdo de cinzas e umidade, o que não é possível em reator de leito fixo já que o mesmo requer baixa umidade do combustível.

É notório que o reator de leito fluidizado abrange mais vantagens da sua utilização do que o reator de leito fixo, contudo cada tipo de reator conta com uma melhor aplicação. Segundo Andrade (2007, p.45), o reator de leito fluidizado por se tratar de um gerador de gás mais limpo e com baixo teor de alcatrão é indicado para geradores de potência por meio de turbina a gás, pelo fato de decorrentes erosões nas pás da turbina ocorrida por contato de material particulado existentes no gás gerado em reatores de leito fixo. Já o reator de leito fixo por ser um gerador de gás com maior nível de impureza e alcatrão, é indicado para a utilização em motores de combustão interna, pois esse tipo de motor não requer um gás limpo para o seu correto funcionamento. Vale lembrar que o custo de fabricação de um reator de leito fluidizado é muito superior comparado com o reator de leito fixo, o que de certa forma contribui muitas das vezes em uma maior utilização dos reatores de leito fixo.

Conclusão

O reator de leito fluidizado borbulhante permite operar com variados tipos de biomassa contanto que seja de menor granulometria como casca de arroz e serragem, além de operar com grande diversidade de biomassa ele também permite utilizar biomassa com alto teor de cinzas e umidade. Os dados levantados pela revisão de literatura demonstraram que o reator conseguiu gerar um gás com poder calorífico de $5,4 \text{ MJ/Nm}^3$, valor coerente para esse tipo de reator de acordo com relatos de diferentes autores. Os percentuais de hidrogênio presente no gás gerado por esse tipo de reator obteve um valor um pouco inferior do esperado, entretanto os valores de monóxido de carbono e metano se mantiveram coerente dentro da normalidade. Sabendo disso, por se tratar de um gás com um nível de

particulado menor, esse reator se destaca na aplicação em turbinas a gás por não deteriorar as pás da turbina devido à entrada do gás a alta rotação.

O reator de leito fixo concorrente (“*downdraft*”) apresentou melhores valores de poder calorífico com $5,7 \text{ MJ/Nm}^3$ e percentual de hidrogênio com 17% em sua composição final, podendo operar com biomassa de granulometria relativamente grande esse reator se destaca entre os demais quando se trata da queima de materiais como lenhas, resíduos urbanos, dentre outros. O produto final gerado pelo gaseificador de leito fixo possui em sua composição níveis de materiais particulados elevados, o que não é recomendado para o uso em turbinas a gás como o reator de leito fluidizado. Sabendo disso, através das pesquisas realizadas foi possível definir que a melhor aplicação do gás produzido por esse tipo de reator são os motores a combustão interna por não haver a necessidade de um gás de níveis de particulado menores para seu correto funcionamento.

Os resultados foram satisfatórios já que permitiram destacar as vantagens e desvantagens da aplicação de cada reator analisado, e com isso cada reator vai se adequar a um tipo de aplicação a depender do tipo de biomassa, construção, teor de particulados, teor de umidade, teor de alcatrão, dentre outros fatores para que seja possível definir a aplicação ideal para cada caso ou necessidade do usuário. A viabilidade de cada projeto de reator está relacionada à qualidade do gás de biomassa gerado, quanto melhor for à qualidade do gás, melhor será o aproveitamento da potência do motor, sendo assim terá uma alta taxa de geração de energia, possibilitando maior receita.

Referências

1. Pena, Rodolfo F. Alves. “Fontes não renováveis de energia”; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/fontes-nao-renovaveis-energia.htm>. Acesso em 04 de outubro de 2020.
2. Udaeta, Miguel Edgar Morales; GRIMONI, Jose Aquiles Baesso; GALVÃO, Luiz Claudio Ribeiro. Energia Da Gaseificação De

- Biomassa Um Recurso Não Convencional Para O Desenvolvimento Limpo. Gaseificação De Biomassa, [s. l.], Acesso em 17 set. **2020**.
3. Gavronski, Jorge Dariano. Carvão mineral e as energias renováveis no Brasil. **2007**.
 4. Andrade, Rubenildo Vieira. Gaseificação de Biomassa: Uma Análise Teórica e Experimental. Gaseificação De Biomassa, [s. l.], 22 dez. **2017**. E-book.
 5. Gaseificação. Santa Catarina, S/A. Disponível em: <https://www.carvaomineral.com.br/>. Acesso em: 6 set. **2020**.
 6. Schlittler, Luiz André Felizardo Silva; Gomes, Edelvio De Barros; Antunes, Adelaide Maria De Souza; Júnior, Nei Pereira. Gaseificação De Biomassa. Energia Renovável, [S. L.], P. 1-10, 11 Dez. **2009**.
 7. Gómez, Edgardo Olivares et al. Projeto de pirólise rápida contínua de biomassa com ar em reator de leito fluidizado atmosférico. In: Proceedings of the 3. Encontro de Energia no Meio Rural. **2000**.
 8. Lora, Electo Eduardo Silva; ANDRADE, Rubenildo Vieira; ARADAS, Maria Eugenia Corria. Geração Elétrica Em Pequena Escala A Partir Da Gaseificação De Biomassa. Gaseificação De Biomassa, [s. l.], 5 jul. **2017**. E-book.
 9. Ribeiro, R. S; Lima, R. D. C; Pinto, A. S. Gaseificação de Biomassa na Geração de Eletricidade em Pequena Escala. Gaseificação De Biomassa, [s. l.], Acesso em 17 set. **2020**.
 10. De Abreu Machado, Melissa Gurgel. Benefícios da Implementação de Energia Eólica no Estado do Ceará-Brasil. **2020**.
 11. Vallêra, Antônio M.; BRITO, Miguel Centeno. Meio século de história fotovoltaica. Gazeta de Física, v. 1, n. 2, p. 17, **2006**.
 12. Leal, Manoel Regis Lima Verde. O potencial de aproveitamento da energia da biomassa. Inovação Uniemp, v. 1, n. 3, p. 40-41, **2005**.
 13. Hameed, Zeeshan et al. Gasification of municipal solid waste blends with biomass for energy production and resources recovery: Current status, hybrid technologies and innovative prospects. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 136, p. 110375, **2021**.
 14. Gao, Ningbo et al. Biomass CO₂ gasification with CaO looping for syngas production in a fixed-bed reactor. Renewable Energy, v. 167, p. 652-661, **2021**.
 15. Martillo Aseffé, José Alfonso et al. Estudios paramétricos de la gasificación de la tusa de maíz en gasificadores downdraft. Tecnología Química, v. 39, n. 2, p. 455-470, **2019**.
 16. Malatji, Pholoso; Mamphweli, Ntshengedzeni Sampson; MEINCKEN, Martina. The technical pre-feasibility to use briquettes made from wood and agricultural waste for gasification in a downdraft gasifier for electricity generation. Journal of Energy in Southern Africa, v. 22, n. 4, p. 2-7, **2011**.
 17. Martínez, Juan Daniel et al. Syngas production in downdraft biomass gasifiers and its application using internal combustion engines. Renewable Energy, v. 38, n. 1, p. 1-9, **2012**.
 18. Goulart, Eduardo A.; Mariotoni, Carlos A.; Sánchez Caio G. A utilização da gaseificação de pneus usados em leito fluidizado para a produção de energéticos. Polímeros, v. 9, n. 4, p. 123-128, **1999**.
 19. Loha, Chanchal; Chatterjee, Pradip K.; Chattopadhyay, Himadri. Performance of fluidized bed steam gasification of biomass— modeling and experiment. Energy Conversion and Management, v. 52, n. 3, p. 1583-1588, **2011**.
 20. Venturott, Rodolfo De Merlo; Fernandes, Wanderson Araujo. Modelo de lagrange aplicado à simulação da conversão termoquímica de partícula de biomassa em um gasificador downdraft.
 21. He, Zhen et al. The enhanced rich H₂ from co-gasification of torrefied biomass and low rank coal: The comparison of dry/wet torrefaction, synergetic effect and prediction. Fuel, v. 287, p. 119473, **2021**.
 22. Basu, Prabir. Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory. Academic press, **2010**.
 23. Zhang, Yaning et al. Exergy analysis of biomass utilization via steam gasification and partial oxidation. Thermochimica acta, v. 538, p. 21-28, **2012**.
 24. Belgiorno, V. et al. Energy from gasification of solid wastes. Waste management, v. 23, n. 1, p. 1-15, **2003**.
 25. Galvão, Luiz Gustavo Oliveira. Efeitos da acústica e da temperatura no processo de torrefação e nas propriedades energéticas da madeira de Eucalyptus grandis. **2018**.
 26. Goldemberg, José; Lucon, Oswaldo. Energia, meio ambiente e desenvolvimento. **2008**.
 27. Henriques, Rachel Martins. Potencial para geração de energia elétrica no brasil com resíduos de biomassa através da gaseificação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Tese (Doutorado), Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético-COPPE, Rio de Janeiro, **2009**.
 28. Olivier, Vitor; Kullkamp, Jean Carlos. Estudo do potencial energético da casca de arroz como biomassa para geração de energia elétrica na região amarel de santa catarina. Engenharia Elétrica-Tubarão, **2020**.
 29. Basu, Prabir. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory. Academic press, **2018**.
 30. Bridgwater, A. V. The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation. Fuel, v. 74, n. 5, p. 631-653, **1995**.
 31. Quaak, Peter; Knoef, Harrie; Stassen, Hubert. Energy from biomass:

a review of combustion and gasification technologies. The World Bank, 1999.

32. Sala, R. (Ed.). Handbook of advanced technologies for energy conversion of biomass. European Commission, 1996.
33. Hasler, P. H.; Nussbaumer, Th. Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification. Biomass and bioenergy, v. 16, n. 6, p. 385-395, 1999.
34. Andrade, R. Gaseificação de biomassa: uma análise teórica e experimental. 2007. Tese de Doutorado. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI. 2007. Pág. 205.

Geisllan J. Felix, Hiago V. Miranda*, Pedro H. Teixeira, Tiago G. Pereira & Márcio J. Dias

Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA. Avenida
Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás,
Brasil.

*E-mail: hiago.veridiano@hotmail.com