
Feasibility study of the hybrid biogas-photovoltaic energy system in poultry and swine farms

Estudo de viabilidade do sistema híbrido de energia biogás-fotovoltaica em granjas avícolas e suínas

Received: 10-08-2024 | Accepted: 15-09-2024 | Published: 24-09-2024

Aroldo José Teixeira de Souza Filho

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0684-1428>
Instituto Federal Goiano Campus Rio Verde, Brasil
E-mail: ajtsfilho@gmail.com

João Areis Ferreira Barbosa Júnior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5336-4463>
Instituto Federal Goiano Campus Rio Verde, Brasil
E-mail: joao.arei@ifgoiano.edu.br

Édio Damasio da Silva Júnior

Instituto Federal Goiano Campus Rio Verde, Brasil
E-mail: edio.damasio@ifgoiano.edu.br

Célsio Assane

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3905-129X>
Instituto Federal Goiano Campus Rio Verde, Brasil
E-mail: assanejunior20@gmail.com

ABSTRACT

This paper aims to evaluate the use of a hybrid photovoltaic-biogas grid-connected system in a rural property at Rio Verde region. The study focused on technical and cost issues of a rural property with swine and chicken production, located in the state of Goiás, Brazil. A comparative analysis of the costs of the hybrid system after optimization was made using HOMER© (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) software. The analysis shows that the optimal system's initial cost, net present cost, electricity cost with the photovoltaic-biogas on grid system is US\$ 280.180, US\$ 661.682, and 0,082 US\$.kWh⁻¹, respectively. The main cost of the hybrid photovoltaic-biogas energy system consists of the biogas generator, biodigesters, inverters with the photovoltaic modules. In the short term, the implementation of the hybrid photovoltaic biogas system in the region is an interesting alternative for farmers considering the sustainability of agribusiness.

Keywords: Solar Energy; Biogas; Anaerobic Digestion; Sensitivity Analysis; HOMER.

INTRODUÇÃO

O setor de agronegócios se desenvolveu rapidamente no Brasil e hoje corresponde a 23% do Produto Interno Bruto do país (ABPA, 2018). Dentro deste setor, a suinocultura vem se especializando e obtendo grande destaque no mercado nacional e internacional. Segundo relatórios da Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA, 2018), o agronegócio brasileiro está em ritmo acelerado de crescimento. A produção de frangos de corte em 2018 aumentou 26% em comparação ao ano de 2008, enquanto a produção de suínos aumentou 25% no mesmo período.

No que se refere a matriz fotovoltaica, Goiás possui 1436,9 MW de potência instalada, representando 4,7% do total nacional, sendo o 6º estado em capacidade instalada (ABSOLAR, 2024). O estado se destaca na produção de carne suína, com Rio Verde, Jataí e Montividiu liderando na quantidade de suínos. O potencial energético para a geração de biogás na microrregião sudoeste é de 124 MW. A ANEEL, por meio das resoluções normativas Nº 482/2012 e Nº 687/2015, estabelece condições para micro e minigeração distribuída, incentivando o uso de biogás.

O sistema de compensação reduz os custos de produção para produtores rurais e beneficia o meio ambiente através do uso de biodigestores e biogás. A diversificação das fontes de energia renovável melhora o desempenho técnico e o retorno financeiro, além de trazer vantagens ao setor elétrico, como menor impacto ambiental e maior confiabilidade (ALMEIDA; ALMEIDA, 2022; BARBIERO et al, 2023). Contudo, a adoção dessas tecnologias enfrenta dificuldades devido à falta de conhecimento técnico e mão de obra qualificada. Ferramentas computacionais são essenciais para superar esses desafios e promover o uso de energias renováveis.

Diante do exposto, o presente projeto tem por finalidade avaliar o uso das fontes de energia renovável solar fotovoltaica e biogás de suinocultura para produção de energia elétrica; avaliar a possibilidade de uso individual ou híbrido dessas fontes (para isso aplicar o HOMER, que possibilita a realização de estudos de desempenho técnico e econômico).

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo concentra-se na análise de sistemas de geração de energia em granjas de suínos e aves na Fazenda Talhado, Goiás, Brasil. As suinoculturas verticais possuem piso vazado, com dejetos canalizados para biodigestores que geram biogás para energia. A região também abriga aviários de frangos com ventiladores, exaustores e sistemas

automáticos para garantir o bem-estar dos animais. O estudo utiliza simulações no *software* HOMER para otimizar e analisar um sistema híbrido FV-Biogás. O sistema real de biodigestores foi iniciado em fevereiro de 2017 na suinocultura, enquanto o sistema solar começou a operar em julho de 2017 em um aviário tipo *Dark House*.

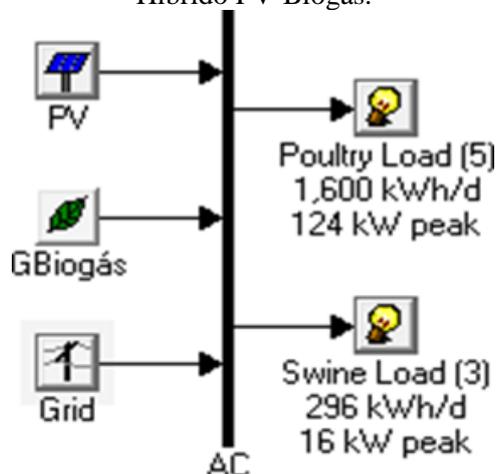
O perfil de carga inclui duas residências, três suinoculturas e cinco aviários, com picos de carga concentrados durante o horário comercial. O consumo médio diário é de 1.601 kWh para aviários e 296 kWh para suinoculturas, com variações baseadas em períodos críticos e normais.

O sistema híbrido pode operar simultaneamente ou alternar entre solar e biogás, com o excedente podendo ser devolvido à rede elétrica. A integração eficiente requer armazenamento de biogás para operar fora do período diurno.

Importa referir que o sistema fotovoltaico analisado utiliza inversores WEG SIW500H com a vida útil de 10 a 15 anos e tamanhos de 30 kW, 36 kW, e 40 kW. Com eficiência entre 98,2% e 98,8%, e custos anuais associados a capital, substituição e O&M em torno de US\$ 293,72 por kW. A tarifa de energia rural foi de US\$ 0,12/kWh e residencial de US\$ 0,24/kWh, com um custo fixo de disponibilidade de US\$ 1.382,4/ano para as unidades consumidoras.

Utilizando o *software* HOMER, as simulações calcularam o balanço de energia para cada hora do ano, avaliando a viabilidade e o custo do ciclo de vida do sistema conforme o modelo disposto na Figura 1. O objetivo era otimizar o sistema para atender a um pico de carga de 140 kW e um consumo diário de 1.897,56 kWh, considerando uma taxa de juros anual de 7% e um tempo de vida de 25 anos.

Figura 1. Modelo do sistema de energia conectado a rede inserido no HOMER - Gerador Híbrido FV-Biogás.



Fonte: Filho et al. (2024).

Adicionalmente, assumiu-se uma taxa de juros anual de 7%, vida útil do sistema de 25 anos, e câmbio médio em 2019, de R\$ 3,875 por US\$ 1,00. Deve-se ressaltar que para os dias atuais (2024), o câmbio se encontra em R\$ 5,64 por US\$ 1,00. Diversas linhas de financiamento para projetos renováveis em Goiás foram identificadas, com taxas de 5,25% a 14,30%.

Radiação e Geração Solar Fotovoltaica

Os dados de irradiação solar para Rio Verde foram obtidos do Atlas Brasileiro de Energia Solar e outras fontes, com uma média anual de 5,4 kWh/m²/dia. As medições comparativas entre diferentes fontes mostraram pequenas variações mensais, mas as médias anuais são semelhantes, variando entre 5,13 e 5,40 kWh/m²/dia, confirmando a consistência dos dados para a região.

A Taxa de Desempenho (TD), conforme definida pela IEC (2013) número 61724, mede a eficiência de uma planta fotovoltaica (FV) solar em converter luz solar em energia elétrica, comparando com os valores projetados. Para validar a TD, foi analisado o ciclo anual de um sistema solar fotovoltaico de 114 kWp em Palmeiras de Goiás, utilizando dados de irradiação solar média da região e considerando a inclinação de 20° das placas solares e o azimute de 180° para instalação, conforme padrões de projeto. Na Tabela 1 tem-se o detalhamento das características da usina solar implantada.

Tabela 1. Medições de energia da GD Solar, Taxas de Desempenho e Irradiação Solar Média da região.

Mês	Irradiância (kWh.m ² .dia)	Dia (kWh)	Mês (kWh)	TD (%)
Janeiro	5,13	443,61	15.911,90	87,77
Fevereiro	5,48	473,88	12.736,58	72,81
Março	5,39	466,09	14.020,97	73,61
Abril	5,63	486,85	14.353,40	74,55
Mai	5,61	485,12	14.143,70	71,34
Junho	5,42	468,69	13.768,20	74,28
Julho	5,65	488,58	15.830,90	79,28
Agosto	6,31	545,65	15.525,10	69,62
Setembro	5,64	487,71	15.193,30	78,77
Outubro	5,42	468,69	13.534,80	70,66
Novembro	5,08	439,29	12.320,69	70,92
Dezembro	5,09	440,15	15.586,40	86,65
Média	5,49	474,53	14.410,50	75,85
Total (kWh)			172.926	

Fonte: Filho et al. (2024).

A taxa de desempenho (TD) de sistemas fotovoltaicos varia conforme as condições de instalação e a qualidade do sistema. Estudos indicam diferentes intervalos para essa taxa: Decker e Jahn (1997) apontam uma variação entre 60% e 79%, enquanto Reich et al. (2012) sugerem um intervalo de 70% a 90%. O Laboratório Nacional de Energias Renováveis dos EUA (RNEL) realizou uma revisão bibliográfica e encontrou um intervalo típico de TD entre 60% e 90% (DIERAUF e PAIVA, 2013).

Os painéis fotovoltaicos utilizados são de silício policristalino, com potência máxima de 330 Wp, tensão de 37,8 V e corrente de 8,73 A. Eles são flexíveis e podem ser instalados em superfícies metálicas, telhados ou no solo, sendo orientados para o norte com inclinação de 20° e azimute de 180°. O albedo local é de 20%, e o fator de desempenho é de 75,85%, considerando perdas por cabos, sombras e poeira. O custo de operação e manutenção é de 1% do investimento inicial, com vida útil do sistema estimada em 25 anos. O custo de capital e reposição é de 1,14 US\$/Wp, incluindo placas solares, inversores, cabeamento, estruturas, instalação e expedição.

A análise de composição e qualidade do biogás envolveu a determinação da concentração de metano (CH₄) para calcular o poder calorífico. Utilizando o Kit de Análise de Biogás (ALFAKIT, 2017) e medições com o GA2000Plus, foi encontrada uma média de 68,5% de CH₄, próximo a outros estudos (Poças et al., 2018). Com essa concentração, o poder calorífico do biogás varia entre 5.000 e 7.000 kcal/m³. Para a granja em estudo, foi adotado um gerador a biogás de 330 kVA, operando em 190 kWh para otimizar o consumo de biogás. A energia excedente gerada pode ser compensada na rede elétrica como créditos, conforme as resoluções da ANEEL. O tempo de vida útil dos geradores é de cerca de 15 anos, com custos de capital e operação considerados para diferentes potências de geradores.

O estudo utilizou um gerador a biogás de 330 kVA, configurado para operar a 190 kWh devido à quantidade limitada de biogás disponível, aumentando o tempo de operação diária. O gerador consome, em média, 97 m³/h de biogás com 65% de metano (CH₄). Com uma concentração de 68,5% de CH₄, o consumo foi ajustado para 86,83 m³/h e considerando os parâmetros de projetos e consumo destes geradores da Tabela 2.

A redução da potência do gerador em 10% diminui o consumo de biogás em 5%. A energia gerada excedente é convertida em créditos para uso futuro, conforme as normas ANEEL. O estudo também considerou custos de capital, reposição e operação para diferentes potências, com vida útil dos geradores estimada em 15 anos.

Tabela 2. Consumo de biogás e produção diária de energia elétrica em carga

MOTOR POTÊNCIA (kVA)	Custos Geração Distribuída (US\$)	Custos O&M (US\$.h ⁻¹)	*Geração em Base Load		Consumo de biogás 65% DE METANO (5.500 kcal.m ⁻³)		Consumo de biogás 75% DE METANO (6.500 kcal.m ⁻³)	
			Horário (kWh)	Diário (kWh)	Horário (m ³ .h ⁻¹)	Diário (m ³ .h ⁻¹)	Horário (m ³ .h ⁻¹)	Diário (m ³ .h ⁻¹)
MWM 30	48.419,87	0,45	20	480	14	336	12	288
MWM 50	49.191,48	0,49	32	768	20	480	17	408
MWM 80	59.121,81	0,57	55	1320	34	816	29	696
MWM120	65.452,13	0,86	75	1800	47	1128	40	960
SCANIA 250	123.676,13	2,40	160	3840	75	1800	63	1512
SCANIA 330	143.188,90	2,40	211	5064	97	2328	82	1968
SCANIA 420	172.077,42	2,40	260	6240	118	2832	100	2400

Fonte: ER-BR (2018). Base Load = Geração contínua (24 h) com potência total do grupo gerador.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

No processo de otimização usando o HOMER, o sistema híbrido FV-Biogás foi ajustado para atender às granjas com o menor número possível de arranjos. O sistema fotovoltaico de 168,3 kWp fornece 35% da eletricidade, com 253.507 kWh/ano e fator de capacidade de 17,2%. O gerador de biogás de 75 kW produz 61% da eletricidade, totalizando 439.145 kWh/ano e fator de capacidade de 66,8%, com um consumo de biomassa de 3.221 ton/ano.

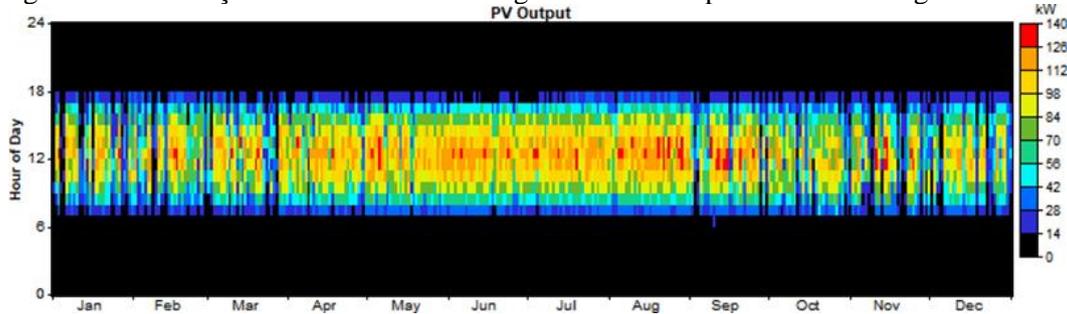
Tabela 3. Resultados otimizados no HOMER. Fonte: Filho et al. (2024).

PV (kWp)	BIO (kW)	Load total (kW)	Initial Cost (US\$)	Operating Cost (US\$/ano)	Total NPC (US\$)	COE (US\$/kWh)	Ren. Frac. (%)	Biomass (t)	BIO oper. (h)
168.30	75	1897.6	257,989	31,413	624,064	0.077	0.97	3,221	7,164
	55	1897.6	59,122	54,512	694,376	0.086	0.66	3,358	8,338
168.30		1897.6	192,537	58,773	877,456	0.109	0.35		
		1897.6	0	83,045	967,768	0.120	0.00		

O sistema gera um excedente de 23.909 kWh/ano, com uma fração renovável de 96,7%. As granjas consumiram 23.298 kWh/ano da rede elétrica, que pode ser compensado pelo excedente gerado. Os custos do sistema são: US\$ 257.989 para o custo inicial, US\$ 624.064 para o custo atual líquido (NPC), e US\$ 0,077/kWh para o custo de eletricidade (COE). O Payback descontado é de 6,36 anos, considerando uma tarifa rural de US\$ 0,12/kWh. O sistema FV-Biogás foi proposto para suprir a demanda energética

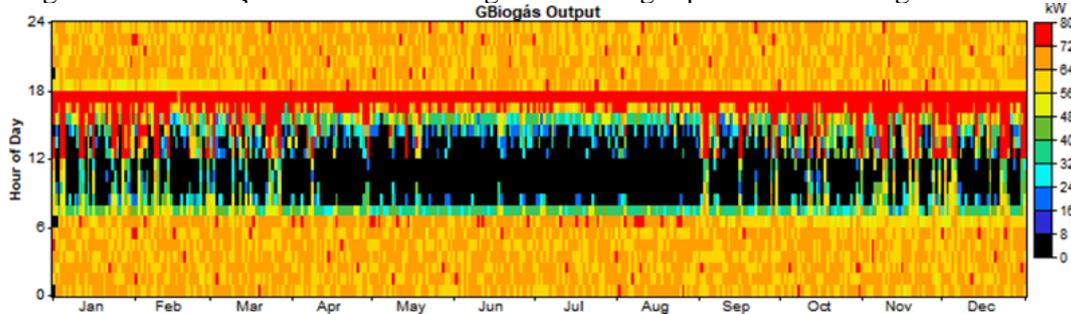
do complexo agropecuário em Rio Verde, conforme comportamento apresentado nas Figuras 2 e 3.

Figura 2. Distribuição horária anual de energia fotovoltaica para atender a cargas instaladas



Fonte: Filho et al. (2024).

Figura 3. Distribuição horária anual do gerador a biogás para atender a cargas instaladas.



Fonte: Filho et al. (2024).

Efeito das taxas de juros no Custo da Eletricidade

Considerando as linhas de financiamentos para sistemas de energias renováveis, tem-se uma variação de 5% a 14% para projetos de grande porte. O efeito de diferentes taxas de juros no custo da eletricidade produzida pelo sistema híbrido FV-Biogás mostra que a uma taxa de juros de 5%, o COE produzido é a US\$ 0,072 kWh⁻¹. Considerando um aumento de 9% na taxa de juros, o COE do sistema híbrido FV-Biogás pode aumentar em cerca de 26.4%, aproximadamente 0,091 US\$.kWh⁻¹.

Custo de Eletricidade e Indicadores Econômicos

Com objetivo de mostrar a viabilidade do sistema híbrido FV-Biogás, foram simulados dois sistemas isolados individuais para atendimento da carga do complexo agropecuário em estudo. Esta simulação foi possível considerando algumas premissas: disponibilidade total de biomassa para o gerador a biogás de 250 kVA, ou seja, 12.96 ton.dia⁻¹ de biomassa para atendimento total da carga e considerando reajustar o consumo de biomassa anual de 4.123 ton.ano⁻¹, tempo de projeto em 25 anos, e o custo da biomassa

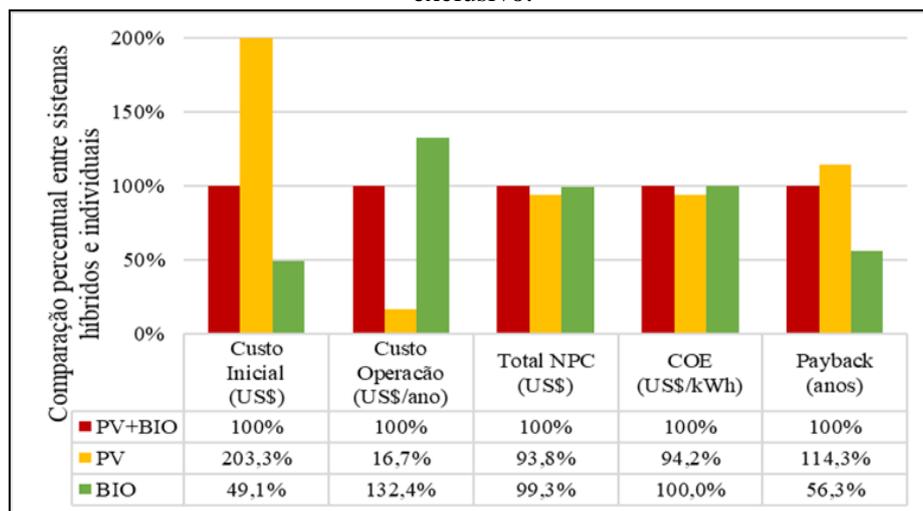
em 4.913 US\$.ton⁻¹, segundo os custos de implantação da Tabela 4. O gerador a biogás irá operar nesta condição com fator de capacidade em 49.4% da nominal. Já para o sistema PV, foram considerados o custo base de 1.14 US\$.Wp, O&M de 1% deste custo para o sistema de 460.02 kWp, e reajuste anual da tarifa em 5%, calculado para gerar a energia requerida pelas granjas.

Tabela 4. Resultados da comparação dos sistemas individuais solar e biogás com sistema híbrido no HOMER. Fonte: Filho et al. (2024).

PV (kWp)	BIO (kW)	Total Grid (kWh)	Custo Inicial (US\$)	Custo Operação (US\$/ano)	Total NPC (US\$)	COE (US\$/kWh)	Ren. Frac. (%)	Biomass (t)	BIO oper. (h)	Payback (anos)
168.30	75	692.040	257.989	31.413	624.064	0.077	0.97	3.221	7,164	6.36
460.02		692.918	524.423	5.244	585.534	0.073	1.00			7.27
	160	691.979	126.676	42.553	619.571	0.077	1.00	4.123	8,759	3.58

Observa-se na Tabela 4 que o sistema híbrido se mostra mais atrativo e viável, pois o sistema exclusivo PV tem um *Payback* superior ao híbrido mesmo com o COE mais baixo, apesar de o COE ter sido superior aos sistemas individuais. Mesmo que o sistema exclusivo biogás tenha o COE e *Payback* mais atrativo que o híbrido, há uma limitação de biomassa disponível produzida pela suinocultura em estudo. Assim, é interessante que sejam melhorados o desempenho para a geração de biogás pelos biodigestores, e também a performance/eficiência do gerador a biogás impactando positivamente nos indicadores econômicos desta solução. A Figura 4, sintetiza a comparação econômica dos sistemas.

Figura 4. Comparação dos indicadores econômicos entre os sistemas híbrido e exclusivo.



Fonte: Filho et al. (2024).

Mesmo com a proximidade do COE, o sistema híbrido apresenta maior confiabilidade, aproveitando o fornecimento de duas fontes renováveis distintas. Isso se traduz em um retorno mais rápido comparado a um sistema exclusivamente fotovoltaico. Embora o custo seja maior em relação a um sistema puramente a biogás, a inclusão da geração fotovoltaica aumenta a versatilidade do sistema. Assim, mesmo com possíveis quedas na produção de biogás, a geração de energia seria mantida via fotovoltaica.

Segundo Heydari e Askarzadeh (2016) e Parihar (2018), a geração de energia do sistema biomassa poderia ser complementar em comparação com a energia solar, tendo em conta as diferentes propriedades em confiabilidade. Nestes estudos, uma estrutura é fornecida para otimização de sistemas híbridos FV-biomassa. Os resultados obtidos indicam que o sistema híbrido é economicamente melhor do que um sistema somente PV ou somente biomassa pela sua vantagem de capacidade de distribuição cuja combinação se torna um sistema de energia confiável e rentável para suprir a demanda elétrica de áreas isoladas.

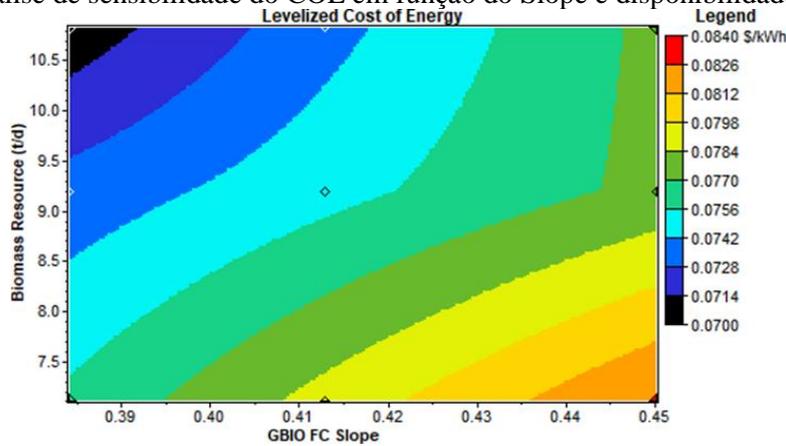
Os estudos de Souza et al. (2013), Castellanos et al. (2015), Bhatt et al. (2016), Singh et al. (2016), Shahzad et al. (2017), Das (2017) e Ahmad et al. (2018) comprovam os benefícios de sistemas híbridos com baixos custos de energia (COE) e ênfase em solar e biomassa para aplicações rurais e áreas remotas. Como uma situação favorável da utilização de resíduos biodegradáveis para a produção de energia, esse sistema também pode ser indicado, pois reduz a emissão de metano que sabiamente seria lançado no meio ambiente como resultado dos processos naturais de decomposição biológica de resíduos ou seu armazenamento em aterros sanitários.

Efeito da Disponibilidade de Biomassa e Slope do Gerador no Custo da Eletricidade e Geração de Energia

O COE produzido pelo sistema híbrido FV-Biogás em função da eficiência do gerador a biogás e da disponibilidade é apresentado na Figura. 4, enquanto a geração de energia a biogás, considerando a variação dos mesmos parâmetros, pode ser visualizada na Figura 5. Esta análise supõe que a eficiência do consumo dos geradores a biogás (*Slope*) esteja situada na faixa de concentração de metano de 65%, 70% e 75%, apresentando respectivamente, as taxas de conversão de 0,4512; 0,4128 e 0,384 kg.kWh⁻¹. Neste caso, foram consideradas a razão dos consumos específicos do gerador de 75 kW, conforme Tabela 4, e a potência de saída também de 75 kW. Com relação à

disponibilidade de biomassa, foi considerada a variação em 20.29% da média anual, no caso, $9,2 \pm 1,867 \text{ t.dia}^{-1}$, tendo em vista o desvio padrão médio da produção.

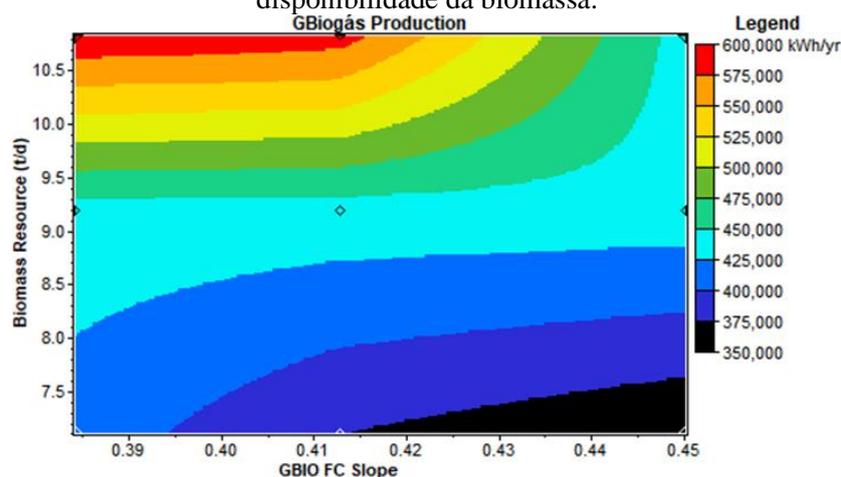
Figura 5. Análise de sensibilidade do COE em função do Slope e disponibilidade da biomassa.



Fonte: Filho et al. (2024).

Os resultados da análise de sensibilidade mostraram que o aumento da concentração de CH₄ ou redução do *Slope* reduziram 7.27% no COE, enquanto que a variação em $\pm 20\%$ da disponibilidade de biomassa provocou variação de 10% no COE. Tal intermitência pode ter sido causada por diferentes fatores: temperatura de trabalho das bactérias, alimentação dos suínos e utilização excessiva de água na higienização das baias, o que impacta no volume de matéria seca que será convertida em biogás.

Figura 6. Análise de sensibilidade do Produção de Energia a Biogás em função do Slope e disponibilidade da biomassa.



Fonte: Filho et al. (2024).

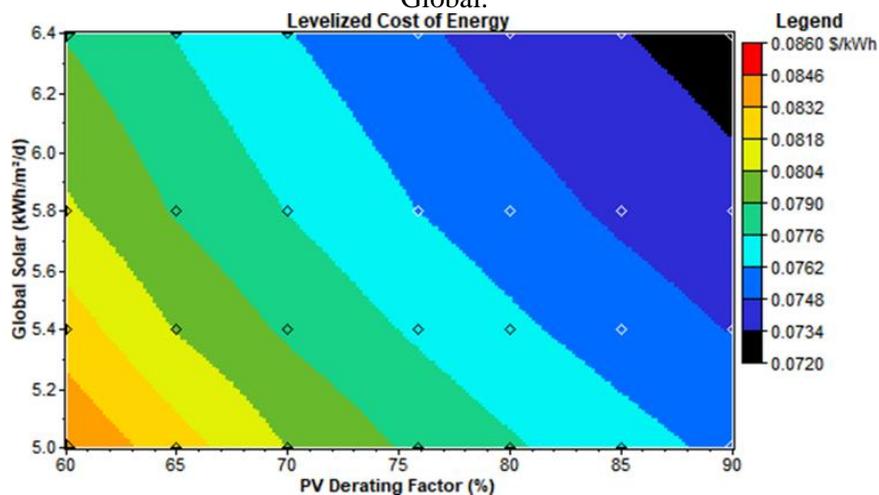
Analisando a Figura 6, observa-se que a variação da produção de energia em MWh.ano⁻¹ diminui em até 17.64% à medida que se aumenta o percentual de metano

(redução do *Slope*) e aumenta a geração em 29.2% com a elevação da disponibilidade de biomassa.

Efeito do Taxa de Desempenho (TD) e da Radiação Solar Global no Custo da Eletricidade e Geração de Energia

As análises se fundamentaram nos estudos Dierauf e Paiva (2013) e Paiva et al. (2017). Os resultados da simulação em relação às variações na taxa de radiação solar e desempenho são apresentados na Figura. 7. Como pode ser visto, o sistema aumenta o COE com o aumento no consumo de energia. Em razão da variação na disponibilidade de radiação solar, aumento no desempenho da energia solar permite redução no COE do sistema, sendo mínima essa redução. A combinação do aumento da radiação com o desempenho do sistema resulta em uma redução total de COE em 17.5%, com taxa de juros em 7%.

Figura 7. Análise de sensibilidade do COE em função do Taxa de Desempenho (TD) e Radiação Solar Global.

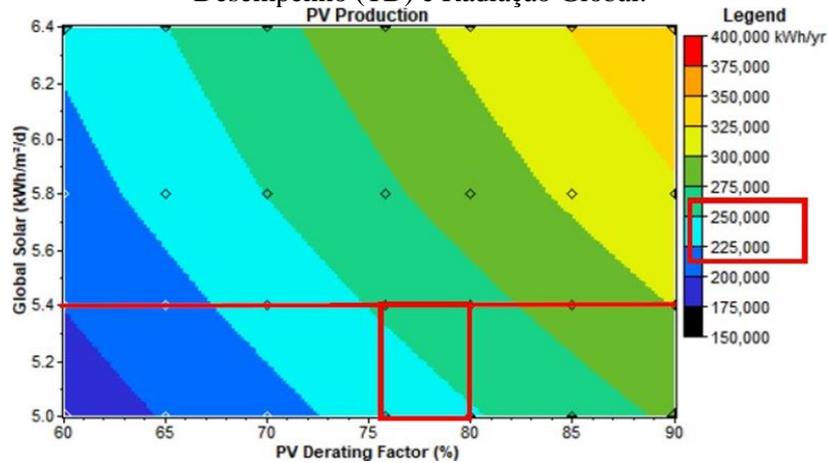


Fonte: Filho et al. (2024).

A Figura 8 apresenta uma análise de sensibilidade da produção de energia solar aumenta com o aumento da Taxa de Desempenho (TD) e da radiação global.

Para um TD de 60%, a produção varia de 200 MWh a 250 MWh à medida que a irradiância global aumenta de 5,0 para 6,4 kWh/m²/dia. Para um TD de 90%, a produção varia de 300 MWh a 350 MWh nas mesmas condições. Um sistema com TD de 90% gera 125 MWh a mais do que um com TD de 60% para mesma irradiância de 6,4 kWh/m²/dia, destacando a importância de otimizar o TD para aumentar a produção de energia fotovoltaica.

Figura 8. Análise de sensibilidade Produção de Energia Solar em função do Taxa de Desempenho (TD) e Radiação Global.



CONCLUSÕES

Os resultados da análise de simulação indicaram que o uso de um sistema híbrido FV-Biogás é economicamente viável em razão da redução de custos dos componentes da tecnologia de energia renovável no Brasil. Os painéis fotovoltaicos são o principal fator de custo do sistema proposto após a otimização em razão do baixo aproveitamento energético.

A produção média de biogás foi de 772,20 m³/dia, resultando em uma métrica de 0,064 m³/dia/suíno, sendo este um indicador fundamental para futuros projetos na região de Rio Verde e no Sudoeste Goiano. O biogás apresentou 68% de metano, com um consumo específico de 0,63 m³/kWh e eficiência global de 1,60 kWh/m³. O sistema gerou 439,16 MWh de biogás e 253,51 MWh de energia solar, com 23,91 MWh exportados para a rede, o que gerou um custo evitado de 85.990 US\$/ano.

O custo de energia (COE) foi de 0,0430 US\$/kWh para o biogás e 0,0725 US\$/kWh para a energia solar. A análise revelou que o sistema híbrido FV-Biogás oferece uma solução competitiva, com um COE de 0,077 US\$/kWh, *paybacks* simples e descontados de 4,99 e 6,36 anos, respectivamente, uma taxa interna de retorno de 19,8% e um retorno sobre o investimento de 20%.

A simulação também destacou que uma redução na taxa de juros e o aumento da radiação solar e da concentração de metano (% CH₄) podem diminuir ainda mais o COE, tornando o sistema mais eficiente. A complementariedade entre as fontes solar e biogás permite otimizar a geração de energia ao longo do dia, utilizando biogás à noite e

colaborando com a concessionária para ajustar a oferta de energia nos horários mais críticos.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), pela disponibilização de bolsas de apoio financeiro; às empresas ERBR Renováveis, AUTA Bioenergia, WAG Engenharia e MFC Engenharia, pelas informações e apoio técnico prestado; e aos proprietários Ivan Klein (Fazenda Dona Thereza) e Jorge Comelli (Fazenda Talhado Rio Doce), pelo apoio nas visitas técnicas e informações dos projetos de geração distribuída.

Agradecimentos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Rio Verde, pelo apoio/auxílio na publicação deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL (ABPA), 2018. Disponível em: <http://abpa-br.com.br/storage/files/relatorio-anual-2018.pdf>. Acesso em: 15.07.2019.

Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), Infográfico ABSOLAR, 2024. Disponível em: < <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 03.09.2024.

ALFAKIT. Kit Análise de Biogás. Disponível em: <<https://alfakit.ind.br/kit-analise-de-biogas-cod-3819/1/>>. Acesso em: 12 jan. 2017.

ALMEIDA, H. A. de; ALMEIDA, E. de C. V. de. Potencial da energia solar fotovoltaica no Semiárido nordestino. *Concilium*, [S. l.], v. 22, n. 2, p. 197–210, 2022. Disponível em: <https://clium.org/index.php/edicoes/article/view/111>. Acesso em: 3 set. 2024.

AHMAD, J., IMRAN, M., KHALID, A., IQBAL, W., ASHRAF, S. R., ADNAN, M., KHOKHAR, K. S., Techno economic analysis of a wind-photovoltaic-biomass hybrid renewable energy system for rural electrification: A case study of Kallar Kahar. *Energy* 2018, 148, 208–234.

ANEEL. Resolução Normativa nº 482 (2012). Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 05 mar. de 2019.

ANEEL. Resolução Normativa nº 687 (2015). Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 05 mar. de 2019.

BARBIERO, R. C.; FRANCATO, A. L.; PINHEIRO, V. de C. N. Cooperative generation of photovoltaic solar energy with adoption of microgrids in residential condominiums. *Concilium*, [S. l.], v. 23, n. 18, p. 614–627, 2023. Disponível em: <https://clium.org/index.php/edicoes/article/view/2007>. Acesso em: 3 set. 2024.

BHATT, ANKIT & SHARMA, M.P. & SAINI, R.P., "Feasibility and sensitivity analysis of an off-grid micro hydro–photovoltaic–biomass and biogas–diesel–battery hybrid energy system for a remote area in Uttarakhand state, India," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier 2016, vol. 61(C), pages 53-69.

CASTELLANOS, J. G., WALKER, M., POGGIO, D., POURKASHANIAN, M., NIMMO, W., Modelling an off-grid integrated renewable energy system for rural electrification in India using photovoltaics and anaerobic digestion, *Renewable Energy* 74 (2015), p. 390:398.

DAS, B. K., HOQUE, N., MANDAL, S., PAL, T. K., & RAIHAN, M. A., A techno-economic feasibility of a stand-alone hybrid power generation for remote area application in Bangladesh. *Energy* 2017, 134, 775–788.

DIERAUF, T.; PAIVA, B. Weather-Corrected Performance Ratio. Technical Report, NREL/TP-5200-57991 [S.1.], 2013.

ER-BR Energias Renováveis: Soluções em Energia e Biometano, 2018. Disponível em: <<http://www.erbr.com.br>>.

HEYDARI, A., ASKARZADEH, A., Optimization of a biomass-based photovoltaic power plant for an off-grid application subject to loss of power supply probability concept, *Applied Energy* 2016; 165: 601–611

HOMER. Hybrid optimization model for electric renewables. CO, USA: HOMER Energy, LLC; 2012.

IEC, International Electrotechnical Commission. Photovoltaic system performance monitoring-guidelines for measurement, data exchange and analysis. International Standard IEC, v. 61724, p. 1998–11, 2013.

PAIVA, GABRIEL M.; PIMENTEL, SÉRGIO P.; MARRA, ENES G.; ALVARENGA, BERNARDO P. Analysis of inverter sizing ratio for PV systems considering local climate data in central Brazil. *IET RENEWABLE POWER GENERATION (ONLINE)*, v. 11, p. 1364-1370, 2017.

POCAS, C. C. C.; LEAL, A. D. L.; SOUZA FILHO, A. J. T.; BARBOSA JÚNIOR, J. A. F. Análise da Composição e Qualidade do Biogás. Anais. In: 7º Congresso Estadual de Iniciação Científica e Tecnológica, 2018, Rio Verde.

SHAHZAD M. K., ZAHID, A., RASHID, T., REHAN, M. A., ALI, M., AHMAD, M., Techno-economic feasibility analysis of a solar-biomass off grid system for the electrification of remote rural areas in Pakistan using HOMER software, *Renewable Energy* 2017; 106: 264-273

SINGH, S., SINGH, M., KAUSHIK, S. C., Feasibility study of an islanded microgrid in rural area consisting of PV, wind, biomass and battery energy storage system, *Energy Conversion and Management* 128 (2016), p. 178–190.

SOUZA, S. N. M., WERNCKE, I., MARQUES, C. A., BARICCATTI, R. A., SANTOS, R. F., NOGUEIRA, C. E. E., BASSEGIO, D., Electric energy micro-production in a rural property using biogas as primary source, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013; 28: 385-391