

## RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS DA CADEIA PRODUTIVA DE EUCALIPTO NO ESTADO DE MINAS GERAIS POR ROTA TERMOQUÍMICA

Elias Gabriel Magalhães Silva<sup>1</sup>  
Rodrigo Sequinel<sup>2</sup>  
Rômulo Simões Cezar Menezes<sup>1</sup>  
Emmanuel Damilano Dutra<sup>1</sup>  
Wallysson Klaus Pires Barros<sup>1</sup>  
Íthalo Barbosa Silva de Abreu<sup>1</sup>  
Michael Oliveira Resende<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pernambuco

<sup>2</sup>Universidade Federal do Paraná

<sup>3</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais

DOI: 10.47168/rbe.v30i3.949

### RESUMO

Diversos estudos buscam melhorar os processos de gaseificação. Neste sentido, processos de simulação e modelagem são extremamente necessários, pois permitem uma variação de parâmetros para respostas otimizadas, além de apresentar um custo relativamente baixo. O presente trabalho utilizou resultados de uma simulação para propor centrais de geração de energia elétrica movidas a gás de síntese. Destaca-se que o resultado utilizado derivou de uma simulação na qual a umidade da biomassa de eucalipto era de 6%, o agente de gaseificação era oxigênio e a razão de equivalência foi de 0,11; o gás de saída apresentou um PCI de 8,08 MJ\*kg<sup>-1</sup>. A aplicação desse gás em um motor adaptado para queima de gás acoplado a um gerador, com um rendimento combinado de 28%, possibilitou a geração de 3.488,65 GWh de energia elétrica com o resíduo da cadeia produtiva de Eucalipto no estado de Minas Gerais. A eletricidade seria gerada em usinas alocadas próximas aos centros de geração de biomassa. Ao todo foram alocadas 91 usinas com potência instalada entre 4,5 a 5 MW, e foi considerada a injeção de energia elétrica na rede de distribuição através da normativa 482 da ANEEL. Com os resultados obtidos, fica evidente que a utilização de resíduos de biomassa para geração de eletricidade pode ser uma solução para pequenos municípios em regiões remotas.

Palavras-chave: Geração descentralizada; Otimização; Simulação; Gaseificação

## ABSTRACT

Several studies seek to improve gasification processes. In this sense, simulation and modeling processes are extremely necessary, as they allow a variation of parameters for optimized responses, in addition to presenting a relatively low cost. The present work used simulation results to propose energy generation plants powered by synthesis gas. It is noteworthy that the result used was derived from a simulation where the humidity of the eucalyptus was 6%, the gasification agent was oxygen and the equivalence ratio was 0.11; the output gas presented a PCI of  $8.08 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ . The application of this gas in an engine adapted for burning gas coupled to a generator, with a combined efficiency of 28%, enabled the generation of 3,488.65 GWh of electrical energy with residue from the Eucalyptus production chain in the state of Minas Gerais. The electricity would be generated in plants located close to the biomass generation centers; in total 91 plants with installed power between 4.5 and 5 MW were allocated and injected into the distribution network considering ANEEL regulation 482. With the results obtained, it is clear that the use of biomass waste to generate electricity can be a solution for small municipalities in remote regions.

Keywords: Decentralized generation; Optimization; Simulation; Gasification.

## 1. INTRODUÇÃO

Os primeiros registros de processos de gaseificação são do final do século XVIII. No século XIX o combustível gerado por destilação a seco do carvão era utilizado em iluminação pública. O mundo vivia uma mudança e a gaseificação surgiu como uma possibilidade para suprir essa necessidade. O gás produzido pelo processo foi usado para iluminar algumas cidades do mundo, como Londres e Rio de Janeiro. Após a descoberta, e distribuição em larga escala de gás natural e petróleo, a gaseificação perdeu força, voltando ao cenário mundial durante a Segunda Guerra Mundial, com a crise de distribuição do petróleo. Ao longo da Segunda Guerra Mundial o processo foi amplamente aplicado a automóveis e embarcações (BRIDGWATER, 1995; CARDOSO, 2014).

Agaseificação se apresenta como possibilidade para conversão de biomassa seca, quando o material é convertido em gás combustível e depois, eventualmente, em eletricidade por meio de um grupo gerador – que é uma alternativa para áreas rurais remotas, com falta de eletricidade, mas com abundância de arbustos, palha, casca de arroz e amendoim, ou outras formas de biomassa. Em geral, a gaseificação pode ser utilizada para gerar energia mecânica, eletricidade, calor e através de processos de síntese química produzir combustíveis líqui-

dos. O Brasil tem potencial para utilização desta tecnologia, dada a extensa área plantada, com diversas espécies de biomassa (DE OLIVEIRA et al., 2013, 2018; DIMPL, 2011; FERREIRA et al., 2018).

A transformação da biomassa através da gaseificação é relatada de maneira ampla na literatura. Luz (2013), através de uma análise minuciosa, demonstrou a possibilidade de tratamento de resíduos através de estações de gaseificação. Shahabuddin (2020) mostrou a possibilidade de produção de combustíveis líquidos para o setor aéreo por meio da gaseificação. Pode-se dizer que atualmente a gaseificação com maior potencial escalável é aplicada no tratamento de resíduos industriais e urbanos; Há interesse no uso do gás gerado em ciclos combinados para geração de energia elétrica (IGCC) (DÍAZ GONZÁLEZ; PACHECO SANDOVAL, 2020; JANAIREH et al., 2020; LUZ, 2013; PEREIRA et al., 2012; SANSANIWAL et al., 2017; SHAHABUDDIN et al., 2020).

Os processos de gaseificação são complexos e os reatores não são facilmente construídos, por isso, simular esses processos torna-se essencial, pois permite prever o desempenho e ajustar os parâmetros para proporcionar maior eficiência. Além disso, pesquisadores e fabricantes de equipamentos têm extensivamente realizado pesquisas fundamentais destinadas a compreender modelos matemáticos e simulações. Assim, apenas a combinação de experimentos e modelagem do processo pode fornecer compreensão dos fenômenos físicos e químicos dentro do gaseificador (JANAIREH et al., 2020; SAFARIAN; UNNÞÓRSSON; RICHTER, 2019).

A gaseificação pode ocorrer com extensa variedade de combustíveis, sendo que no presente trabalho foi considerada a biomassa eucalipto. O eucalipto é uma biomassa extremamente abundante no Brasil; segundo o IBGE, no ano de 2019 foram extraídos mais de 104 milhões de m<sup>3</sup> para processamento. Como seu processamento é de baixo rendimento, dependendo do uso do eucalipto há uma quantidade considerável de resíduos que ainda possuem valor energético e econômico (IBGE, 2016). Na literatura há estudos que tratam da otimização, modelagem, geração de energia elétrica em regiões remotas e produção de carvão vegetal.

Como o crescimento da demanda de energia elétrica há atenções voltadas à geração de forma mais sustentável, ou seja, menos impacto ao meio ambiente e diversificação da matriz elétrica (ABDOLI; PAMULAPATI; KARA, 2020). O gás resultante do processo de gaseificação pode auxiliar nesse processo de diversificação, sendo aplicado em motores de combustão interna adaptados, ou ainda, desde que devidamente tratado, ser aplicado em turbinas a gás e ciclos combinados (BRYNDA et al., 2020; MARTÍNEZ et al., 2011; NIU et al., 2021; ZAINAL et al., 2002). A possibilidade de uso de um combustível gasoso coloca a gaseificação como uma rota interessante para a conversão de

biomassa.

O presente trabalho objetivou analisar, a partir do resultado de simulações, e de maneira otimizada, pequenas centrais de geração de energia elétrica a serem instaladas no estado de Minas Gerais, usando resíduos da cadeia produtiva da biomassa de eucalipto.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Classifica-se como biomassa vegetal todo e qualquer material de origem orgânica que é resultante, direta ou indiretamente, de processos fotossintéticos. Pode-se dizer que a biomassa vegetal é uma forma indireta de energia solar, ou seja, energia solar é convertida em energia química, através da fotossíntese (CORTEZ et al, 2008). A biomassa para fins energéticos teve grande destaque entre o final do século XIX e o início do século XX. Desde então, com o uso do carvão, do petróleo e do gás natural, a biomassa ficou limitada a usos domiciliares e em regiões agrícolas. Porém nota-se uma mudança no mercado energético. As nações vêm concentrando esforços, recursos humanos e financeiros, em pesquisas e no desenvolvimento de fontes alternativas de energia, entre elas a biomassa. Destaca-se sua capacidade de redução na emissão de gases do efeito estufa (balanço favorável de carbono), possibilidade de diversificação da matriz energética e contribuição para a independência do petróleo (HOFFERT et al., 2008; JUNGINGER et al., 2008).

A biomassa *in natura* possui baixa densidade energética e mássica, apresenta dificuldades de transporte e manipulação, além de armazenamento. Por esses e outros aspectos, afirma-se que a biomassa em seu estado natural pode não ser um vetor energético de grande eficiência, apesar de ser amplamente utilizada na geração de calor e vapor. Processos que convertam a biomassa em um vetor energético com melhores características são necessários para promover melhor aproveitamento da biomassa (BRIDGWATER, 1995). Das rotas utilizadas para conversão de biomassa, a gaseificação é das mais antigas, sendo utilizada para diferentes fins a mais de um século (SÁNCHEZ, 2010).

O Brasil, com suas características agrícolas, produz culturas energéticas (por exemplo, cana-de-açúcar, eucalipto), e culturas alimentares (por exemplo, milho, soja, arroz). O manejo e processamento de ambas as culturas produz alto volume de resíduos, como casca, palhas e bagaço. Esses resíduos podem ser transformados em vetores energéticos através de processos como a gaseificação. Pensando no reaproveitamento desses resíduos, DE OLIVEIRA et al. (2018) propôs o processo de gaseificação para os resíduos de madeira e das lavouras de café. O reator utilizado foi do tipo de fluxo descendente, o mesmo considerado neste estudo, tendo o ar como agente de gaseificação.

O gás resultante do processo apresentou um PCI de  $7,76 \pm 1,27$  MJ/Nm<sup>3</sup>, utilizando como combustível a casca de café, sendo sua concentração rica em metano, dióxido de carbono e monóxido de carbono. Quando se utilizou madeira de eucalipto como combustível, chegou-se ao PCI de  $6,81 \pm 0,34$  MJ/Nm<sup>3</sup>, com predomínio de monóxido de carbono (DE OLIVEIRA et al., 2018).

A biomassa pode ser empregada em diferentes rotas de transformação, como a combustão direta e a gaseificação. A gaseificação é um processo de conversão termoquímica a partir de um combustível sólido e que resulta em um gás com características de um combustível. No processo de gaseificação são fornecidas quantidades restritas de ar (oxigênio), o que resulta na oxidação parcial do material carbonoso sólido. A conversão termoquímica acontece a temperaturas acima da do processo de pirólise e abaixo da do processo de combustão. Durante o processo é necessário a inserção de um agente de gaseificação, que pode ser ar atmosférico, oxigênio puro ou vapor d'água. A escolha do agente de gaseificação está diretamente relacionada com o uso desejado do gás gerado, podendo resultar em um gás com baixo poder calorífico (5 MJ/Nm<sup>3</sup>) ou com alto poder calorífico (15 MJ/Nm<sup>3</sup>) (CORTEZ et al, 2008; DE SOUZA-SANTOS, 2010; SÁNCHEZ, 2010).

O gás produzido a partir da gaseificação da biomassa pode ser usado de algumas formas, dentre elas a queima em motores a combustão interna para a geração de eletricidade em pequena potência e localidades isoladas (MURARO, 2006), ou em turbina a gás (BENINCA, 2016). Também pode-se aplicar o gás como combustível, como por exemplo no aquecimento de aviários (ZANATTA, 2011). Além disso o gás pode ser aplicado em processos de síntese química catalítica (Fischer-Tropsch) para a produção de combustíveis líquidos (SÁNCHEZ, 2010).

O processo apresenta alguns desafios tecnológicos que precisam ser resolvidos, tais como: a dificuldade de controle; em alguns casos a baixa eficiência global; dificuldades de limpeza do gás, e a necessidade da adição de vapor de água ou oxigênio puro para obtenção de gás com alto poder calorífico. O uso em motores de combustão interna pode reduzir a vida útil do motor devido a presença de componentes e particulados, o que exige um pré-tratamento do gás (CORTEZ et al, 2008; SÁNCHEZ, 2010).

Os reatores que promovem a reação, chamados de gaseificadores, possuem características particulares, e podem ser classificados de acordo com alguns fatores, como: poder calorífico do gás gerado (baixo, médio e alto poder calorífico); tipo de agente gaseificador (ar atmosférico, vapor de água, oxigênio); movimento da biomassa e do agente de gaseificação (concorrente, contracorrente, fluxo cruzado, leito fluidizado, leito arrastado); pressão de trabalho (atmosférico, pressurizados até 6 MPa) e tipos e granulometrias de biomassa (resíduos

agrícolas, resíduos industriais, resíduos sólidos urbanos, biomassa in natura, peletizada e pulverizada) (CORTEZ et al, 2008).

No caso da geração de eletricidade a partir de biomassa gaseificada, para maior escala foram concebidos ciclos combinados, mas não há qualquer instalação em operação comercial. A gaseificação também permitiria o processamento de resíduos sólidos urbanos (ENGELBRECHT et al., 2011; LUZ, 2013; CERIBELI; SOUZA-SANTOS, 2013).

Ao longo dos anos, estudos foram e vem sendo feitos para o desenvolvimento de gaseificadores de leito fixo e na utilização do gás na geração de energia elétrica. O programa francês de biomassa, energia e meio ambiente previa a instalação de unidades com até 80 kW, com motores a combustão. Segundo Becker (1988), os reatores produziam gás com PCI entre 4,39 e 4,65 MJ/Nm<sup>3</sup>, e com baixo teor de alcatrão, entre 0,06 e 0,05 g/Nm<sup>3</sup> (gás seco).

Alguns dos processos necessários para purificação do gás exigem um elevado volume de água, fator este que se coloca como um dos principais entraves da sustentabilidade de centrais a base de gaseificação. Este aspecto precisa ser levado em consideração em estudos mais detalhados antes da construção de centrais de gaseificação (INDRAWAN et al., 2020; KHOSHGOFTAR MANESH; REZAZADEH; KABIRI, 2020; YANG et al., 2018).

### 3. MATERIAS E MÉTODOS

Este trabalho utilizou os resultados do trabalho de SILVA (2021). O estudo realizou a simulação de duas diferentes biomassas em diferentes situações de reação e obteve o melhor resultado para a biomassa de eucalipto.

A Equação 1 foi utilizada na estimativa do potencial de geração de eletricidade. O procedimento foi proposto por OLIVEIRA et al., (2021) e adaptado para este estudo. O volume de gás considerado na equação é o volume total de gás que pode ser gerado pelo processo de gaseificação (JAYAH et al., 2003; YUCEL; HASTAOGLU, 2016; ZAINAL et al., 2002).

$$P_{GE} = \frac{Q_{syn} * PCI * \eta_{conv}}{860} [kWh \text{ ano}^{-1}] \quad (1)$$

Onde  $Q_{syn}$  é a quantidade de gás gerado pelo processo de gaseificação ( $Nm^3 \text{ ano}^{-1}$ ); PCI é o poder calorífico inferior do gás de síntese,  $8.079 \text{ kJ kg}^{-1}$ ;  $\eta_{conv}$  é a eficiência de conversão de 0,28, que é o resultado da combinação entre a eficiência do motor de combustão interna adaptado para queima de gás (30 a 40%) e do gerador elétrico (80%)

(FREITAS et al., 2019) (REIS; REIS, 2017).

Para avaliar a viabilidade técnica dos potenciais energéticos estimados, foi aplicado neste estudo um algoritmo de otimização desenvolvido por OLIVEIRA et al., (2021), que realiza a alocação das unidades de geração de energia elétrica. A alocação foi feita com o objetivo de minimizar a distância entre os produtores de eucalipto e as usinas, encontrando assim um ponto ótimo para a sua instalação. O objetivo está sujeito a restrições quanto à conexão na rede de distribuição impostas pela resolução normativa brasileira 482 (ANEEL, 2012) e à distância máxima.

O modelo toma como base todos os municípios que possuem potencial de geração de eletricidade e tem início escolhendo o município de maior potencial dentre todos os municípios. Após a escolha, avalia é avaliada a distância desse município a outros municípios que estão ao seu redor, e esse processo se dá com base em coordenadas geográficas de latitude e longitude de cada município. Os municípios mais próximos são escolhidos até que a potência máxima seja atingida (4,5 a 5 MW), quando isso acontece aloca-se uma unidade de geração. A usina é alocada em um ponto que consiste em uma média ponderada da distância entre os municípios que compõe esse aglomerado, e isso ocorre para diminuir a distância do transporte de biomassa para as usinas geradoras de eletricidade. Esse processo se repete até para todos os municípios. O georreferenciamento e o uso de dados geográficos foram feitos através do *software* livre QGIS.

Adotou-se que sistemas unidades funcionariam dez horas diárias e 300 dias ao ano devido a paradas para manutenção e reparo nos equipamentos. Em seguida é necessário converter o valor estimado de energia elétrica em potência instalada. A Equação 2 apresenta o procedimento para a estimativa da potência da unidade geradora, e é baseado em OLIVEIRA et al., (2021).

$$P_{ug} = \frac{P_{GE}}{t_{DP} * t_{OP} * fp} \quad (2)$$

Onde  $P_{ug}$  é a potência da unidade geradora;  $t_{OP}$  é o tempo de operação da unidade, de 10 horas por dia;  $fp$  é o fator de potência do gerador, de 0,80;  $P_{GE}$  o potencial de geração de eletricidade, calculado através da Equação 1;  $t_{DP}$  são os dias que o sistema opera em um ano.

#### 4. RESULTDOS E DISCUSSÃO

A extração da madeira de eucalipto se divide em três possíveis aplicações: utilização como lenha, na indústria de papel e celulose e para processamento (serrarias) (HENRIQUES et al., 2009). O estudo

levou em consideração apenas o resíduo gerado nessas três formas de extração. No caso da biomassa extraída para uso como lenha e para a indústria de papel e celulose considerou-se que o resíduo gerado é apenas o resíduo deixado na floresta no ato da colheita, em torno de 20% da madeira (galhos e árvores finas, folhas, entre outros), e para a madeira de processamento foi considerado uma geração de 50% de resíduos (cavaco, serragem, aparas, casca). Nos dois casos a base é o volume de madeira extraída.

O estado de Minas Gerais se destacou como o maior produtor de eucalipto no Brasil no ano de 2019. O estado possui 853 municípios, sendo que do total 593 apresentaram potencial no estudo realizado. Levou-se em consideração a produção de madeira em todo o estado de Minas Gerais com o uso da base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, (IBGE, 2019). Municípios que não tiveram produção foram excluídos da análise.

O estado de Minas Gerais teve produção anual de mais de 5 milhões de m<sup>3</sup> de resíduos de eucalipto no ano de 2019. Aplicando a metodologia proposta pelo trabalho é possível encontrar um potencial energético de 3.488,65 GWh ano<sup>-1</sup>. Ao todo foram alocadas 91 unidades de geração elétrica no estado. A Figura 1 apresenta a distribuição das unidades geradoras; os pontos de mesma coloração apresentam a combinação de municípios para se atingir a potência estipulada entre 4,5 e 5 MW.

Segundo dados da ANEEL (2019) os consumidores cativos do estado de Minas Gerais consumiram em 2019 27.362 GWh de energia elétrica, logo, a geração de energia com resíduos da cadeia produtiva de eucalipto seria capaz de atender pouco mais de 12% desse consumo. É possível ver uma concentração maior das unidades geradoras nas regiões Sul, Sudeste, Oeste, Zona da Mata e Campo das Vertentes, regiões que fazem fronteira com os estados de São Paulo e Rio de Janeiro. As regiões possuem uma maior concentração industrial, e o eucalipto é utilizado nos processos produtivos.

Um fato relevante é que a grande maioria dos municípios do estado de Minas Gerais são pequenos e se concentram em sua extensa zona rural. Em geral, os indicadores de descontinuidade e falha de fornecimento de energia elétrica das concessionárias de energia elétrica indicam mais eventos em zonas rurais do que em zonas urbanas; logo, a energia elétrica gerada pelos sistemas propostos poderia proporcionar um aumento da segurança energética para essa parcela de municípios, que em sua maioria também possuem a maior produção de biomassa.

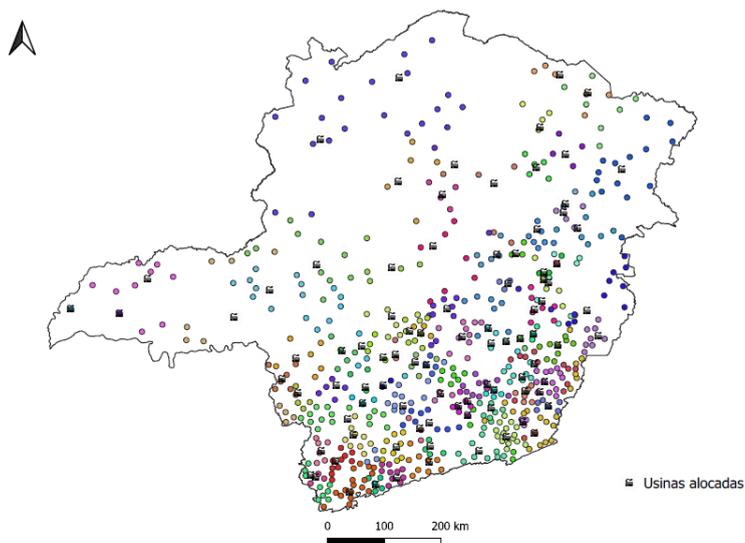


Figura 1 - Alocação proposta de unidades de geração de energia elétrica a partir da gaseificação de resíduos de eucalipto

## 5. CONCLUSÃO

O estudo apresenta o potencial de se aproveitar biomassa residual. O uso destes resíduos para geração de energia pode representar pouco mais de 10% de toda energia consumida no estado de Minas Gerais anualmente. Porém, processos de gaseificação são complexos de serem controlados, e os reatores (gaseificadores) possuem engenharia de complexa construção e operação. Os dados aqui levantados necessitam de estudos mais aprofundados com relação a aspectos técnicos e econômicos de implantação, operação e manutenção de usinas de geração de energia elétrica movidas a gaseificação. A pouquíssimos exemplos de gaseificadores operando em escalas maiores. A disponibilidade da biomassa e a logística necessária para transportá-la a uma central de processamento podem representar custos excessivos que inviabilizem a aplicação desta tecnologia em processos de larga escala. Além da rota de geração de energia, outras rotas podem ser estudadas para utilização do gás de síntese gerado, como processos de síntese química para produção de biocombustíveis e geração de calor.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento do Ensino Superior - CAPES [projeto nº 88887.628663/2021-00].

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDOLI, S.; PAMULAPATI, M.; KARA, S. An investigation into the role of PV industry in meeting the growing energy demand towards absolute sustainability. v. 90, p. 383–387, 2020.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Anuário Estatístico de Energia Elétrica, de Dezembro, 2019, 2019.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 482, de 17 de Abril, 2012, 2012.

BECKER, J. J. Fixed Bed of Gasification Lignocellulosic: the CEMA-GREF Process, in Research in Thermochemical Biomass Conversion. Edited by A.V. Bridgwater and J.L. Kuester. London: Elsevier, pp. 1016–1025, 1998.

BENINCA, W. DE A. Estudo da Influência do Nível de Pressão em Unidade de Geração Termelétrica Baseada em Gaseificação de Biomassa. 2016.

BRIDGWATER, A. V. The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation. Fuel, v. 74, n. 5, p. 631–653, 1995.

BRYNDA, J. et al. Wood chips gasification in a fixed-bed multi-stage gasifier for decentralized high-efficiency CHP and biochar production : Long-term commercial operation. Fuel, v. 281, n. July, p. 118637, 2020.

CARDOSO, M. T. Da iluminação das cidades no século XIX às biorrefinarias modernas: história técnica e econômica da gaseificação. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2014.

CERIBELI, K. B.; SOUZA-SANTOS, M. L. DE. Effect of dry-solid content level in feeding slurry of municipal solid waste consumed by FSIG / GT power generation process ; a theoretical study. Fuel, v. 254, n. April, p. 115727, 2019.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. Biomassa para energia. 1. ed. Campinas: Editora UNICAMP, 2008.

DE OLIVEIRA, J. L. et al. 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.

DE OLIVEIRA, J. L. et al. Gasification of waste from coffee and eucalyptus production as an alternative source of bioenergy in Brazil. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 27, n. May 2017, p. 159–166, 2018.

DE SOUZA-SANTOS, M. L. *Solid Fuels Combustion and Gasification*. [s.l.] CRC Press, 2010.

DÍAZ GONZÁLEZ, C. A.; PACHECO SANDOVAL, L. Sustainability aspects of biomass gasification systems for small power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 134, n. July, 2020.

DIMPL, E. *Small-scale Electricity Generation from Biomass Part I – Biomass Gasification*. Biomass Gasification, 2011

ENGELBRECHT, A. D. et al. Fluidized-bed gasification of high-ash South African coals: An experimental and modelling study. Johannesburg, South Africa: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.saimm.co.za/Conferences/IFSA2011/145-Engelbrecht.pdf>>.

FERREIRA, L. R. A. et al. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 94, n. April 2017, p. 440–455, out. 2018.

FREITAS, F. F. et al. The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019.

HENRIQUES, R. M. et al. Potencial para geração de energia elétrica no Brasil com resíduos de biomassa através da gaseificação, 2009.

HOFFERT, M. I. et al. *Advanced Technology Paths to Global Climate Stability : Energy For a Greenhouse Planet*. v. 981, n. 2002, 2008.

IBGE. *Produção da extração vegetal e da silvicultura 2015*. Produção da extração vegetal e da silvicultura, v. 30, p. 48, 2016.

IBGE. *Produção da extração vegetal e da silvicultura 2019*. Produção da extração vegetal e da silvicultura, v. 30, p. 48, 2019.

INDRAWAN, N. et al. Distributed power generation via gasification of biomass and municipal solid waste: A review. *Journal of the Energy Institute*, 2020.

JANAJREH, I. et al. A review of recent developments and future prospects in gasification systems and their modeling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n. February, p. 110505, 2020.

JAYAH, T. H. et al. Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying. *Biomass and Bioenergy*, v. 25, n. 4, p. 459–469, out. 2003.

JUNGINGER, M. et al. Developments in international bioenergy trade. *Biomass and Bioenergy*, v. 32, n. 8, p. 717–729, ago. 2008.

KHOSHGOFTAR MANESH, M. H.; REZAZADEH, A.; KABIRI, S. A feasibility study on the potential, economic, and environmental advantages of biogas production from poultry manure in Iran. *Renewable Energy*, 2020.

LUZ, F. C. Avaliação Técnico-Econômica de Plantas de Gaseificação do Lixo Urbano para Geração Distribuída de Eletricidade. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2013. PEREIRA, E. G. et al. Sustainable energy: A review of gasification technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 7, p. 4753–4762, 2012.

MARTÍNEZ, J. D.; LORA, E. E. S. Evaluación teórico experimental de un sistema avanzado gasificador de biomasa/motor reciprocante para la geración de eletricidad. *Tecnología Química*, v. XXXI, p. 53–63, 2011.

MURARO, W. Avaliação do funcionamento de motor ice com gás de baixo poder calorífico proveniente da gaseificação de casca de arroz. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2006.

NIU, M. et al. Simulation of a new biomass integrated gasification combined cycle (BIGCC) power generation system using Aspen Plus: Performance analysis and energetic assessment. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 46, n. 43, p. 22356–22367, 2021. OLIVEIRA, A. C. L. DE et al. Evaluation and optimization of electricity generation through manure obtained from animal production chains in two Brazilian meso-regions. *Journal of Cleaner Production*, v. 316, n. June, p. 128270, set. 2021

REIS, R. J. DOS; REIS, L. S. DOS. Atlas of Biomass of Minas Gerais. Belo Horizonte: Rona Gráfica e Editora, 2017.

SAFARIAN, S.; UNNÞÓRSSON, R.; RICHTER, C. A review of biomass gasification modelling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 110, n. May, p. 378–391, 2019.

SÁNCHEZ, C. G. Tecnologia da gaseificação de biomassa. Campinas: 2010, 2010.

SANSANIWAL, S. K. et al. Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 72, n. December 2016, p. 363–384, 2017.

SHAHABUDDIN, M. et al. A review on the production of renewable aviation fuels from the gasification of biomass and residual wastes. *Bio-resource Technology*, v. 312, n. March, p. 123596, 2020.

SILVA, E. Simulação da gaseificação de biomassa lignocelulósica : estudo dos efeitos da umidade, razão de equivalência e injeção de oxigênio. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Universidade Federal do Paraná, p. 102. 2021.

YUCEL, O.; HASTAOGLU, M. A. Kinetic modeling and simulation of throated downdraft gasifier. *Fuel Processing Technology*, v. 144, p. 145–154, 2016.

ZAINAL, Z. A. et al. Experimental investigation of a downdraft biomass gasifier. *Biomass and Bioenergy*, v. 23, n. 4, p. 283–289, 2002.

ZANATTA, F. L. Desenvolvimento e avaliação de um gaseificador de biomassa e estudo do potencial de produção de biogás com resíduos agrícolas e da avicultura. Programa de Pós- Graduação em Engenharia Agrícola, p. 98, 2011.