

Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 7 - Energia Acessível e Limpa

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO BIOMASSA: REVISÃO DE TÉCNICAS DE MODELAGEM MATEMÁTICA¹

POWER GENERATION WITH BIOMASS: A REVIEW OF MATHEMATICAL MODELING TECHNIQUES

**Luana Obregon², Fabricia Carneiro Roos Frantz³, João Manoel Lenz Vianna da Silva⁴,
Maurício de Campos⁵**

¹ Trabalho desenvolvido no Mestrado em Modelagem Matemática da UNIJUÍ

² Bolsista CNPq. Mestranda em Modelagem Matemática. Departamento de Ciências Exatas e Engenharias - UNIJUÍ.

³ PhD em Engenharia de Software. Departamento de Ciências Exatas e Engenharias - UNIJUÍ.

⁴ Doutor em Engenharia Elétrica. Departamento de Ciências Exatas e Engenharias - UNIJUÍ.

⁵ Doutor em Engenharia Elétrica. Departamento de Ciências Exatas e Engenharias - UNIJUÍ.

RESUMO

O suprimento de energia elétrica através por fontes renováveis, como painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas e biodigestores, está em ascensão em micro e minigeração distribuída. Os biodigestores oferecem uma alternativa viável de geração de energia principalmente em propriedades rurais, gerando eletricidade a partir da queima de biogases obtidos pela digestão anaeróbica da matéria orgânica. A modelagem matemática de biodigestores é comumente utilizada para estimar a quantidade e qualidade do biogás e da energia de saída dos sistemas biodigestores, de acordo com a matéria orgânica de entrada. Este artigo revisa três trabalhos que fazem a modelagem matemática da geração de energia elétrica a partir da combustão do biogás, e compara estes modelos a fim de entender as seguintes questões: Como prevemos a quantidade de energia elétrica gerada a partir do biogás? Quais são as variáveis que influenciam essa geração de energia? Qual modelo matemático avalia uma quantidade maior ou menor de variáveis?

ABSTRACT

Electricity supply through micro and mini-generation is on the rise. Photovoltaic panels, wind turbines, and biomass digesters are examples of distributed generation by renewable sources. Biomass digesters offer a viable alternative for power generation mainly in rural properties, and provide electricity by the combustion of the biogas, which is obtained by anaerobic digestion of organic matter. The mathematical modeling of biomass power generation systems is commonly used to predict the quantity and quality of the output biogas according to the input organic matter. This paper reviews three studies that model the electrical power generation from the combustion of biogas, and compares these models in order to understand the following issues: How to accurately predict the amount of electrical power generated from biogas? Which are the variables that influence this type of power generation? How many variables and what complexity are needed by each method?

Palavras-chave: Modelagem Matemática; Biodigestor; Sistema gerador de energia por biogás; Geração por Biomassa; Energias Renováveis.

Keywords: Biomass generation; Biomass digester; Biogas; Mathematical Modeling; Renewable Energy.

Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 7 - Energia Acessível e Limp

INTRODUÇÃO

No Brasil a Geração Distribuída (GD) é regulamentada pela Resolução Normativa nº 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que define como microgeração distribuída as centrais geradoras com potência instalada menor ou igual a 75kW, e minigeração distribuída as centrais geradoras com potência instalada maior que 75kW e menor ou igual a 5MW que utilizem cogeração qualificada ou fontes renováveis de energia elétrica [2]. A GD permite a redução de perdas energéticas na rede de distribuição, pois os micro e minigeradores se encontram mais próximos dos consumidores. Além disso, ela é capaz de melhorar as características de tensão da rede, a qualidade de energia e eficiência energética. A GD também oferece benefícios econômicos como a redução de custos operacionais de transmissão e distribuição de energia, redução do custo ambiental e, por consequência, redução da tarifa de energia [5]. No cenário brasileiro, o suprimento de energia elétrica através de micro e minigeração está em ascensão [10]. Sistemas de painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas e biodigestores são exemplos de geração distribuída por fontes renováveis que estão ocupando cada vez mais espaço na matriz energética nacional [6].

Qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica é classificada como biomassa, que pode ter origem florestal, agrícola ou de rejeitos urbanos e industriais. Derivado da gaseificação da biomassa, o biogás é produzido pela decomposição anaeróbica de matéria orgânica em biodigestores. Para gerar eletricidade, o biogás é utilizado como combustível em motores a gás para gerar força motriz capaz de acionar geradores elétricos. A ANEEL classifica os principais tipos de biogás capazes de produzir energia elétrica em quatro grupos: resíduos florestais, lixo orgânico urbano, dejetos de animais e rejeitos agroindustriais. Na região Sul do Brasil, os biodigestores que obtêm biogás por dejetos de animais são os mais comuns. [1,7]

A modelagem matemática de biodigestores é utilizada para prever a quantidade e características do biogás produzido, bem como a relação entre essas características com a quantidade de energia mecânica, trabalho mecânico e energia elétrica gerada. A quantidade e qualidade do biogás produzido em biodigestores varia de acordo com diferentes fatores como o tipo de matéria orgânica utilizada, o pré-tratamento tecnológico, a temperatura, agitação e o tempo que os resíduos permanecem no biodigestor.[7] Há uma grande quantidade de trabalhos que descrevem modelos matemáticos capazes de fazer a previsão da quantidade e das características do biogás de saída de acordo com a matéria orgânica decomposta [3][9][11][8]. A referência [8] faz a análise, do ponto de vista químico e biológico, de vinte e dois modelos matemáticos de digestão anaeróbica de substâncias orgânicas disponíveis para a produção de biogás [8] e serve como base no processo de escolha de modelo matemático adequado para a predição de quantidade e característica de biogás gerado em um biodigestor anaeróbico.

A partir do biogás gerado, há a necessidade de se estudar o sistema de geração de energia que o utiliza como combustível. Neste trabalho, serão revisadas e comparadas três referências, [12], [11] e [4], que modelam matematicamente esse sistema, a fim de entender as seguintes questões: Como prevemos a quantidade de energia elétrica gerada a partir do biogás? Quais são as variáveis que influenciam essa geração de energia? Qual modelo matemático avalia uma quantidade maior ou menor de variáveis?

Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 7 - Energia Acessível e Limpa

MODELAGEM MATEMÁTICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA UTILIZANDO BIOGÁS

Nas três referências aqui revisadas, [12], [13] e [4], há uma configuração, por meio de esquemáticos, do Sistema de Geração de Energia por Biogás (SGB), antes de se iniciar a modelagem matemática de suas sub-partes. Isso se faz necessário pela necessidade de entender quantas variáveis o sistema possui, como ele funciona, quais são suas características e então se iniciar a modelagem da geração de energia. Nas três referências, o SGB funciona de forma semelhante, e possui um sistema de admissão de biogás e ar, um motor à gás (cujo combustível é o biogás), e um Gerador de Indução Síncrono (IG) diretamente conectado ao motor. O biogás purificado misturado com ar na proporção ideal é inserido na câmara de combustão do motor a gás (GE) e sua ignição gera energia mecânica suficiente para acionar o IG. Quando a velocidade do IG for igual a sua velocidade síncrona, ele pode entregar energia elétrica para o sistema de distribuição.[12]

Desta forma, as referências fazem a modelagem matemática destas três sub-partes e também de outros sistemas, dependendo do método abordado. A referência [12] modela o GE com o regulador de velocidade, o IG, o sistema de excitação e também o cabo de conexão à carga. Já [13] modela os processos do GE e do IG. Enquanto [4] modela o GE, o sistema de excitação do IG e o IG. Nas subseções a seguir, é possível notar que as três referências avaliam variáveis diferentes umas das outras, sendo notável algumas semelhantes e particularidades de cada abordagem.

MODELAGEM DE LI WANG

A referência [12] faz a modelagem matemática de um SGB descrito pelo esquemático da Figura 1. Os terminais de saída do IG são conectados ao barramento interno de uma grande fábrica de alimentos. Por este motivo, [12] faz a modelagem do cabo de conexão do SGB à fábrica, que possui uma impedância de $R_t + jX_t$, onde R é a resistência e X é a reatância, no tempo t . O circuito de excitação capacitiva do SGB é representado como uma capacitância equivalente C em paralelo com uma resistência de descarregamento R_d , que é requerida para descarregar a energia acumulada em C quando o SGB é desligado ou o IG é desconectado da rede.

Para modelar o GE, [12] utiliza o diagrama de blocos com a função de transferência de um GE simples equipado com um controlador de velocidade. Para modelar o IG, [12] utiliza as Equações 1, 2, 3 e 4, de tensão e corrente em p.u., do modelo de circuito equivalente de Seixo-d-q de um IG simétrico trifásico conectado em uma rede elétrica sob uma rotação síncrona de referência.

$$(X_{ls} + X_m)p(i_{qs}) - (X_m)p(i_{qr}) = [-r_s i_{qs} - \omega_e(X_{ls} + X_m)i_{ds} + \omega_e X_m i_{dr} - v_{qs}] \omega_{base} \quad (1)$$

$$(X_{ls} + X_m)p(i_{ds}) - (X_m)p(i_{dr}) = [-r_s i_{ds} + \omega_e(X_{ls} + X_m)i_{qs} - \omega_e X_m i_{qr} - v_{ds}] \omega_{base} \quad (2)$$

$$(X_{lr} + X_m)p(i_{qr}) - (X_m)p(i_{qs}) = [-r_r i_{qr} + (\omega_e - \omega_r)X_m i_{ds} - (\omega_e - \omega_r)(X_{lr} + X_m)i_{dr}] \omega_{base} \quad (3)$$

$$(X_{lr} + X_m)p(i_{dr}) - (X_m)p(i_{ds}) = [-r_r i_{dr} - (\omega_e - \omega_r)X_m i_{qs} + (\omega_e - \omega_r)(X_{lr} + X_m)i_{qr}] \omega_{base} \quad (4)$$

Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 7 - Energia Acessível e Limpa

$$\frac{C}{\omega_b} p(v_{qs}) = i_{qs} - i_{qL} + \omega_e C v_{cd} - \frac{v_{cd}}{R_D} \quad (8)$$

$$\frac{X_T}{\omega_b} p(i_{dL}) = v_{ds} - R_T i_{dL} - v_{d,inf} - \omega_e X_T i_{dL} \quad (9)$$

$$\frac{X_T}{\omega_b} p(i_{qL}) = v_{qs} - R_T i_{qL} - v_{q,inf} + \omega_e X_T i_{qL} \quad (10)$$

MODELAGEM DE YANNING

[13] faz a modelagem matemática do SGB ilustrado na Figura 2, composto pela piscina de biogás, torre de desulfurização, vaso de pressão certa, válvula, motor a gás, gerador e controlador. Analisando inicialmente o processo de trabalho mecânico de acordo com a pressão, temperatura e coeficientes de queima de biogás, o autor descreve a relação entre o torque de saída (T_{iq}) e a potência instantânea (P_i) com as Equações 11 e 12, onde V é o volume, P é a pressão, i é o numero do tanque de gás e η_m é a eficiência da disponibilidade.

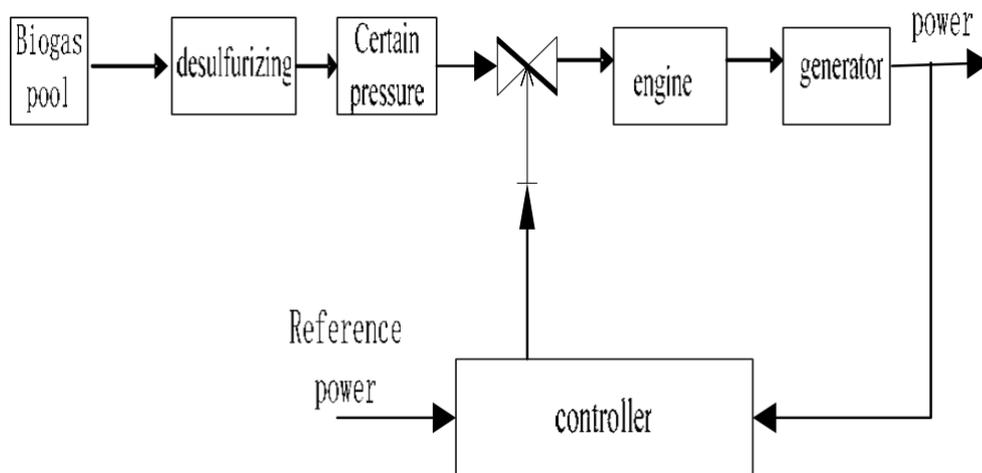


Figura 2 - Esquemático do SGB modelado por [13]

$$P_i = \frac{pVni}{120} \quad (11)$$

$$T_{iq} = \frac{9550 P_i \eta_m}{n} \quad (12)$$

[13] também modela o gerador de energia considerando o modelo de circuito equivalente de *eixo-q-d* de um gerador síncrono. A geração de energia por biogás é então abordada pelo modelo de potência, e a equação transformada pela transformação do *eixo-q-d* é representada pelas Equações 13 e 14.

Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 7 - Energia Acessível e Limpa

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \psi_f \\ \psi_{kd} \\ \psi_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 & L_{ad} & L_{ad} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & 0 & L_q \\ 0 & 0 & L_0 & 0 & 0 & 0 \\ L_{ad} & 0 & 0 & L_f & L_{fkd} & 0 \\ L_{ad} & 0 & 0 & L_{fkd} & L_{kd} & 0 \\ 0 & L_{aq} & 0 & 0 & 0 & L_{kq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \\ i_f \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \\ u_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{kq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \\ i_f \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P\psi_d \\ P\psi_q \\ P\psi_0 \\ P\psi_f \\ P\psi_{kd} \\ P\psi_{kq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \omega\psi_d \\ -\omega\psi_q \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

onde L é indutância, i é a corrente elétrica, U é a tensão, r é a resistência e P é a potência, as variantes com sufixo f, k, d e kq são a variante do rotor e as variantes equivalentes do eixo $q-d$. A força eletromotriz do estator é demonstrada pela Equação 15. A potência e geração é dada pela Equação 16, onde δ é o ângulo entre o vetor força eletromotriz e o vetor tensão final e U_t é a magnitude da tensão de saída.

$$E_q = L_{ad} i_f \quad (15)$$

$$P_e = \frac{E_q U_t}{L_d} \sin \delta + \left(\frac{1}{L_q} - \frac{1}{L_d} \right) \frac{U_t^2}{2} \sin 2\delta \quad (16)$$

A excitação é dada pela Equação 17, onde U_f é a tensão de excitação, r_f é resistência de excitação, I_f é corrente de excitação, $T_{do} = \frac{L_f}{r_f}$ é a constante de tempo, E'_q é o transiente de força eletromotriz.

$$\begin{cases} U_f = r_f I_f + \frac{d\varphi_{fd}}{dt} = E_q + T_{do} \frac{dE'_q}{dt} \\ E_f = E_q + T_{do} \frac{dE'_q}{dt} \end{cases} \quad (17)$$

MODELAGEM DE CAMPOS

Utilizando modelos computacionais para representar a dinâmica do grupo motor-gerador com Motor de Combustão Interna (MCI) movido a biogás, a referência [4] modela o sistema da Figura 3, simulado com o software *Matlab/Simulink*. Dentro desse sistema de GD tem-se um Sistema de Excitação (SE) fornecendo tensão de campo para um Gerador Síncrono (GS), que define a potência ativa gerada e a velocidade do eixo ao qual está ligado um MCI. O MCI, por sua vez, gera a potência mecânica que move o GS.[4]

Para modelar o MCI, [4] utiliza um Modelo de Valores Médios (MVM) de um MCI funcionando em ciclo Otto à gasolina. Para modelar o SE do GS o autor utiliza o modelo *brushless* (do inglês: sem escovas) *AC5A*, disponibilizado em uma biblioteca do software *Matlab/Simulink* que segue a

Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 7 - Energia Acessível e Limpa

norma da *IEEE* (Sigla em inglês para *Institute of Electrical and Electronic Engineers* - Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos) referente à este tipo de sistema, e para representar o GS, [4] utiliza o “modelo do gerador síncrono fundamental em p.u.” da biblioteca do mesmo software, em coordenadas $dq0$, considerando a dinâmica de estator, do campo e um enrolamento amortecedor. Para representar o controle da potência ativa gerada pelo conjunto motor-gerador, a referência implementa uma malha de controle, utilizando um controlador do tipo Proporcional-integral (PI).

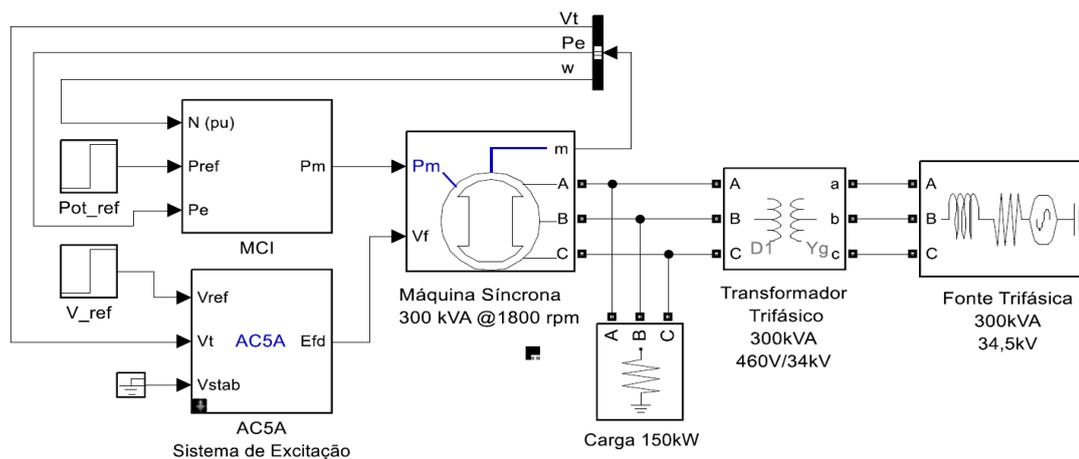


Figura 3 - Esquemático do SGB modelado por [4]

[4] desenvolve uma adaptação do modelo para um MCI movido a biogás, adequando as curvas de torque e potência versus velocidade para as condições operativas de seu caso de interesse. Essas adaptações permitem a obtenção das Equações 18, 19 e 20, onde T_g é o torque resultante do estágio de combustão, m_{ap} é a taxa de variação mássica do ar admitido no cilindro de admissão do motor (considerada constante na fase de admissão), m_a é a massa de ar admitida no cilindro de admissão do motor, AFR é a relação ar-combustível, θ é o ângulo de centelha, N é a velocidade de rotação do conjunto motor-gerador (considerada constante na fase de admissão) e P_i é a pressão interna do coletor. Tais equações são capazes de reproduzir o comportamento do MCI movido a biogás estudado por [4].

$$T_g = -4532,5 + 2371m_{ap} + 547,5AFR - 21,25AFR^2 + 6,5\theta - 0,07\theta^2 + 2,7N - 0,0428N^2 + 0,048N\theta + 15,9375\theta m_{ap} - 0,3125m_{ap}\theta^2 \quad (18)$$

$$m_{ap} = \frac{\pi}{N} \dot{m}_{ap} \quad (19)$$

$$\dot{m}_{ap} = -0,36 + 0,35916N p_i - 0,1348N p_i^2 + 0,0016N^2 p_i \quad (20)$$

Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 7 - Energia Acessível e Limp

COMPARAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS E CONCLUSÕES

[12] modela matematicamente o comportamento de um sistema específico de geração de energia por biogás, com características pré-definidas, prevendo as variáveis elétricas do sistema, o torque gerado no motor elétrico e tendo, por fim, um modelo que descreve o comportamento da geração de energia, mas não relacionando este comportamento com as variáveis de entrada como a qualidade do biogás, pressão de entrada de mistura no motor, determinação da mistura ideal de biogás e ar para queima ideal e diversos outros.

Ainda, [13] utiliza uma abordagem diferente e modela um SGB a partir dos processos de geração de trabalho mecânico de acordo com variáveis como temperatura, pressão, volume e características de mistura de biogás e ar, incluindo os coeficientes de queima dessa mistura e o movimento de gás na câmara de combustão do motor. [13] demonstra a relação entre o torque de saída e a potência instantânea do motor e então apresenta a modelagem das grandezas elétricas de saída do gerador, sem oferecer um modelo matemático que relacione as variáveis de entrada e saída do SGB como um todo.

[4] por sua vez, aborda o SGB com base em um sistema gerador de energia movido à gasolina com ciclo Otto, e, através de simulações computacionais, adapta o mesmo para biogás e faz uma modelagem matemática sistemática da geração de energia elétrica do biodigestor. Com isso, encontra as equações que relacionam as variáveis físicas, químicas e elétricas e oferece, ao final, uma equação única que descreve o comportamento do gerador de energia como um todo, levando em consideração a temperatura, torque, relação de ar e combustível, velocidade de rotação e a pressão interna do motor.

Por este motivo, o modelo de [4] se mostra como o mais inteligível entre as três referências estudadas, e é útil quando se procura entender a relação entre as variáveis de entrada e a geração de energia elétrica de saída. O modelo de [12] considera apenas o circuito elétrico do biodigestor, não analisando outras variáveis que podem influenciar na geração de energia, e sendo impróprio para estudos que visam melhorar a eficiência energética do sistema completo. [13] leva em consideração as variáveis de entrada, mas apenas encontra as equações que descrevem algumas relações entre elas, sem oferecer uma modelagem ampla, que una todos os conceitos.

A fim de obter um modelo completo, em trabalhos futuros a estratégia de modelagem de [4] será utilizada como base e aliada a mais variáveis físicas e químicas do processo de biodigestão e geração. Ainda, outras variáveis de entrada como o tipo de biogás de entrada sua qualidade de metano serão estudadas com o objetivo de aprimorar a acurácia da modelagem de SGBs.

Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 7 - Energia Acessível e Limp

REFERÊNCIAS

1. ANEEL: Atlas de energia elétrica do Brasil. Agência Nacional de Energia Elétrica, 3 edn. (2008), <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>
2. ANEEL: Resolução Normativa no 482, de 17 de abril de 2012. ANEEL (2012).
3. Biswas, J., Chowdhury, R., Bhattacharya, P.: Mathematical modeling for the prediction of biogas generation characteristics of an anaerobic digester based on food/vegetable residues. *Biomass and Bioenergy* 31(1), pp 80-86. (2007). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.013>, URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953406001164>.
4. Campos, B.A.P., Lucio, L.T., Reginatto, R., Marques, F.S., Zank, J.C.C., de Franca, T.J.L.: Biogas fueled internal combustion engine mean value model for distributed generation. In: 2018 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE). pp 1-6 (2018).
5. Colmenar-Santos, A., Reino-Rio, C., Borge-Diez, D., Collado-Fernández, E.: Distributed generation: A review of factors that can contribute most to achieve a scenario of dg units embedded in the new distribution networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59, pp 1130-1148 (2016). DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.023>, URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116000538>.
6. EPE: Balanço Energético Nacional 2019: Ano base 2018. Empresa de Pesquisa Energética (2019), URL: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoesdados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf>
7. Freitas, F., Souza, S.D., Ferreira, L., Otto, R., Alessio, F., Souza, S.D., Venturini, O., Junior, O.A.: The brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 101, pp 146-157 (2019). DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.007>, URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307391>.
8. Gerber, M., Span, R.: An analysis of available mathematical models for anaerobic digestion of organic substances for production of biogas. *Proceedings of the International Gas Union Research Conference 2*, pp 1-30 (01 2008).
9. Li, X., Wang, Y.: Prediction model of biogas production for anaerobic digestion process of food waste based on lm-bp neural network and particle swarm algorithm optimization. In: 2017 Chinese Automation Congress (CAC). pp. 7629-7633 (2017)
10. Pao, H.T., Fu, H.C.: Renewable energy, non-renewable energy and economic growth in brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 25, 381-392 (2013). DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.004>, URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113002906>
11. Stanescu, L.A., Diana Robescu, L., Futselaar, H.: Biogas production modeling and simulation in low end conditions. In: 2017 International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM). pp. 381-384 (2017).
12. Wang, L., Lin, P.: Analysis of a commercial biogas generation system using a gas engine {induction generator set. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 24(1), pp. 230-239 (2009).
13. Yanning, Z., Longyun, K., Binggang, C., Chung-Neng, H., Guohong, W.: Simulation of biogas generation. pp. 1-5 (11 2009). DOI: <https://doi.org/10.1109/TDASIA.2009>.



Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 7 - Energia Acessível e Limpa

Parecer CEUA: 02473118.8.0000.5350