**Generación de electricidad e hidrógeno a partir de residuos alimentarios y vegetales – Análisis técnico y económico**

**Raul Pereira Micena1,2, Paulo Sérgio Duque de Brito2, Celso Eduardo Tuna3, José Luz Silveira4**

1 Laboratório de Otimização de Sistemas Energéticos (LOSE) / Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN) – UNESP. raul.micena@unesp.br

2 VALORIZA-Research Center for Endogenous Resource Valorisation, Polytechnic Institute of Portalegre, 7300-555 Portalegre, Portugal.

3 Laboratório de Otimização de Sistemas Energéticos (LOSE) / Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN) – UNESP. E-mail celso.tuna@unesp.br

4 Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN) – UNESP / Núcleo de Revalorização de Resíduos (REVALORES), Universidade Federal do ABC (UFABC), Brasil. E-mail: jose.luz@unesp.br; www.feg.unesp.br/ipben

**Resumo**

A cidade de Guaratinguetá, Brasil, produz diariamente 104,4 toneladas de RSU, sendo 45,3% sua fração orgânica, e os demais se dividindo entre material reciclável e rejeitos sem aproveitamento. Com este dado e a composição gravimétrica do RSU, este estudo propõe o cálculo do potencial de produção de biogás a partir da digestão anaeróbia da Fração Orgânica do Resíduo Sólido Urbano (FORSU). Tal fração orgânica é composta principalmente de resíduos alimentares, como frutas e hortaliças, bem como papel e papelão, entre outros, sendo um composto apto a ser processado em um biodigestor. Com base em equações conhecidas, foi calculado um potencial de produção de 3.125 Nm3 de biogás por dia, ou 3.603 kg/dia. Considerando a combustão deste gás em uma turbina a gás, calculou-se um potencial de geração de eletricidade de 6,34 MWh/dia. Considerando a utilização da totalidade deste potencial elétrico em um processo de eletrólise da água, foi calculado um potencial de produção de 107,4 kg/dia de hidrogênio eletrolítico. Por fim, é realizada a análise econômica da geração da eletricidade, considerando custos de investimento e manutenção da planta geradora, resultando em um custo de geração da energia elétrica entre 34,68 e 41,16 USD/MWh, dependendo da taxa de juros aplicada. O payback do investimento em geração de eletricidade foi calculado entre os anos 4 e 5, considerando a tarifa elétrica local de 43,98 USD/MWh.

**Palabras chave:** resíduos sólidos urbanos; hortifrúti; biogás; geração de energía; hidrogênio.

**Abstract**

The municipality of Guaratinguetá, located in Brazil, produces 104.4 tons of MSW daily, 45.3% of which is its organic fraction, and the rest is divided between recyclable material and waste without use. With this data and the gravimetric composition of MSW, this study proposes the calculation of the biogas production potential from the anaerobic digestion of the Organic Fraction of Urban Solid Waste (OFMSW). This organic fraction is mainly composed of food residues, such as fruits and vegetables, as well as paper and cardboard, among others, being a compound able to be processed in a biodigester. Based on known equations, a production potential of 3,125 Nm3 of biogas per day, or 3,603 kg/day, was calculated. Considering the combustion of this gas in a gas turbine, an electricity generation potential of 6.34 MWh/day was calculated. Considering the use of all this electrical potential in a water electrolysis process, a production potential of 107.4 kg/day of electrolytic hydrogen was calculated. Finally, an economic analysis of electricity generation is carried out, considering investment and maintenance costs of the generating plant, resulting in a cost of electricity generation between 34.68 and 41.16 USD/MWh, depending on the interest rate applied. . The payback of the investment in electricity generation was calculated between 3 and 4 years, considering the local electricity tariff of 73.98 USD/MWh.

**Keywords:** urban solid waste; hortifruti; biogas; power generation; hydrogen.

# Introdução

Em 2018 no Brasil foram gerados 216 mil toneladas diárias de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), aproximadamente 1,03 kg/habitante/dia [1]. Desse total, 92% foram devidamente coletados. Cerca de 40% dos RSU coletados em 2018 foram depositados inapropriadamente em lixões a céu aberto, sendo que 53% dos municípios destinaram seus RSU em lixões a céu aberto ou em aterros controlados, enquanto que 46,1% depositavam em aterros sanitários [2].

Quando não depositado corretamente, é responsável por problemas ambientais, como poluição dos lençóis aquáticos com metais pesados e chorume, além da emissão de gás metano na atmosfera [3], cujo potencial de aquecimento global é pelo menos 25 vezes maior que o do dióxido de carbono [4].

Ainda quando depositados nos aterros sanitários, como acontece na maior parte das vezes, é perdida grande parte do material reciclável, se tornando praticamente irrecuperáveis. Nestes locais, além das proteções ao solo e subsolo, com captação e tratamento do chorume, costuma-se haver uma drenagem e queima do biogás gerado pela decomposição anaeróbia da matéria orgânica contida nestes resíduos. Na maioria das vezes, esta queima se dá em *flares*, sem qualquer aproveitamento energético desta combustão.

Figura 1: Composição dos RSU no Brasil.



Fonte: [1]

A Digestão Anaeróbia (DA) da material orgânico em reatores anaeróbios dedicados resulta na produção de biogás, com alta concentração de metano, podendo ser utilizado como combustível na geração de eletricidade, trabalho mecânico ou calor. Com a produção do biogás, a DA tem como efluente o digestato, um composto que pode ser tratado e aproveitado como biofertilizante [5]. Desta forma, tal processo é uma forma atrativa para tratamento dos resíduos orgânicos, uma vez que possibilita o aproveitamento energético de sua biomassa contida sendo, portanto, um recurso energético renovável.

Foram desenvolvidos na Europa diversos modelos de biodigestores anaeróbios apropriados para o processamento de RSU para geração de biogás, sendo os tipos *Dranco*, *Kompogas*, *Valorga*, *Bekon*, *Waasa* e BTA os mais comuns e com diversas instalações em funcionamento. Tais tecnologias se diferem quanto à temperatura de operação do reator, umidade da matéria orgânica, número de estágios, capacidade de geração de biogás, entre outras particularidades [6].

O presente trabalho analisa a possibilidade de se utilizar todo o resíduo orgânico contido nos RSU gerados na cidade de Guaratinguetá, Brasil, visando a produção de biogás por meio da digestão anaeróbia. Nesta cidade são produzidas diariamente 104 toneladas de RSU.

De acordo com dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE)[1], 45,3% da massa dos RSU no Brasil são compostos de material orgânico, 28,6% de materiais recicláveis (papel, metais, vidros, madeiras, plásticos) e 26,1% de outros (panos, trapos, borrachas e outros materiais). A composição dos RSU no Brasil é mostrada na Figura 1.

Assumindo que seja feita a triagem completa dos RSU gerados em Guaratinguetá, o material orgânico, é separado dos demais por meio de processamento mecânico, sendo então denominada Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos (FORSU). Restos de alimentos domésticos, sobras de podas e de feiras livres e descartes hortifrúti são os principais componentes da FORSU. Para este tipo específico de resíduo, são utilizados resultados de caracterização físico-química feita por [7] com amostras de FORSU composta de 35% de frutas, 35% de demais vegetais, 20% de papelão e 10% de plástico.

Serão calculados, por meio das equações e relações dadas, os potenciais de produção de biogás a partir da digestão anaeróbia da FORSU, bem como o de geração de eletricidade por meio da combustão deste gás em grupos geradores com Turbinas a Gás (TG) de ciclo Brayton.

Este potencial elétrico pode ser aproveitado pela cidade, no âmbito de uma geração descentralizada, bem como ser utilizado para produção de hidrogênio, um vetor de alta densidade energética com diversas aplicações sendo desenvolvidas e disponibilizadas, como o transporte e serviços à rede elétrica. Calcula-se então o potencial de produção de hidrogênio com o uso total desta eletricidade em processo de eletrólise.

# Metodologia

# Análise técnica

# Produção de biogás

Conforme dados disponibilizados pelo CETESB, tem-se uma produção anual de 104 toneladas de RSU na cidade de Guaratinguetá, Brasil. Este resíduo é processado em uma unidade municipal de triagem, onde é separado o material reciclável, sendo o restante depositado diretamente no aterro sanitário da cidade de Cachoeira Paulista, 38 km distante.

Considerando a composição gravimétrica média disponibilizada pela ABRELPE [1], 45,3% são aptos a compor um material biodigerível, aqui chamado de FORSU. Por hipótese, assume-se que todo este material será processado para as condições típicas de biodigestão anaeróbia em reatores desenvolvidos especificamente para esta finalidade. Desta forma, pode-se calcular o potencial de produção de biogás, conforme é mostrado adiante, com equações adaptadas de [8].

A equação 1 dá a quantidade de *FORSU* disponível após triagem e tratamento do RSU:

*FORSUT = RSUT – RSUAterro – RSUTriagem* [1]

Em que $RSU\_{T}$ é o total de RSU coletado (t/dia), $RSU\_{Aterro}$ é o total de *RSU* destinado ao aterro sanitário (t/dia) e $RSU\_{Triagem}$ é o total de *RSU* separado para reciclagem (t/dia).

A equação 2 dá a parcela de Sólidos Voláteis (SV) presentes na FORSU, que é consumida na digestão anaeróbia e posteriormente convertida em biogás:

*FORSUSV = FORSUTotal × ηSV* [2]

Em que $FORSU\_{SV}$ é o total (t/dia) de Sólidos Voláteis (SV) contidos na fração orgânica dos resíduos e $η\_{MV} $é percentagem de matéria volátil (% 𝑆𝑉 ⁄ 𝑆𝑇).

O potencial de geração de biogás é dado pela equação [3]:

*mBio = FORSUSV × ηBio*  [3]

Em que $m \_{Bio}$ (kg/dia) é a massa diária de biogás produzida pela digestão anaeróbia da FORSU, $η \_{Bio}$ (kgbiogas/tSV ) é a taxa de conversão de SV em biogás.

O biogás é admitido como uma composição volumétrica de 65% de CH4 e 35% de CO2, conforme verificado por [9], sendo também calculado o PCI (kJ/kg).

# Geração de bioeletricidade

A planta completa é composta por um biodigestor de FURSU, cujo biogás produzido é descontaminado de gases SOx, causadores de danos ambientais, um conjunto turbogerador, composto por turbina a gás e gerador elétrico, conectado ao sistema elétrico local.

O caso de estudo para produção de hidrogênio eletrolítico considera o eletrolisador conectado ao barramento de saída do gerador, consumindo a energia elétrica gerada pela planta.

A Figura 2 mostra os componentes da planta de geração de energia elétrica e biohidrogênio a partir do biogás produzido no biodigestor com a DA da FORSU.

A dessulfatização do biogás é realizada no componente indicado com a letra “L”, seguindo para a câmara de combustão (CC) da turbina a gás, com potência mecânica de eixo *PTG* (kW). O gerador converte esta potência mecânica em uma geração diária *Eel* (MWh). O eletrolisador é capaz de produzir diariamente uma quantidade *mH2* (kg) de hidrogênio, em função do consumo elétrico *Eel*.

Figura 2: Planta de geração de bioeletricidade e produção de biohidrogênio.



Fonte: Elaboração própria.

Com o potencial diário de produção de biogás (kg/dia), pode-se calcular o potencial total de geração de energia elétrica com este recurso. Considera-se a queima do biogás em Turbinas a Gás (TG), acoplados em geradores elétricos. Com equações adaptadas de [10], a energia gerada pode ser calculada com as equações 4 a 6:

*Eel = Pel \* top* [4]

Figura 3: Eletrolisador, com suas entradas e saídas.



Fonte: elaboração própria.

*Pel = ηge \* PTG* [5]

*PTG = ηT,TG \* m’Bio \* PCIBio* [6]

Sendo $ P\_{TG}$ a potência mecânica de eixo da TG [kW], $PCI\_{Bio}$o Poder calorífico Inferior do biogás [kJ/kg], $m'\_{Bio}$ o fluxo mássico do biogás [kg/s], $η\_{el.TG}$ o rendimento térmico da TG [%] e $η\_{ge}$ eficiência de conversão em potência elétrica do gerador de energia [%].

# Produção de biohidrogênio

O processo de eletrólise da água consiste na aplicação de um potencial elétrico em água, com a quebra de sua molécula e consequente liberação de gases O2 e H2.

De forma simplificada a Figura 3 mostra o diagrama de um eletrolisador, equipamento utilizado para produção de hidrogênio com esta técnica, indicando as entradas e saídas.

A Figura 3 mostra o processo de eletrólise, em que a energia elétrica Eel (MWh) é consumida pelo eletrolisador, originando quantidades de hidrogênio (mH2) e de oxigênio (mO2) a partir de uma massa de entrada de água (mH2O). A reação de eletrólise pode ser descrita coma uma equação estequiométrica, conforme Equação [7]:

*H2O → H2 + ½ O2* [7]

Sabendo-se o potencial de geração elétrica diária com o biogás produzido, assume-se que este total pode ser aproveitado em um processo de eletrólise da água, para a produção de hidrogênio. Considerando um eletrolisador com eficiência de 57%, pode-se calcular o potencial de hidrogênio com a equação 8 [11]:

|  |  |
| --- | --- |
| $$η\_{ele}=\frac{\dot{m}\_{H\_{2}}. PCI\_{H\_{2}}}{P\_{el,eletr}}$$ | [8] |

Em que $\dot{m}\_{H\_{2}}$ é a vazão mássica de hidrogênio no eletrolisador (kg/s), $PCI\_{H\_{2}}$ é o Poder Calorífico Inferior do hidrogênio (120 MJ/kg) e $P\_{el,eletr}$ é a potência elétrica do eletrolisador (MW).

# Análise econômica para a geração de bioeletricidade

Utilizando a metodologia proposta por Silveira, Tuna e Lamas [12] o custo da energia elétrica gerada por uma planta geradora é calculado com a equação [9]:

|  |  |
| --- | --- |
| *Cel= ((Ipl xf)/(365×* $t\_{Op}$*×* $P\_{el }$*)) + 𝐶O&M* | [9] |

Em que *Ipl* é o investimento total na planta [US$], 𝑓 é o fator de anuidade [1/ano], $t\_{Op}$ é o tempo diário de operação da planta [h/dia], $P\_{el }$ é a potência elétrica da planta [kW] e *𝐶O&M* é o custo de operação da planta geradora [US$/kWh], assumidos como 3% do investimento na planta. Assim, *CO&M* pode ser calculado como a Equação [10]:

|  |  |
| --- | --- |
| *CO&M = (0,03× Ipl)/( 365×* $t\_{Op}$*×* $P\_{el }$*)* [10] |  |

O fator de anuidade é o valor de um fluxo de caixa que produz lucro em um dado período, o fator de anuidade é dado pelas equações [11] e [12]:

|  |  |
| --- | --- |
| *f= (qk ×(q-1)) / (qk-1)* | [11] |

|  |  |
| --- | --- |
| *q=1+r/100* | [12] |

Onde 𝑓 é o fator de anuidade [1/ano], k é o número de anos [anos], e r é a taxa anual de interesse [%]. A taxa anual de interesse utilizada aqui é a taxa básica de juros SELIC de 13,25% [13], além de outros dois cenários estudados, considerando 4 e 8% ao ano.

# Resultados e discussão

# Análise técnica

# Produção de biogás

Com a equação [1] se chegou a uma quantidade de 47,3 ton/dia de FORSU, aproveitável para o processo de DA. Considerando uma $η\_{SV}$ de 18%, chega-se a uma quantidade de 8,51 t/dia de matéria volátil, capaz de ser convertida em biogás. Por fim, a equação [3], tomando-se uma taxa de conversão de 367 m3de biogás por tonelada de SV, chega-se a um potencial de 3.125 Nm3/dia de biogás.

Com a composição volumétrica assumida de 65% de CH4 e 35% de CO2, chega-se a à descrição do biogás gerado, com seu PCI (kJ/kg) e densidade (kg/m3), conforme Tabela 1:

Com a densidade do biogás dada na Tabela 1, chega-se, portanto, a uma produção diária de 3.603 kg/dia de biogás.

# Geração de bioeletricidade

Por meio da equação [6], considerando um rendimento termodinâmico da turbina a gás de 33% ($η\_{T,TG}$) e eficiência do gerador ($η\_{ge}$) de 95% [14], com uma vazão de 0,0556 kg/s de biogás ao longo de um tempo de operação ($t\_{Op}$) assumido em 18 horas diárias, e com o *PCI* do biogás calculado conforme Tabela 1, se chega a uma potência ($P\_{TG}$) de 352 kW.

Tabela 1: Composição, densidade e PCI do biogás e seus componentes.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Componente** | **Volume (%)** | **Massa Molar (g/mol)**  | **Massa (%)** | **PCI (kJ/kg)** | **Densidade (kg/m3)** |
| **CH4** | 65% | 16,04 | 40,4% | 50.023  | 716 |
| **CO2** | 35% | 44,01 | 59,6% | - | 1.965 |
| **Total** | 100% | 25,83 | 100,0% | 20.192  | 1.153 |

Fonte: elaboração propia.

Com as equações [5] e [6], utilizando uma eficiência do gerador de 95%, chaga-se a um total de 6,34 MWh de potencial de geração elétrica diária.

# Produção de Biohidrogênio

Por meio da equação [8] é possível calcular a massa diária de hidrogênio produzida por eletrólise, considerando que toda a eletricidade gerada foi destinada a este processo. Considerando eficiência do eletrolisador 57% [15], chaga-se a um potencial diário de produção de 107,4 kg de hidrogênio por meio da eletrólise da água com eletricidade gerada pela combustão em TG do biogás produzido com DA da FORSU gerado na cidade de Guaratinguetá, Brasil.

# Análise econômica da geração de bioeletricidade

Os custos da energia elétrica gerada foram calculados com as equações [9] a [12], variando períodos de amortização entre 1 e 20 anos. Foi adotado um custo investimento de 720 USD/kW para a TG e 375 USD/ton/dia o investimento no biodigestor apropriado para DA de FORSU, em relação à sua capacidade diária de processamento.

O custo de operação e manutenção da TG corresponde a 75 USD/kW/ano enquanto que para o reator anaeróbio este custo é de 38 USD/ton/dia de capacidade.

A Figura 4 mostra os custos de geração de eletricidade em função do período de amortização, calculados considerando taxas de juros de 4% e 8% ao ano, além da taxa básica de juros da economia brasileira, SELIC, de 13,24%.

Figura 4: Custos da eletricidade (USD/MWh) em função do período de amortização.



Fonte: Elaboração própria.

Com isso, para um prazo de 5 anos, chegou-se a um custo de 34,68 USD/MWh para a taxa de juros de 4%, 37,41 USD/MWh para a taxa de juros de 8% e 41,16 USD/MWh para a taxa SELIC de 13,25% a.a.

Comparativamente à Tarifa Elétrica (TE) local atual de 43,98 USD/MWh [16], com taxa de câmbio de 5,45 BRL/USD descontada de uma inflação de 6,72% a.a., a média nacional nos últimos 10 anos [17], os paybacks do investimento, para os 3 cenários, se dão entre o 4º e o 5º ano.

# Conclusões

Considerando uma geração de 104,4 toneladas diárias de RSU na cidade de Guaratinguetá, Brasil, sendo 45,3% sua fração orgânica, foi calculado um potencial de produção de 3.125 Nm3/dia de biogás a partir da DA desta parte do resíduo, o equivalente a 3.603 kg/dia de biogás com PCI de 20,19 MJ/kg. Considerando a queima deste gás em uma turbina a gás (ciclo Brayton) é possível gerar 6,34 MWh/dia de eletricidade. Se utilizado o processo de eletrólise da água com 57% de eficiência, é possível, com a utilização de todo este potencial elétrico, produzir-se 107,4 kg de hidrogênio por dia.

Em relação ao total de RSU produzido diariamente na cidade de Guaratinguetá, tal potencial elétrico significa uma geração de 60,96 kWh por tonelada de RSU coleado. Tratando-se de geração renovável de eletricidade no local da destinação, este potencial de geração habilita uma aplicação útil ao processamento destes mesmos resíduos, possibilitando menores emissões de CO2 relativas ao tratamento dos RSU.

Dessa forma, foi possível estimar o potencial de geração elétrica a partir da DA da FORSU de um município de médio porte, o que é de interesse público, tanto na esfera energética, sendo possível gerar esta energia próxima ao centro consumidor, como também ambiental, uma vez que se deixa de emitir metano na atmosfera.

A possibilidade de produção de hidrogênio permite uma flexibilidade do uso energético deste biogás, podendo ser aplicado no setor de transporte ou como um tipo de armazenamento de energia.

Por fim, a análise econômica permitiu estima-se o custo da geração desta eletricidade, chegando a um valor entre 34,68 e 41,16 USD/MWh, dependendo da taxa de juros aplicada. Se comparado ao valor da Tarifa Elétrica praticado no local, o payback do investimento em geração de eletricidade ocorrerá entre o 4º e o 5º ano.

Trata-se, portanto, de um caso onde a questão dos RSU pode ser abordada não apenas como um problema de saneamento ou de saúde pública mas, por outro lado, como uma oportunidade rentável de geração de energia elétrica renovável, bem como a possibilidade de se viabilizar a produção de um vetor energético emergente e com aplicações abrangentes, como é o hidrogênio.

Estudos futuros poderão complementar este trabalho, por meio da análise econômica da produção do biohidrogênio eletrolítico, com o cálculo de seus custos de produção bem como explorar mais detalhadamente o processo de produção do biogás e seu aproveitamento térmico. Nesse sentido tem se em elaboração um estudo mais completo sobre o assunto biohidrogênio e respectivos aspectos econômicos, considerando não apenas o processo eletrolítico, como também a reforma a vapor do biogás.

# Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Este trabalho é financiado por fundos nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do projeto UIDB/05064/2020 do VALORIZA (Centro de Investigação para a Valorização de Recursos Endógenos).

# Referências bibliográficas

[1] ABRELPE, “PANORAMA DOS RESIDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2020,” 2020.

[2] Ministério do Meio Ambiente, “PLANO NACIONALDE RESÍDUOS SÓLIDOS,” 2022.

[3] V. A. Ferraz de Campos, V. B. Silva, J. S. Cardoso, P. S. Brito, C. E. Tuna, and J. L. Silveira, “A review of waste management in Brazil and Portugal: Waste-to-energy as pathway for sustainable development,” *Renew. Energy*, vol. 178, pp. 802–820, Nov. 2021.

[4] C. Yaman, I. Anil, and O. Alagha, “Potential for greenhouse gas reduction and energy recovery from MSW through different waste management technologies,” *J. Clean. Prod.*, vol. 264, p. 121432, Aug. 2020.

[5] Z. Rouhollahi, M. Ebrahimi-Nik, S. H. Ebrahimi, M. H. Abbaspour-Fard, R. Zeynali, and M. R. Bayati, “Farm biogas plants, a sustainable waste to energy and bio-fertilizer opportunity for Iran,” *J. Clean. Prod.*, vol. 253, p. 119876, Apr. 2020.

[6] H. Dhar, S. Kumar, and R. Kumar, “A review on organic waste to energy systems in India,” *Bioresource Technology*, vol. 245. Elsevier Ltd, pp. 1229–1237, 2017.

[7] M. Peces, S. Astals, and J. Mata-Alvarez, “Assessing total and volatile solids in municipal solid waste samples,” *Environ. Technol.*, vol. 35, no. 21–24, pp. 3041–3046, Dec. 2014.

[8] M. A. Valente Santos, “Avaliação do potencial de produção de Biohidrogénio na ETVO da Valorsul,” Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2020.

[9] B. H. Xavier, “Aspectos termodinâmicos, ecológicos e econômicos de sistemas de cogeração com motores de combustão interna operando com gás natural, biogás e gás de síntese,” Guaratinguetá, 2016.

[10] R. F. S. Paulino, A. M. Essiptchouk, L. P. C. Costa, and J. L. Silveira, “Thermodynamic analysis of biomedical waste plasma gasification,” *Energy*, vol. 244, p. 122600, Apr. 2022.

[11] M. Hosseini, I. Dincer, and M. A. Rosen, “Hybrid solar-fuel cell combined heat and power systems for residential applications: Energy and exergy analyses,” *J. Power Sources*, vol. 221, pp. 372–380, 2013.

[12] J. L. Silveira, C. E. Tuna, and W. De Queiroz Lamas, “The need of subsidy for the implementation of photovoltaic solar energy as supporting of decentralized electrical power generation in Brazil,” 2013.

[13] “Taxa Selic.” [Online]. Available: https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/taxaselic. [Accessed: 20-Jul-2022].

[14] Y. Aparecida *et al.*, “Performance Study of a Microturbine System for Cogeneration Application Using Biogas from Manipueira Gas Enthalpy at T 2 (kJ/kg) h 6 Enthalpy of saturated steam at the heat recovery outlet temperature (kJ/kg) h 7 Enthalpy of saturated liquid at 90°C (kJ/kg) h 8 Compressor inlet temperature (°C).”

[15] R. P. Micena, O. R. Llerena-Pizarro, T. M. de Souza, and J. L. Silveira, “Solar-powered Hydrogen Refueling Stations: A techno-economic analysis,” *Int. J. Hydrogen Energy*, 2019.

[16] “Tarifas - clientes atendidos em Baixa Tensão (Grupo B).” [Online]. Available: https://www.edp.com.br/distribuicao-sp/saiba-mais/informativos/tabela-de-fornecimento-baixa-tensao. [Accessed: 22-Jul-2022].

[17] “Inflação | IBGE.” [Online]. Available: https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php. [Accessed: 22-Jul-2022].

# Nomenclatura

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Símbolo** | **Descrição** | **Unidade** |
| *Cel* | Custo da eletricidade | USD/MWh |
| *CO&M* | Custos com operação e manutenção | USD/MWh |
| *Eel* | Energia elétrica gerada | MWh |
| *Eel,eletr* | Energia elétrica consumida pelo eletrolisdador | MWh |
| *f* | Fator da anuidade | - |
| *Ipl* | Investimento na planta | USD |
| *k* | ano | - |
| *mbio* | vazão de biogás  | kg/dia |
| *mH2* | vazão de hidrogênio no eletrolisador | kg/dia |
| *mH2O* | vazão de água no eletrolisador | kg/dia |
| *mO2* | vazão de oxigênio no eletrolisador | kg/dia |
| *PCIBio* | Poder Calorífico Inferior do biogás | MJ/kg |
| *PCIH2* | Poder Calorífico Inferior do hidrogênio | MJ/kg |
| *Pel* | Potência de geração elétrica | kW |
| *PTG* | Potência da Turbina a Gás | kW |
| *top* | Tempo diário de operação | h/dia |
| *ηele* | Eficiência do gerador elétrico | - |
| *ηSV* | Porcentagem de Sólidos Voláteis em relação aos sólidos totais | % |
| *ηBio* | Taxa de conversão de SV em biogás | kg/ton |
| *ηT,TG* | Eficiência térmica da Turbin a Gás | - |