

LUCIANO CALEGARI BURGHI PERTILE

Sistema híbrido solar-biogás de geração de eletricidade para uma indústria de laticínios:
aspectos energéticos, econômicos e ambientais

Luciano Calegari Burghi Pertile

**Sistema híbrido solar-biogás de geração de eletricidade para uma indústria de laticínios:
aspectos energéticos, econômicos e ambientais**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira
Coorientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna

Guaratinguetá - SP
2020

P469s	<p>Pertile, Luciano Calegari Burghi</p> <p>Sistema híbrido solar-biogás de geração de eletricidade para uma indústria de laticínios: aspectos energéticos, econômicos e ambientais / Luciano Calegari Burghi Pertile – Guaratinguetá, 2020.</p> <p>73 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 61-67</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira</p> <p>Coorientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna</p> <p>1. Energia solar. 2. Energia elétrica – Consumo. 3. Energia - Fontes alternativas. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 620.91</p>
-------	--

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

LUCIANO CALEGARI BURGHI PERTILE

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof.^a Dr.^a Andreia Maria Pedro Salgado
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Jose Luz Silveira
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna
Coorientador/UNESP-FEG



Prof. MSc. Omar Rosendo Llerena Pizarro
UNESP-FEG



Prof. MSc. Victor Arruda Ferraz de Campos
UNESP-FEG

Dezembro de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, *Valdinei e Rosana*, ao meu irmão *Matheus*, e à minha família que sempre me apoiaram nas minhas decisões, nos meus estudos, nos meus projetos de vida, me acompanharam e deram os melhores conselhos, sem eles este trabalho com certeza não seria possível;

à minha família de Guaratinguetá, *Manoel, Mário, Natália e Tamile*, por compartilharem todo esse caminho sinuoso comigo através de muitas risadas, suportes nos momentos difíceis, conselhos, estudos até altas horas e infinitas alegrias;

ao meu orientador, *Prof. Dr. José Luz Silveira*, que sempre se mostrou muito prestativo e me incentivou neste trabalho e na ciência. Sem a sua orientação e apoio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível;

ao meu coorientador, *Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna*, que me acompanhou constantemente tanto no plano acadêmico quanto na área de pesquisa e desenvolvimento, onde esteve presente me ensinando e auxiliando na área;

ao Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN-UNESP), Laboratório de Otimização de Sistemas Energéticos (LOSE-FEG-UNESP) e CNPq por todo o suporte fornecido ao longo deste estudo;

aos colegas do laboratório, em especial ao *MSc. Omar Rosendo Llerena Pizarro* pelas orientações no desenvolvimento desta pesquisa desde a ideia inicial, até o resultado final aqui apresentado;

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar;

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento;

e a todos os docentes e amigos que, direta ou indiretamente, me auxiliaram neste crescimento acadêmico e pessoal.

“Bom mesmo é ir à luta com determinação, abraçar a vida com paixão, perder com classe e vencer com ousadia, porque o mundo pertence a quem se atreve, a vida é MUITO para ser insignificante.”

Augusto Branco

RESUMO

A partir da Revolução Industrial a emissão de gases poluentes na atmosfera aumentou consideravelmente agravando o excessivo efeito estufa no planeta, assim, isso motiva pesquisadores a procurar fontes alternativas de geração de eletricidade. Uma das tecnologias de produção de energia elétrica são os sistemas híbridos solar-biogás, pois, além de usarem recursos renováveis, podem abastecer regiões isoladas brasileiras. Deste modo, a pesquisa deste Trabalho de Graduação baseia-se em dimensionar e analisar a utilização de um sistema híbrido gerador que engloba o uso de placas solares fotovoltaicas e motores de combustão interna a biogás para a geração de eletricidade renovável ou bioeletricidade para uma suposta indústria de laticínios em uma localidade na região do nordeste brasileiro. Foram considerados na pesquisa estudos de viabilidade energéticos, econômicos e ambientais de implementação. O sistema fotovoltaico foi dimensionado com 260 módulos e uma potência de 85,80 kW onde geraria 453,26 kWh por dia, enquanto o grupo motor-gerador a biogás possui 51,00 kW no regime contínuo de operação e produziria 612,00 kWh por dia com uma operação de 12 horas diárias. Para a viabilidade de implementação do sistema proposto faz-se necessário que a indústria tenha ao menos 462 bovinos leiteiros, onde houve retorno do investimento a partir de 2 anos de seu funcionamento para uma taxa de juros de 2%, 7% e 12% ao ano. Também mostrou-se viável ambientalmente com uma redução de 1,48% de CO₂-eq por produção de energia elétrica na planta a biogás, e de 59,18% de CO₂-eq por energia na planta fotovoltaica em relação à emissão média do Sistema Integrado Nacional brasileiro.

PALAVRAS-CHAVE: Sistema híbrido solar-biogás. Energia renovável. Dimensionamento de sistema híbrido. Análise energética. Análise econômica. Análise ambiental. Planta a biogás. Planta fotovoltaica.

ABSTRACT

Since the Industrial Revolution the emission of polluting gases into the atmosphere has increased considerably aggravating the excessive greenhouse effect on the planet, thus, this motivates researchers to look for alternative sources of electricity generation. One of the technologies of electric energy production are the solar-biogas hybrid systems because, in addition to using renewable resources, they can supply isolated Brazilian regions. Therefore, this graduation thesis is based on dimensioning and analyzing the use of renewable energy with hybrid applications that encompasses the use of solar photovoltaic plates and internal combustion engines to biogas for the generation of renewable electricity or bioelectricity for a dairy industry in a locality in the northeastern region of Brazil. In the research, energy, economic and environmental feasibility studies for implementation were considered. The photovoltaic system was dimensioned for 260 modules with a power of 85.80 kW where it would generate 453.26 kWh per day, while the biogas motor-generator set has 51.00 kW in continuous operation and would produce 612.00 kWh per day with a 12 hours daily operation. For the feasibility of implementing the proposed system it is necessary that the industry has at least 462 dairy cattle, where there has been a return on investment after 2 years of operation for an interest rate of 2%, 7% and 12% per year. It also proved to be environmentally viable with a reduction of 1.48% of CO₂-eq per energy production in the biogas plant, and 59.18% of CO₂-eq per energy in the photovoltaic plant in relation to the average emission of the Brazilian National Integrated System.

KEYWORDS: Hybrid solar-biogas system. Renewable energy. Sizing of hybrid system. Energy analysis. Economic analysis. Environmental analysis. Biodigester. Biogas plant. Photovoltaic plant.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxo de Energia Elétrica – BEN 2019 (ano base 2018)	15
Figura 2 – Mapa de irradiância solar do Brasil	16
Figura 3 – Esquema de um sistema de geração de energia fotovoltaica autônomo	19
Figura 4 – Esquema de um sistema de geração de energia fotovoltaica conectado à rede elétrica	19
Figura 5 – Gráfico I x V (corrente elétrica em função da tensão) de uma célula de silício em condições-padrões de ensaio	21
Figura 6 – Gráfico I x V (corrente elétrica em função da tensão) de uma célula de silício cristalino a 25°C variando a irradiância	22
Figura 7 – Gráfico I x V (corrente elétrica em função da tensão) de uma célula de silício cristalino variando a temperatura	23
Figura 8 – Esquema do ciclo energético do biogás	24
Figura 9 – Biodigestor contínuo de modelo chinês	26
Figura 10 – Biodigestor contínuo de modelo indiano	27
Figura 11 – Biodigestor contínuo de modelo canadense	28
Figura 12 – Exemplo de um biodigestor contínuo de modelo canadense	28
Figura 13 – Esquema do funcionamento de um motor de ciclo Otto	30
Figura 14 – Gráfico da demanda elétrica média diária da indústria de laticínios	31
Figura 15 – Investimento do inversor em plantas fotovoltaicas em função da potência instalada	41
Figura 16 – Gráfico da energia fotovoltaica produzida por mês	50
Figura 17 – Gráfico do custo de geração de eletricidade do SHGE em função do tempo para 2%, 7% e 12% de juros ao ano	51
Figura 18 – Gráfico do retorno anual de investimento do SHGE proposto em função do tempo para 2%, 7% e 12% de juros ao ano	52
Figura 19 – Gráfico do custo de geração de eletricidade da planta a biogás em função do tempo para 2%, 7% e 12% de juros ao ano	53
Figura 20 – Gráfico do retorno anual de investimento da planta a biogás em função do tempo para 2%, 7% e 12% de juros ao ano	53
Figura 21 – Gráfico do custo de geração de eletricidade da planta fotovoltaica em função do tempo para 2%, 7% e 12% de juros ao ano	54

Figura 22 - Gráfico do retorno anual de investimento da planta fotovoltaica em função do tempo para 2%, 7% e 12% de juros ao ano	55
Figura 23 – Emissões de gases agravantes do efeito estufa no ciclo de vida de plantas fotovoltaicas	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição mais usual do biogás	25
Tabela 2 – Especificações técnicas do Gerador MWM MGG50.60 (conjunto motor-gerador selecionado).....	32
Tabela 3 – Especificações técnicas do módulo solar Canadian Solar MAXPOWER CS6U-330P (painel fotovoltaico selecionado)	33
Tabela 4 – Influência da temperatura no módulo fotovoltaico	33
Tabela 5 – Valores de insolação R_a adotados e energia gerada E_p	34
Tabela 6 – Proporção de investimentos entre inversores e módulos fotovoltaicos da literatura	40
Tabela 7 – Principais parâmetros do sistema a biogás.....	49
Tabela 8 – Energia elétrica fotovoltaica gerada por mês	50
Tabela 9 – Principais parâmetros do sistema fotovoltaico	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional
Cetesb	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH ₄	metano
COP	regime contínuo de operação (<i>Continuos Power</i> ou <i>Base Load</i> , em inglês)
CO ₂	dióxido de carbono
CO ₂ -eq	dióxido de carbono equivalente
Cofins	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
GHG	Protocolo de Gases de Efeito Estufa (<i>The Greenhouse Gas Protocol</i> , em inglês)
GWP	Potencial de Aquecimento Global (<i>Global Warming Potencial</i> , em inglês)
H ₂	hidrogênio
H ₂ O	molécula de água
H ₂ S	gás sulfídrico
HFCs	hidrofluorcarbonos
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
LCA	avaliação do ciclo de vida (<i>life cycle assessment</i> , em inglês)
MCI	motor de combustão interna
MPPT	seguidor do ponto de máxima potência (<i>Maximum Power Point Tracker</i> , em inglês)
N ₂	nitrogênio
N ₂ O	óxido nitroso
NH ₃	amoníaco ou amônia
O ₂	oxigênio
PCI	Poder Calorífico Inferior
PFCs	perfluorcarbonos
PIS	Programa de Integração Social
PVC	policloreto de vinila
Selic	Sistema Especial de Liquidação e de Custódia
SF ₆	hexafluoreto de enxofre
SHGE	Sistema Híbrido Gerador de Eletricidade
SIN	Sistema Integrado Nacional

LISTA DE SÍMBOLOS

V	tensão elétrica (diferença de potencial elétrica)	[V]
I	corrente elétrica	[A]
I_{SC}	corrente de curto-circuito	[A]
V_{oc}	tensão de circuito aberto	[V]
PMP	ponto de maior potência	[W]
VMP	tensão do ponto de maior potência	[V]
IMP	corrente do ponto de maior potência	[A]
P_{nom}	potência nominal de um módulo fotovoltaico	[W]
η_{pv}	eficiência elétrica do painel fotovoltaico	[%]
E_p	energia gerada por um painel fotovoltaico	[kWh]
R_a	insolação diária média	[kWh/(m ² .dia)]
$A_{mód}$	área de um módulo fotovoltaico	[m ²]
$N_{mód}$	número de módulos fotovoltaicos	[-]
A_{total}	área total mínima necessária para locar os módulos fotovoltaicos	[m ²]
η_{el}	eficiência elétrica do conjunto motor-gerador	[%]
P_{bg}	potência elétrica produzida pela planta a biogás	[kW]
P_{comb}	potência fornecida pelo combustível	[kW]
\dot{m}_{comb}	vazão mássica de combustível (biogás)	[kg/s]
PCI_{comb}	Poder Calorífico Inferior do combustível (biogás)	[kJ/kg]
$\dot{m}_{esterco}$	fluxo mássico de esterco necessário no biodigestor	[kg/dia]
P_{fv}	potência elétrica instalada da planta fotovoltaica	[kW]
C_{ge}	custo de geração de eletricidade do SHGE	[US\$/kWh]
Inv	investimento da planta	[US\$]
f	fator de anuidade	[ano ⁻¹]
H	período de operação do SHGE	[h/ano]
P_{SHGE}	potência instalada do SHGE	[kW]
C_{man}	custo de manutenção do SHGE	[US\$/kWh]
C_{ope}	custo de operação do SHGE	[US\$/kWh]
C_{gefv}	custo de geração de eletricidade pela planta fotovoltaica	[US\$/kWh]
Inv_{fv}	investimento da planta fotovoltaica	[US\$]

H_{fv}	período de operação da planta fotovoltaica	[h/ano]
$C_{man_{fv}}$	custo de manutenção da planta fotovoltaica	[US\$/kWh]
$C_{ope_{fv}}$	custo de operação da planta fotovoltaica	[US\$/kWh]
$C_{ge_{bg}}$	custo de geração de eletricidade pela planta a biogás	[US\$/kWh]
Inv_{bg}	investimento da planta a biogás	[US\$]
H_{fv}	período de operação da planta a biogás	[h/ano]
$C_{man_{bg}}$	custo de manutenção da planta a biogás	[US\$/kWh]
$C_{ope_{bg}}$	custo de operação da planta a biogás	[US\$/kWh]
R_{anual}	retorno anual de investimento da planta geradora	[US\$/ano]
P_{planta}	potência instalada da planta geradora	[kW]
H_{planta}	período de operação da planta geradora	[h/ano]
C_{elet}	custo médio de compra da energia elétrica pela concessionária	[US\$/kWh]
$C_{ge_{planta}}$	custo de geração de eletricidade da planta em questão	[US\$/kWh]
Inv_{mg}	investimento do grupo motor-gerador a biogás	[US\$]
Inv_{bd}	investimento do biodigestor	[US\$]
C_{fv}	custo de investimento dos painéis fotovoltaicos	[US\$]
C_i	custo de investimento do inversor	[US\$]
C_{bd}	custo específico do biodigestor	[US\$/m ³]
V_{bd}	volume do biodigestor	[m ³]
k	número de anos	[ano]
r	taxa anual de juros	[%]
$C_{man_{mg}}$	custo de manutenção do conjunto motor-gerador	[US\$/kWh]
$C_{man_{bd}}$	custo de manutenção do biodigestor	[US\$/kWh]
E_{bg}	energia elétrica média produzida por dia pela planta a biogás	[kWh/dia]
E_{fv}	energia elétrica média produzida por dia pela planta fotovoltaica	[kWh/dia]
$P_{sec(cons)}$	potência elétrica consumida por equipamentos secundários	[kW]
η_{inv}	Rendimento do inversor	[%]
PCI_{gn}	Poder Calorífico Inferior do gás natural	[kJ/kg]

SUMÁRIO

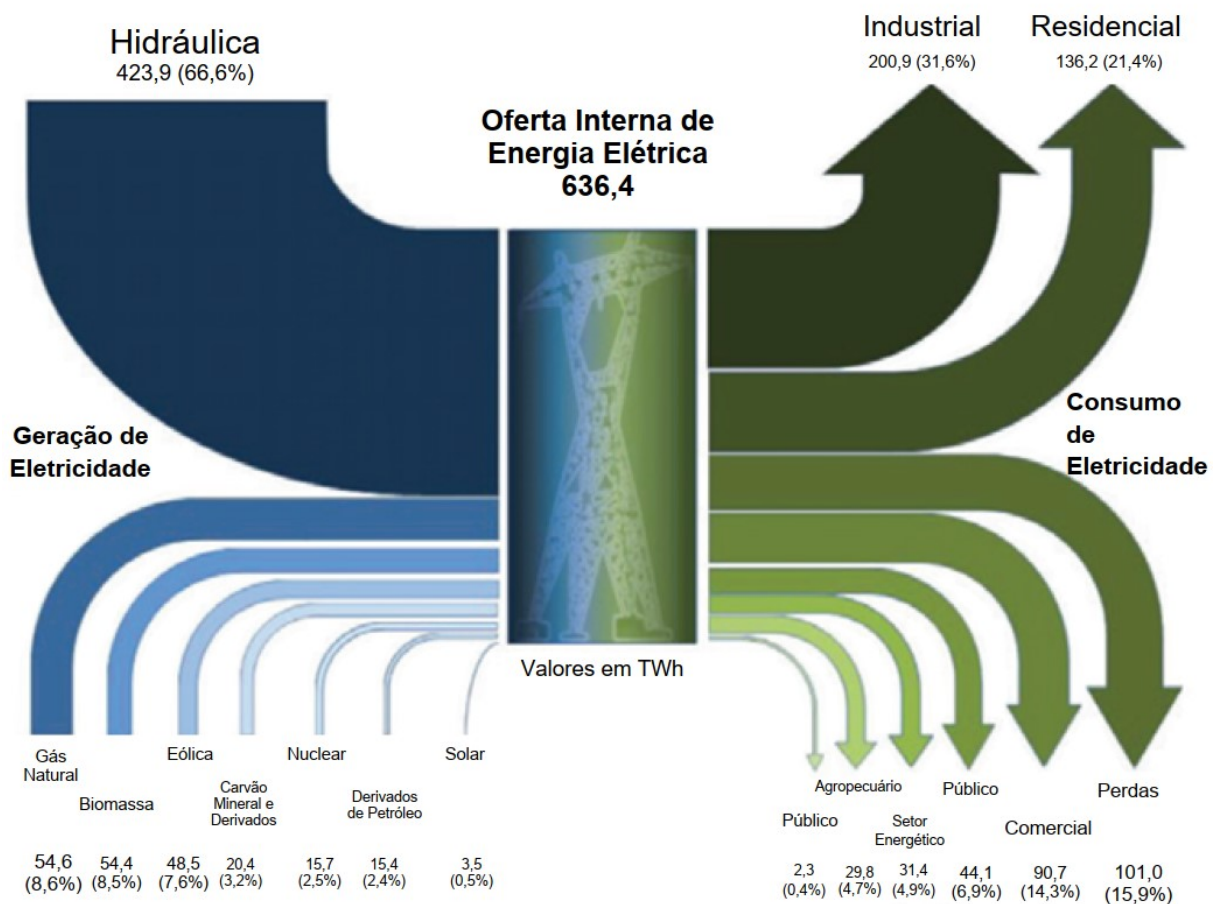
1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	18
2.1.1	Sistema fotovoltaico autônomo	18
2.1.2	Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica	19
2.1.3	Módulo solar	20
2.2	ELETRICIDADE POR BIOGÁS	23
2.2.1	O biogás	24
2.2.2	Biodigestor	25
2.2.3	Conjunto motor-gerador	29
3	DIMENSIONAMENTO	31
3.1	CONJUNTO MOTOR-GERADOR.....	31
3.2	MÓDULO FOTOVOLTAICO	32
4	METODOLOGIA	36
4.1	ANÁLISE ENERGÉTICA DO SHGE.....	36
4.1.1	Planta a biogás	36
4.1.2	Planta fotovoltaica	37
4.2	ANÁLISE ECONÔMICA DO SHGE.....	37
4.2.1	Investimento da planta	39
4.2.1.1	Planta fotovoltaica.....	39
4.2.1.2	Planta a biogás.....	41
4.2.2	Fator de anuidade	43
4.2.3	Custo de manutenção	43
4.2.4	Custo de operação	44
4.3	ANÁLISE AMBIENTAL DO SHGE.....	46
4.3.1	Avaliação do ciclo de vida (LCA)	47
4.3.1.1	Obtenção de matéria prima e fabricação	47
4.3.1.2	Construção.....	47
4.3.1.3	Operação e manutenção.....	48
4.3.1.4	Descomissionamento da planta	48
5	RESULTADOS	49
5.1	ANÁLISE ENERGÉTICA DO SHGE.....	49

5.1.1	Planta a biogás	49
5.1.2	Planta fotovoltaica	50
5.2	ANÁLISE ECONÔMICA DO SHGE	51
5.2.1	Planta a biogás	52
5.2.2	Planta fotovoltaica	54
5.3	ANÁLISE AMBIENTAL DO SHGE	55
5.3.1	Planta a biogás	55
5.3.2	Planta fotovoltaica	56
6	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	61
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	67
	ANEXO A – Ficha técnica do painel fotovoltaico <i>Canadian Solar MAXPOWER</i>	
	CS6U-330P	68
	ANEXO B – Ficha técnica do grupo motor-gerador <i>MWM MGG80.60</i>	70

1 INTRODUÇÃO

O Brasil, país com uma alta demanda energética, é uma nação que possui uma matriz de geração de energia predominantemente renovável, como pode-se ver na Figura 1. Porém, trata-se de uma matriz muito dependente do regime hidráulico, uma vez que 66,6% de sua produção é baseada em hidrelétricas. Em contraposição, pode-se perceber baixa participação da energia solar e do biogás (parcela do item “Biomassa”, uma vez que se trata de um de seus derivados) – temas de estudo neste trabalho.

Figura 1 – Fluxo de Energia Elétrica – BEN 2019 (ano base 2018)

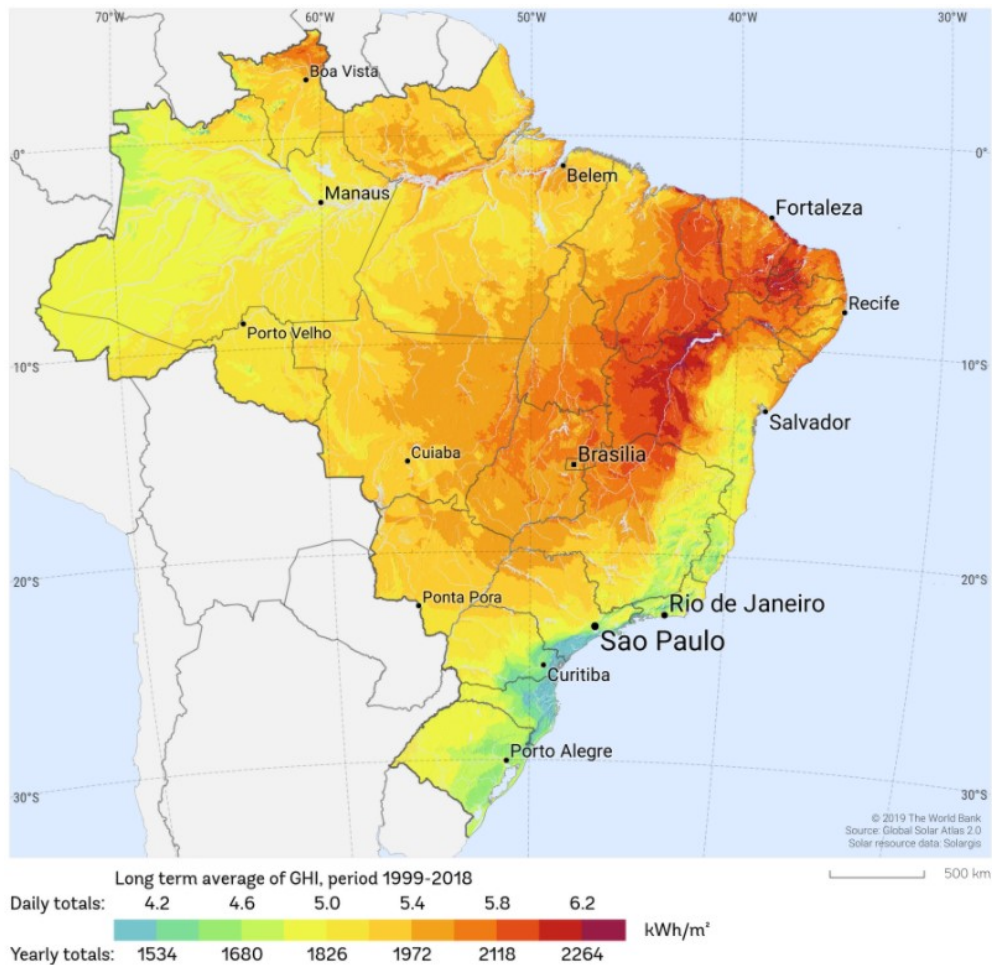


Fonte: Adaptado de Brasil (2019).

Este trabalho é justificado, principalmente, pelo desenvolvimento sustentável que a sociedade atual deveria ter. A utilização de fontes renováveis em larga escala permitiria que a humanidade reduzisse a geração de eletricidade não renovável e evitaria a produção de usinas hidrelétricas – que, mesmo considerada energia limpa, há de se desmatar grandes áreas para sua implementação (o que pode afetar fauna e flora da região). Estes fatos, somados à não

emissão direta do biogás na atmosfera, tornar-se-ia ferramenta para o combate à emissão de gases de efeito estufa e, conseqüentemente, artifício mitigador do aquecimento global (OLIVEIRA, 2009; RASI, VEIJANEN e RINTALA, 2007) – pois, ainda que sua combustão resulte em dióxido de carbono, este gás já estaria em seu ciclo (não seria adicionado nenhum poluente na atmosfera), ao contrário de combustíveis derivados do petróleo, cuja queima adicionaria mais CO₂ na atmosfera. Ademais, o Brasil, como mostrado na Figura 2, é privilegiado em níveis de radiação solar em relação às nações desenvolvidas devido a sua dimensão e localização geográfica e, portanto, tem um grande potencial para energia solar, de acordo com Machado e Miranda (2015). Fazendo-se um comparativo entre Brasil e Alemanha – esta, uma das nações que mais utiliza o conceito fotovoltaico – tem-se que o nível de radiação mais baixo brasileiro (1642-1715 kWh/m²/ano) é superior ao máximo alemão (1150-1200 kWh/m²/ano), isto mostra o grande potencial que se tem no Brasil para implementações fotovoltaicas (SALAMONI e RÜTHER, 2007; NASCIMENTO, 2017).

Figura 2 – Mapa de irradiância solar do Brasil



Fonte: Adaptado de Global Solar Atlas 2.0 (2019).

Dessa forma, o objetivo deste trabalho engloba a aplicação de um Sistema Híbrido Gerador de Eletricidade (SHGE) em uma indústria de laticínios (uma vez que nesta há grande disposição de dejetos bovinos e altas necessidades energéticas devido a refrigeradores) localizada no nordeste brasileiro (uma vez que possui altos índices de irradiância solar, como mostra a Figura 2), com seu devido dimensionamento analisando energética, econômica e ambientalmente o sistema proposto através da estrutura detalhada a seguir.

- Capítulo 1: consiste na presente introdução onde tem-se o problema posto, justificativa e objetivo deste trabalho.
- Capítulo 2: será apresentada uma revisão bibliográfica para compreensão de alguns conceitos utilizados aqui, relacionados ao funcionamento de plantas solar-biogás de geração de energia elétrica e equipamentos necessários no SHGE.
- Capítulo 3: apresenta a escolha dos equipamentos do SHGE assim como o dimensionamento dos mesmos.
- Capítulo 4: este capítulo descreve toda a teoria, fórmulas e conceitos utilizados no trabalho aplicadas ao SHGE proposto, com foco na análise energética, econômica e ambiental.
- Capítulo 5: aqui são apresentados os resultados da análise energética tanto para a planta a biogás quanto para a planta fotovoltaica; os resultados da análise econômica primeiro para o SHGE como um todo e, após, para as plantas de forma individual; e os resultados obtidos da análise ambiental para ambos os sistemas solar-biogás.
- Capítulo 6: consiste na conclusão final deste trabalho indicando a viabilidade energética, econômica e ambiental do SHGE, além de recomendações de pesquisas futuras relacionadas a este trabalho ou tema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

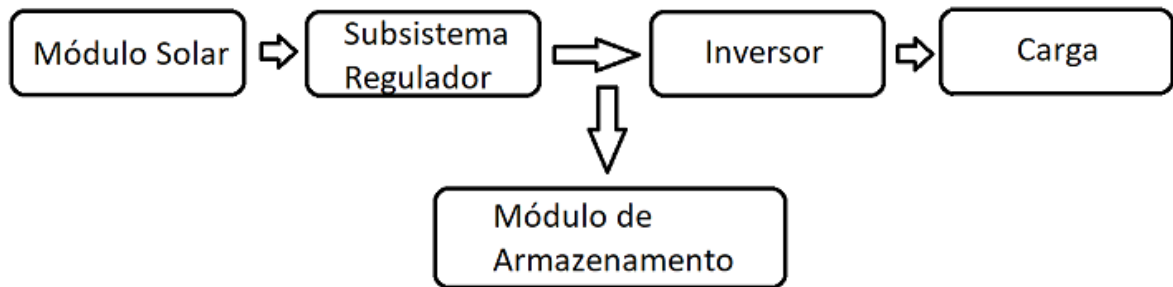
A eletricidade obtida através da energia solar é feita baseada no efeito fotovoltaico descoberto por Becquerel e explicada por Albert Einstein que, ao incidir luz em alguns materiais semicondutores, os elétrons de valência do material recebem uma certa quantidade de energia dos fótons. Essa energia faz com que esses sejam liberados formando então uma corrente elétrica (MORAES JUNIOR e BAGNARA, 2016; GÜÉMEZ e FIOLEAIS, 2018). Dessa forma, um sistema de geração de energia elétrica fotovoltaica pode ser tanto autônomo, *off-grid*, quanto conectado à rede, *on-grid* (RUIZ, 2016).

2.1.1 Sistema fotovoltaico autônomo

Um sistema de geração de energia fotovoltaica completamente autônomo – ou sistema *off-grid* – é baseado nos seguintes módulos, esquematizados na Figura 3, de acordo com Avilés e Souza (2011) e Ruiz (2016).

- Módulo de painéis solares (módulo solar): composto pelas células fotovoltaicas associadas entre si que convertem a luz em energia elétrica.
- Subsistema regulador: formado por um controlador de carga para proteger o sistema de armazenamento e regular a energia transmitida.
- Módulo de armazenamento: acumula energia elétrica em forma química, consiste basicamente em baterias para reservar a energia gerada pelo módulo de painéis solares e controlada pelo subsistema regulador.
- Módulo inversor: converte eletricidade de corrente contínua em alternada para alimentação de equipamentos residenciais.

Figura 3 – Esquema de um sistema de geração de energia fotovoltaica autônomo

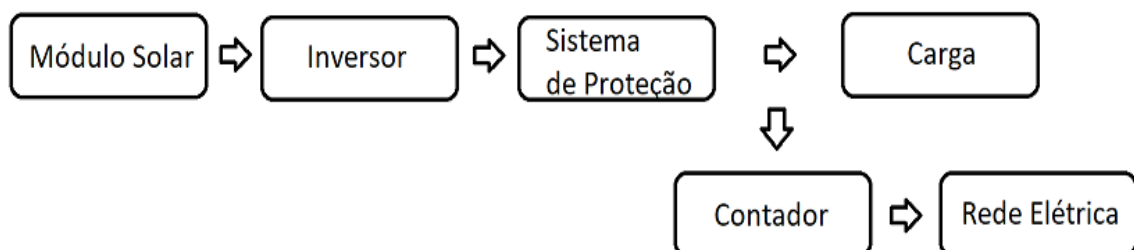


Fonte: Autoria própria.

2.1.2 Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica

Também existe a possibilidade de conectar o sistema de geração de eletricidade fotovoltaica à rede de distribuição elétrica – também chamado de sistema *on-grid* – assim, o módulo de armazenamento (ou as baterias), e consequentemente o subsistema regulador, tornam-se desnecessários (AVILÉS e SOUZA, 2011; RUIZ, 2016). Dessa forma tem-se um sistema fotovoltaico mais simples esquematizado na Figura 4 que, ao não ter armazenamento, exige aplicações com consumo imediato de energia ou que a distribuidora de rede compense a eletricidade injetada para sanar eventuais excessos produzidos ou demandas extras que podem ser necessárias – no Brasil, tal compensação é realizada por um sistema de créditos e é regularizada pela resolução da Aneel 482/2012 e atualizada em 2017 (ANEEL, 2012). Dessa forma, faz-se necessário um contador de eletricidade bidirecional (ou dois unidirecionais) entre o sistema gerador e a rede elétrica além de um sistema de proteção para evitar interrupções no abastecimento (AVILÉS e SOUZA, 2011).

Figura 4 – Esquema de um sistema de geração de energia fotovoltaica conectado à rede elétrica



Fonte: Autoria própria.

2.1.3 Módulo solar

O módulo solar é o componente do sistema que corresponde ao material semicondutor, o qual é responsável pelo Efeito Fotoelétrico que, ao incidir uma luz neste, uma corrente elétrica contínua é gerada. Dessa forma, o módulo ou placa solar é constituída por várias células unitárias correspondentes de diferentes materiais semicondutores ou meios de fabricação, os mais utilizados são os que provém do silício (COELHO e SERRA, 2018). Essas células são relacionadas em série e/ou paralelo definidas a partir da voltagem e amperagem desejada. Assim, para uma ligação em série se conecta o terminal positivo de uma célula com o terminal negativo de outra e, para uma mesma condição, as equações (1) e (2) mostram como a tensão V e a corrente I se comportam. Ou seja, a tensão V de cada célula será somada enquanto que, a corrente I será mantida (PINHO e GALDINO, 2014).

$$V = V1 + V2 + V3 + \dots + Vn \quad (1)$$

$$I = I1 = I2 = I3 = \dots = In \quad (2)$$

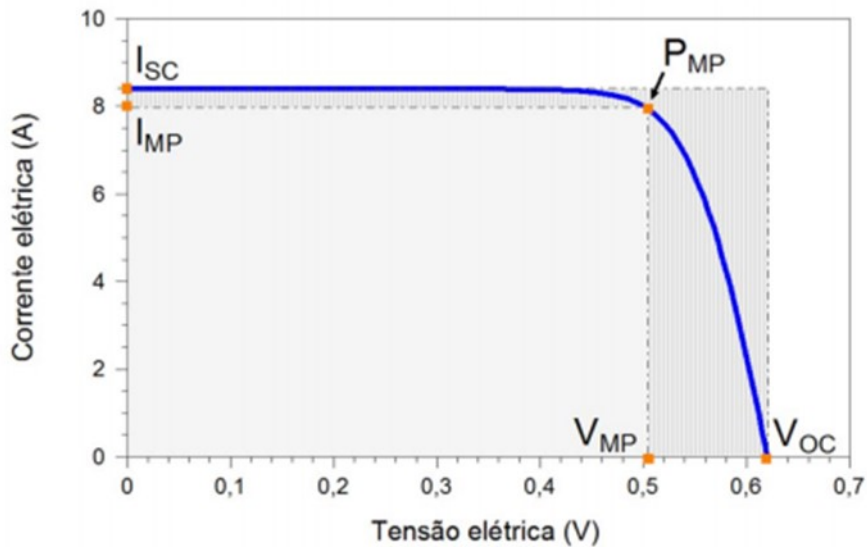
Já para uma ligação em paralelo, conecta-se os terminais positivos de cada célula e, separadamente, os negativos também. Dessa forma, as equações (3) e (4) definem quais serão a tensão V e a corrente I obtidas nesta associação em que, a tensão será constante e a corrente será somada (PINHO e GALDINO, 2014).

$$V = V1 = V2 = V3 = \dots = Vn \quad (3)$$

$$I = I1 + I2 + I3 + \dots + In \quad (4)$$

Para entender melhor o funcionamento de uma célula fotovoltaica de silício, tem-se como curva típica o gráfico $I \times V$ mostrado na Figura 5 em que, I_{sc} é a corrente de curto-circuito, V_{oc} tensão de circuito aberto e PMP corresponde ao ponto de maior potência na célula – com seus respectivos valores de corrente IMP e tensão VMP de máxima potência (PINHO e GALDINO, 2014). Sendo que o PMP pode ser encontrado através da equação (5) (AVILÉS e SOUZA, 2011).

Figura 5 – Gráfico $I \times V$ (corrente elétrica em função da tensão) de uma célula de silício em condições-padrões de ensaio



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

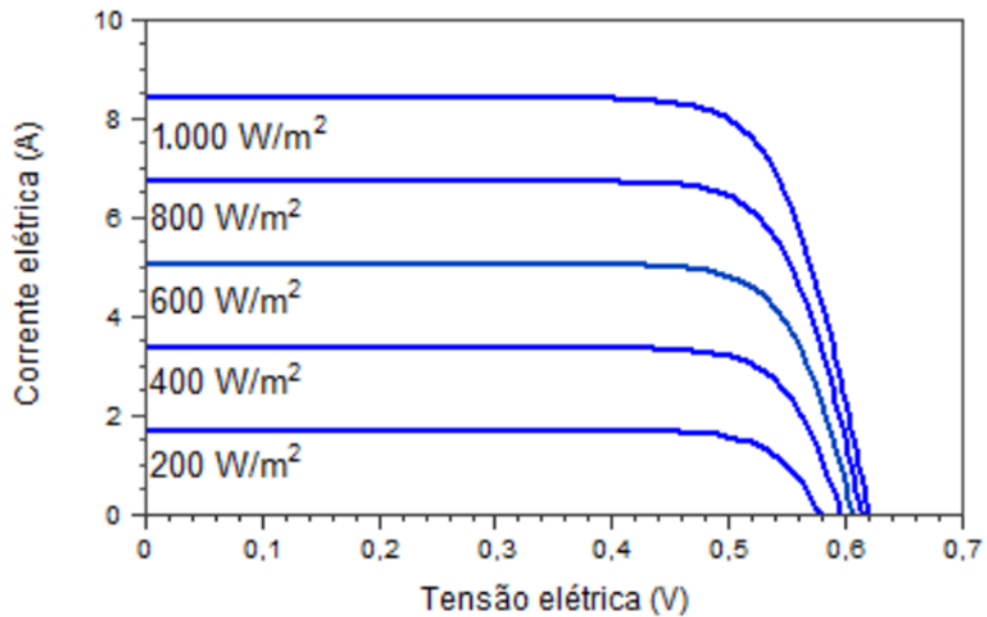
$$PMP = VMP \times IMP \quad (5)$$

Para garantir uma operação fotovoltaica mais próxima ao ponto de máxima potência é possível, também, a utilização de um controlador de carga com MPPT (seguidor do ponto de máxima potência, ou *Maximum Power Point Tracker* em inglês) – equipamento que otimiza a geração de energia elétrica ao operar o sistema mais próximo do ponto ótimo de potência (ROBERTS, 2016).

Assim, o gráfico típico $I \times V$ de uma célula solar pode variar – e, conseqüentemente, a potência máxima a ser obtida também – de acordo com o meio ambiente em que a célula solar se encontra.

- **Irradiância solar:** influencia diretamente na corrente elétrica em que, quanto maior a irradiância solar, maior será a corrente e a potência, de acordo com a Figura 6. Dessa forma, deve-se posicionar a placa solar de forma que ela permaneça o mais perto da perpendicularidade ao sol para aumentar a irradiância no módulo (PINHO e GALDINO, 2014) – ou seja, ela deve possuir uma inclinação cujo ângulo deve corresponder à latitude do lugar além de estar apontada para o norte verdadeiro (e não o magnético, apontado pela bússola).

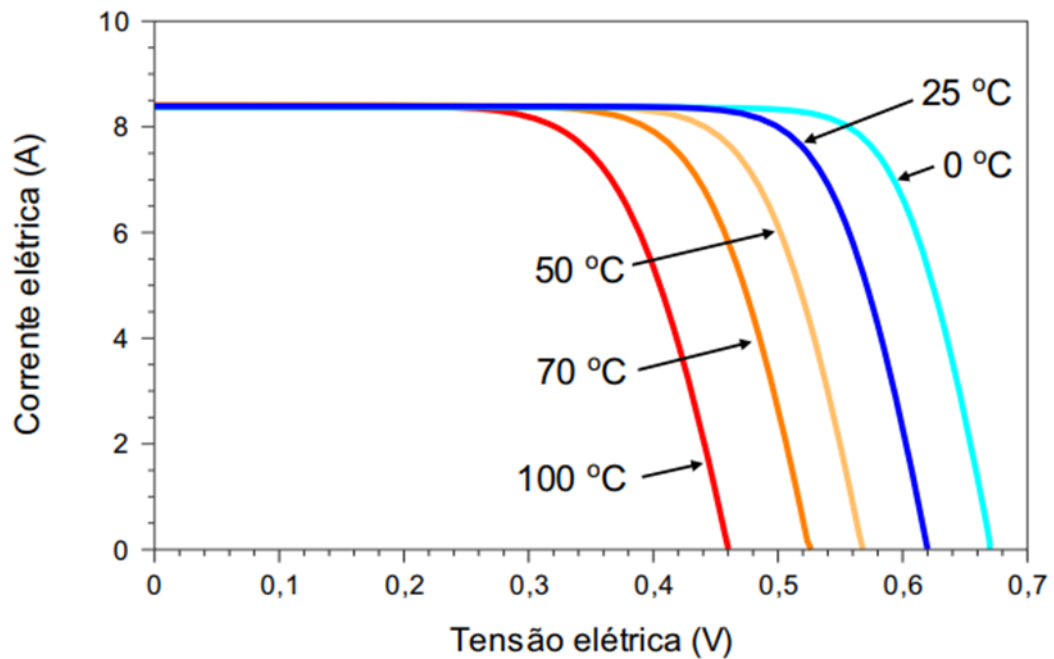
Figura 6 – Gráfico $I \times V$ (corrente elétrica em função da tensão) de uma célula de silício cristalino a 25°C variando a irradiância



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

- Temperatura: possui influência direta na tensão onde, de acordo com a Figura 7, tem-se que a eficiência da célula fotovoltaica cai com o aumento da temperatura (devido a uma queda da tensão ou diferença de potencial gerada). Dessa forma, torna-se interessante o posicionamento das placas fotovoltaicas em lugares com grande ventilação (mantendo a mesma localização, quanto mais alto mais ventilação será obtida) para manter uma menor temperatura e assim, maior eficiência energética.

Figura 7 – Gráfico $I \times V$ (corrente elétrica em função da tensão) de uma célula de silício cristalino variando a temperatura

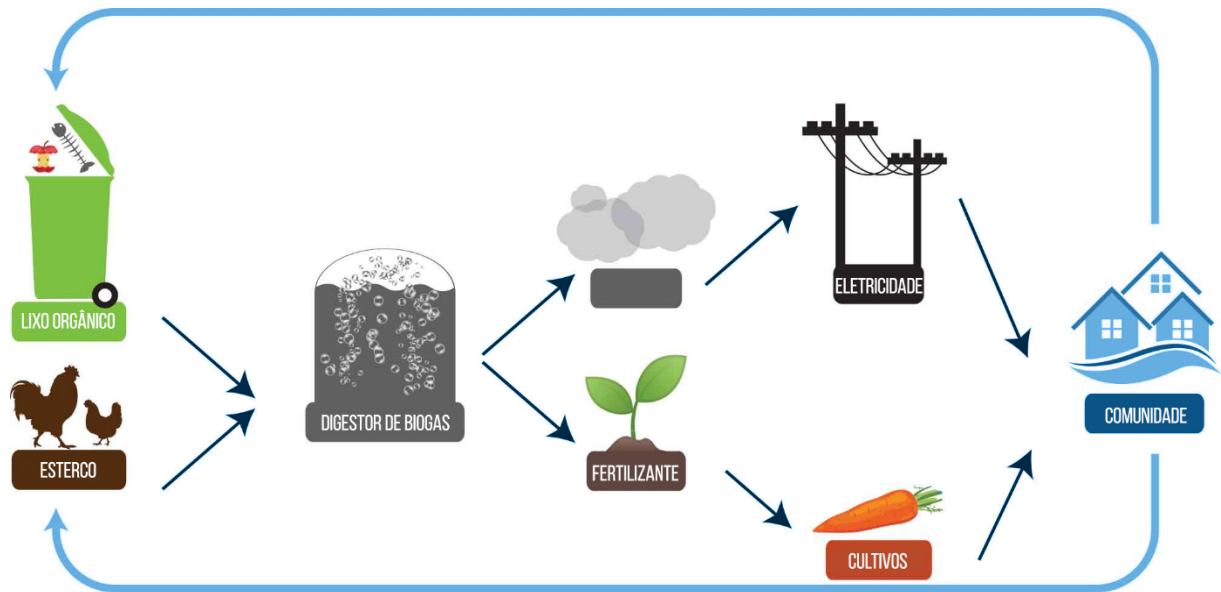


Fonte: Pinho e Galdino (2014).

2.2 ELETRICIDADE POR BIOGÁS

Para uma produção de bioenergia através do biogás, inicia-se com a coleta da matéria orgânica (esta, pode ser restos alimentícios, dejetos suínos, bovinos ou outra) inserindo-a em um biodigestor – responsável pela produção do biogás a partir de uma digestão anaeróbica. Dessa forma, o biogás pode ser queimado em um grupo motor-gerador, abastecendo assim demandas elétricas de comunidades ou indústrias. Do biodigestor, além do biogás, também produz-se fertilizantes que podem ser utilizados em cultivos na agricultura. Estes processos estão resumidos através do fluxograma mostrado na Figura 8, e explicados mais detalhadamente nos próximos itens.

Figura 8 – Esquema do ciclo energético do biogás



Fonte: Adaptado de Biogas Digester Infographic (2020).

2.2.1 O biogás

Grande referência em energia renovável atualmente, o biogás (ou gás dos pântanos, como era conhecido logo depois de sua descoberta) é uma mistura de gases – os quais são resultantes de uma fermentação de matéria orgânica por bactérias anaeróbicas – e sua composição, bem como seu poder calorífico – diretamente relacionado com a quantidade de metano (CH_4) na mistura – varia de acordo com o digestor e com o tipo de substrato (AB-DESHAHIAN et al., 2016; BELAISSAOUI et al., 2016; CETESB, 2018). Já sua composição, de forma básica, gira em torno das proporções mostradas na Tabela 1, de acordo com Cetesb (2018).

Tabela 1 – Composição mais usual do biogás

Elemento Presente	Porcentagem (volumétrica)
Metano (CH₄)	50% a 70%
Dióxido De Carbono (CO₂)	25% a 50%
Hidrogênio (H₂)	0% a 1%
Gás Sulfídrico (H₂S)	0% a 3%
Oxigênio (O₂)	0% a 2%
Amoníaco (NH₃)	0% a 1%
Nitrogênio (N₂)	0% a 7%

Fonte: Cetesb (2018).

Analisando a composição mostrada na Tabela 1, nota-se que há a presença de substâncias não combustíveis como o dióxido de carbono (CO₂) e nitrogênio (N₂), isso gera uma perda de eficiência no processo de queima e geração de eletricidade, ademais, também há gás sulfídrico (H₂S), o qual é responsável por um processo corrosivo indesejável, uma vez que pode diminuir tanto o rendimento quanto a vida útil dos componentes do conjunto motor gerador a ser utilizado (SUZUKI et al., 2011). Assim, os materiais a serem utilizados para transporte dos gases no conjunto motor-gerador e no biodigestor devem ser resistentes à corrosão, além de possuir um filtro entre estes para diminuir a passagem de gás sulfídrico para o motor (PASQUALINI, 2020).

Considerando o processo de formação do biogás, uma fermentação de matérias orgânicas por bactérias anaeróbicas, ele pode ser obtido através de fontes como lixos urbanos, resíduos animais (como fezes ou dejetos de abates), restos de alimentos, folhagens, aterros sanitários e outros (SILVEIRA et al. , 2012b; PEDOTT e AGUIAR, 2014; COLOMBAROLI, 2015).

2.2.2 Biodigestor

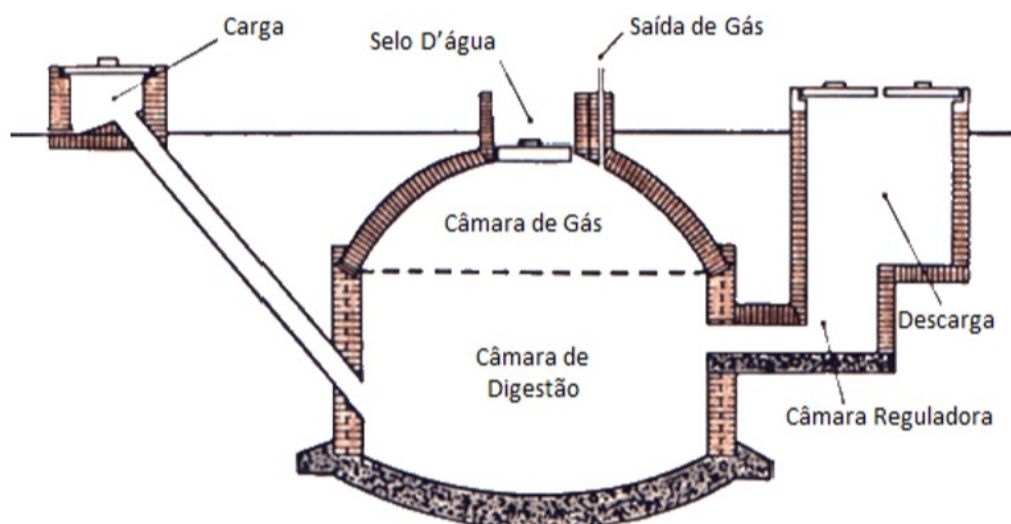
A fim de obter biogás, é necessário a utilização de biodigestores – equipamentos que, através de um processo bioquímico de digestão anaeróbica por bactérias ali presentes, transformam dejetos orgânicos em biofertilizantes e produtos gasosos, dentre estes, o biogás (FREITAS BUENO, 2010; COLOMBAROLI, 2015). Sendo assim, de acordo com Alcócer et al. (2020), existem duas categorias principais – biodigestor de batelada e biodigestor contínuo – que depois são subdivididas em seus respectivos tipos.

- Batelada: processo realizado em um tanque fechado de modo descontínuo (uma carga de matéria orgânica é posta, produz uma certa quantidade de biogás e, assim, refaz-se este procedimento quantas vezes forem necessárias ao longo da vida útil do equipamento).

- Contínuo: procedimento com cargas de matéria orgânica postas periodicamente com formação contínua de biogás.

O primeiro tipo a ser analisado é o modelo contínuo chinês, mostrado na Figura 9, que consiste em um depósito de carga e outro de descarga interligados entre si pela “Câmara de Digestão”. Assim, o biogás é produzido e acumulado nesta, sendo bloqueado por uma tampa superior pressionada por uma coluna de água (“Selo D’água”) e pela própria “Saída de Gás” (tubulação ligando o meio externo com a “Câmara de Gás”) (ALCÓCER, 2020; COLOMBAROLI, 2015). Ele é construído quase inteiramente por alvenaria e posto em sua maioria embaixo da terra, deixando expostas apenas as ligações de onde são realizadas as cargas, descargas, saída de gás e a tampa com o “Selo D’água”, isso para manter ao máximo o biodigestor impermeável para não cair sua produtividade com possíveis vazamentos de fluidos (ALCÓCER et al., 2020; BARREIRA, 2011; COLOMBAROLI, 2015).

Figura 9 – Biodigestor contínuo de modelo chinês

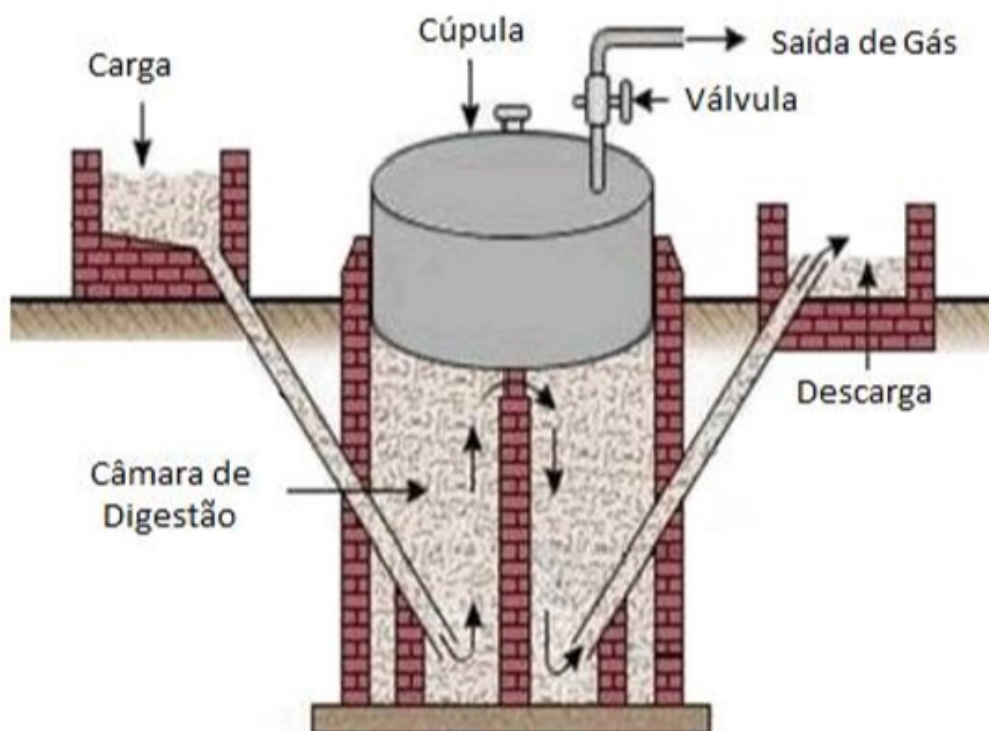


Fonte: Colombaroli (2015).

Já o biodigestor de modelo indiano (mostrado na Figura 10), também contínuo, assemelhasse com o chinês uma vez que possui câmaras de carga, descarga e digestão. Porém, sua principal e mais significativa diferença consiste em sua tampa superior que, além de ser

de metal, ela é móvel. Dessa forma, o seu peso próprio pressiona o biogás formado para a saída de gás e a matéria orgânica já fermentada para a descarga, isso resulta em uma maior velocidade de saída do biogás. Porém, seu isolamento térmico pode ser comprometido devido ao material metálico da cúpula que, em dias frios, pode fazer com que caia a temperatura interna do biodigestor, o que diminui sua eficiência (ALCÓCER et al., 2020; BARREIRA, 2011; COLOMBAROLI, 2015; CUNHA, 2018).

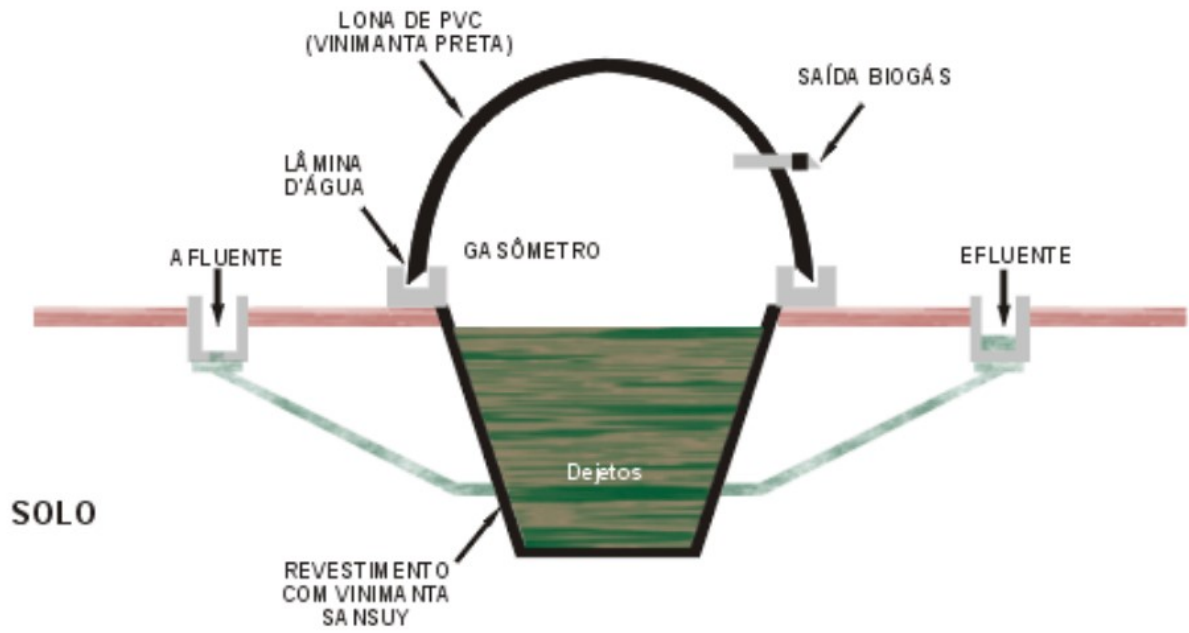
Figura 10 – Biodigestor contínuo de modelo indiano



Fonte: Colombaroli (2015).

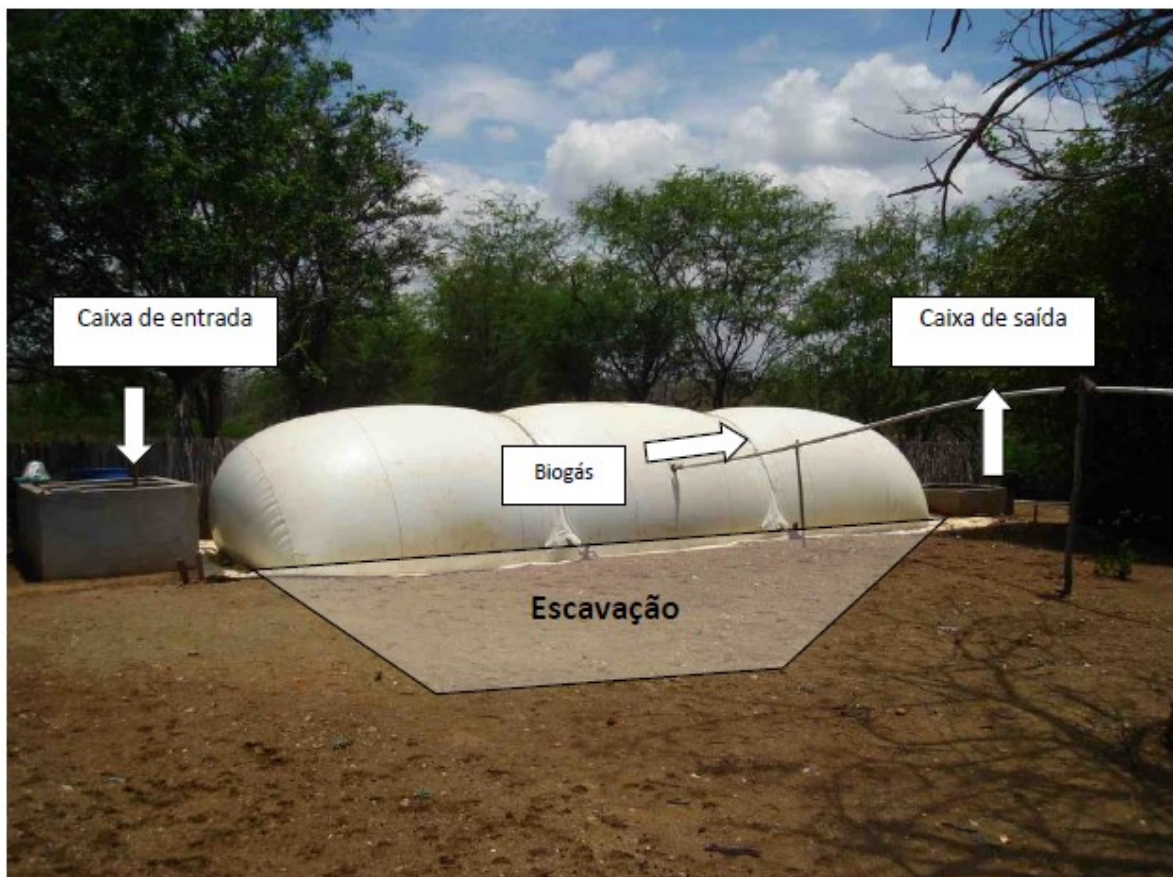
O modelo mais utilizado no Brasil devido ao seu baixo custo, fácil implementação e flexibilidade de dimensões é o canadense, esquematizado na Figura 11 e exemplificado na Figura 12 (ALCÓCER et al., 2020). Este, podendo ser contínuo ou em bateladas, consiste em uma cavidade no solo (normalmente com uma largura maior que sua profundidade, ao contrário dos modelos chinês e indiano) em que são postos os dejetos através de tubulações (ALCÓCER et al., 2020). Essa cavidade é coberta por uma manta (ou lona) maleável de PVC, que será onde o biogás será produzido e armazenado, nesta lona também haverá a saída de biogás.

Figura 11 – Biodigestor contínuo de modelo canadense



Fonte: Deganutti et al. (2002).

Figura 12 – Exemplo de um biodigestor contínuo de modelo canadense



Fonte: Quadros; Valladares; Regis (2007).

2.2.3 Conjunto motor-gerador

Para a conversão de energia química do biogás em elétrica é necessário um conjunto motor-gerador (também chamado de grupo gerador) – ou seja, o motor de combustão interna produz a energia mecânica através do combustível e, após, um gerador converte tal movimento em eletricidade. Desta forma, a energia química do combustível é transformada em trabalho pelo motor, por conseguinte, tal trabalho em eletricidade pelo gerador (SUZUKI et al., 2011). Coelho et al. (2006) ressalta a possibilidade da utilização de turbinas a gás porém, Pecora (2006) mostra que a eficiência energética para produção de eletricidade de um motor abastecido com biogás gira em torno de 30 a 34%, enquanto que de turbinas (também a biogás) atinge no máximo 30%. Assim, esta pesquisa contará com um motor de combustão interna em vez de turbinas a gás.

Existem dois tipos básicos de ciclos em motores de combustão interna, seriam eles: o Ciclo Otto e o Ciclo Diesel (SUZUKI et al., 2011; SOUZA, 2016). Por já existirem, comercialmente, Ciclos Otto adaptados ao gás natural, esse se adequa mais facilmente ao biogás – alteração baseada apenas na regulagem da entrada de ar para uma mistura mais eficiente em termos químicos e na adição de um filtro para evitar a entrada de H₂S no motor (SUZUKI et al., 2011; SOUZA, 2016).

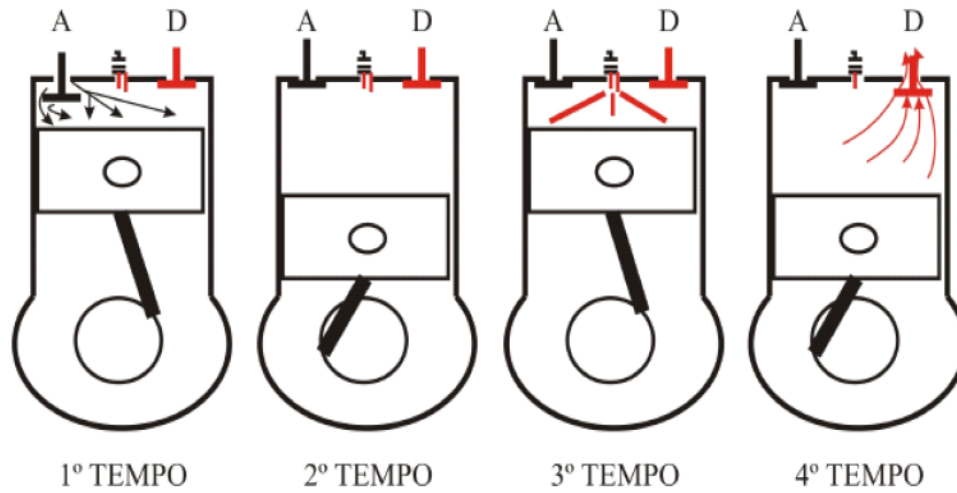
Hoje em dia também já há empresas que vendem motores de ciclo Otto e Diesel regulados ao biogás como GE, Caterpillar e Cummins (PAULINO, 2017). De acordo com Suzuki et al. (2011), motores Ciclo Diesel voltados ao biogás necessitam, também, de óleo diesel com baixo teor de enxofre para seu funcionamento ou de grandes modificações para a utilização de apenas biogás. Por esses motivos, o motor de combustão interna que esse trabalho abordará será de Ciclo Otto.

O Ciclo Otto pode ser esquematizado através da Figura 13 em que é explicitado, segundo Cardoso (2017), as quatro fases ou tempos correspondentes ao ciclo de seu funcionamento.

- 1º tempo: é a fase de admissão do combustível e comburente através da expansão do cilindro de acordo ao movimento do pistão.
- 2º tempo: tempo em que ocorre a compressão dos gases, uma vez que o volume no cilindro é reduzido.
- 3º tempo: combustão das substâncias, o que gera um aumento de pressão e consequente expansão.

- 4º tempo: etapa onde ocorre a descarga dos gases resultantes da combustão e a redução do volume do cilindro. Assim, retorna-se ao 1º tempo iniciando um novo ciclo.

Figura 13 – Esquema do funcionamento de um motor de ciclo Otto

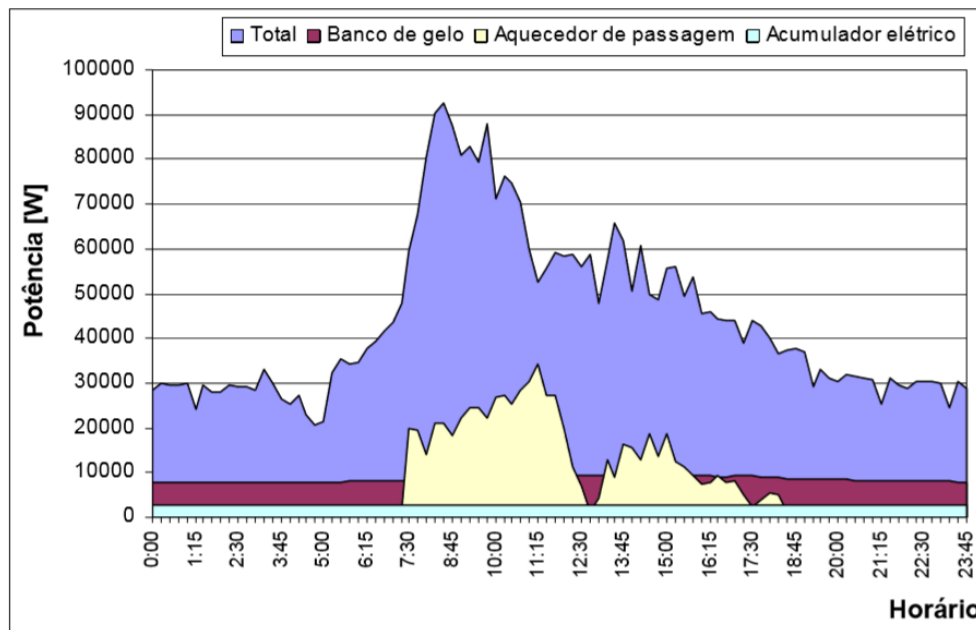


Fonte: Wildner (2006).

3 DIMENSIONAMENTO

Para o dimensionamento do SHGE, considerou-se como base o processo de laticínios descrito por Baldassin Junior et al. (2004), uma indústria de pequeno porte com uma demanda de energia elétrica média diária mostrada no gráfico da Figura 14, e gasto de 7,45 MWh em sete dias (aproximadamente 1064,29 kWh por dia).

Figura 14 – Gráfico da demanda elétrica média diária da indústria de laticínios



Fonte: Baldassin Junior et al. (2004).

Com tal demanda, deseja-se dimensionar uma configuração solar-biogás de um SHGE para uma suposta indústria de laticínios localizada no nordeste brasileiro com rede elétrica instalada – ou seja, sistema *on-grid*. Dessa forma, os excessos de energia gerados podem ser vendidos para a concessionária além da possibilidade de utilização da rede como *backup* elétrico. Assim, sendo a região nordeste brasileira em grande parte rural (grandes espaços físicos disponíveis) com uma grande média de radiação solar anual (TIBA et al., 2000), selecionou-a com o objetivo de auxiliar seu desenvolvimento.

3.1 CONJUNTO MOTOR-GERADOR

Para o conjunto motor-gerador, optou-se pelo grupo montado e desenvolvido pela companhia *MWM Geradores* devido à facilidade de implementação uma vez que estes grupos

são adaptados à gás natural e possuem um sistema eletrônico de controle de injeção automático – o que faz com que a mistura entre comburente e combustível no motor seja automaticamente calculada para variações na composição ou qualidade do gás injetado que possa ocorrer. Dessa forma, o modelo escolhido foi o Gerador *MWM MGG80.60* onde, no regime de operação COP (do inglês, *Continuous Power* ou *Base Load*) – que corresponde a uma carga constante sem limite de horas por ano – é produzida uma potência elétrica de 51 kW. As especificações mais relevantes ao presente trabalho do conjunto motor-gerador selecionado estão mostradas na Tabela 2 (a ficha técnica mais detalhada encontra-se no ANEXO B – Ficha técnica do grupo motor-gerador *MWM MGG80.60*).

Tabela 2 – Especificações técnicas do Gerador *MWM MGG50.60* (conjunto motor-gerador selecionado)

Especificação	Descrição
Potência aparente	64 kVA
Potência ativa	51 kW
Fator de Potência	0,8
Frequência	60 Hz
Tensão trifásica	220/127 380/220 440/254 Vca
Consumo de gás natural	20,3 Nm ³ /h
Taxa de compressão	12:01
Configuração do motor	4 tempos com 4 cilindros em linha
Rotação	1800 rpm

Fonte: Adaptado de MWM Geradores (2020).

Com esse motor operando 24 horas por dia, tem-se uma energia elétrica gerada de 1224 kWh (o que ultrapassa a demanda média diária de 1064,29 kWh). Dessa forma, para não sobrecarregar a demanda de biogás e equilibrar a geração de energia elétrica entre as plantas do SHGE, optou-se por mantê-lo operando 12 horas por dia, gerando 612 kWh diários.

3.2 MÓDULO FOTOVOLTAICO

Existem diversas placas fotovoltaicas no mercado, para este trabalho escolheu-se o módulo MAXPOWER (1500 V) CS6U-330P da fabricante *Canadian Solar Inc*, devido a sua disponibilidade no mercado brasileiro e sua elevada eficiência energética. Ela possui uma

potência nominal P_{nom} de 330W, eficiência η_{pv} de 16,97% e dimensões 1960 x 992 x 40 mm – correspondente a uma área aproximada de 1,94m². Seus principais parâmetros estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Especificações técnicas do módulo solar *Canadian Solar* MAXPOWER CS6U-330P (painel fotovoltaico selecionado)

Especificação	Descrição
Fabricante	<i>Canadian Solar</i>
Modelo	MAXPOWER CS6U-330P
Potência nominal máxima	330W
Eficiência	16,97%
Tipo de célula	Policristalino, 6 polegadas
Dimensões	1.960 x 992 x 40 mm
Peso	22,4 kg

Fonte: Adaptado de Canadian Solar Inc (2016).

Como mostrado no item 2.1.3 deste trabalho, nota-se que há uma variação em certos parâmetros da placa fotovoltaica de acordo com a temperatura da mesma. Neste módulo escolhido, o fabricante nos informa uma variação de -0,41% de sua potência máxima para cada grau Celsius acima da temperatura nominal de operação, além de alterações também na tensão de circuito aberto e na corrente de curto-circuito, como nos mostra Tabela 4. Outros parâmetros e curvas do módulo escolhido estão localizados no ANEXO A – Ficha técnica do painel fotovoltaico *Canadian Solar* MAXPOWER CS6U-330P deste trabalho.

Tabela 4 – Influência da temperatura no módulo fotovoltaico

Especificação	Dados
Potência máxima	-0,41%/°C
Tensão de circuito aberto	-0,31%/°C
Corrente de curto-circuito	0,053%/°C

Fonte: Adaptado de Canadian Solar Inc (2016).

Assim, para seu dimensionamento, primeiro deve-se calcular a energia gerada por um painel fotovoltaico (E_p , em kWh) através da equação (6) (LARANCI, SILVEIRA e LAMAS, 2012).

$$E_p = R_a \cdot A_p \frac{\eta_{pv}}{100} \quad (6)$$

Sendo:

R_a : insolação diária média [kWh/(m².dia)];

$A_{mód}$: área de um módulo fotovoltaico [m²];

η_{pv} : eficiência elétrica do painel fotovoltaico [%].

Para a obtenção da insolação diária média R_a do nordeste brasileiro utilizou-se o Atlas Solarimétrico do Brasil disponível por Tiba et al. (2000) onde este mostra o mapa do Brasil com valores de R_a para cada mês do ano – todos os valores de insolação adotados assim como a energia mensal média gerada pelo módulo fotovoltaico dimensionado estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores de insolação R_a adotados e energia gerada E_p

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
R_a $\left[\frac{MJ}{m^2 \cdot dia} \right]$	19,0	19,0	19,0	18,0	17,0	17,0	17,0	20,0	20,0	20,0	21,0	20,0
R_a $\left[\frac{kWh}{m^2 \cdot dia} \right]$	5,28	5,28	5,28	5,00	4,72	4,72	4,72	5,56	5,56	5,56	5,83	5,56
E_p $\left[\frac{kWh}{mód \cdot mês} \right]$	54,0	52,3	54,0	49,5	48,3	46,8	48,3	56,8	55,0	56,8	57,8	56,8

Fonte: Adaptado de Tiba et al. (2000).

Subtraindo a produção elétrica da planta a biogás, resta-se como demanda elétrica 452,29 kWh por dia ou 165.082,85 kWh por ano, energia que deverá ser suprida pelo sistema fotovoltaico. Uma vez que um módulo solar produz anualmente 636,31 kWh de eletricidade, tem-se que o número de módulos fotovoltaicos $N_{mód}$, de acordo com a equação (7), será de 260 módulos, que ocuparão uma área de 505,52 m², como mostra a equação (8).

$$N_{mód} = \frac{165082,85 \text{ kWh}}{636,31 \text{ kWh/mód}} = 259,44 \approx 260 \text{ módulos} \quad (7)$$

$$A_{total} = N_{mód} \times A_{mód} = 505,52 \text{ m}^2 \quad (8)$$

4 METODOLOGIA

4.1 ANÁLISE ENERGÉTICA DO SHGE

4.1.1 Planta a biogás

De acordo com a Tabela 2, o motor proposto possui um consumo de gás natural no regime de operação contínuo de 20,3 Nm³/h. Porém, como o sistema será operado com biogás, pode-se obter seu consumo através de uma proporção direta entre PCIs uma vez que pretende-se manter a mesma potência de funcionamento, porém, com uma certa depreciação – Xavier (2016) mostra que o desempenho de um MCI operando com biogás corresponde a 93,70% de um a gás natural.

Dessa forma, para a obtenção do rendimento elétrico da planta a biogás η_{el} , utiliza-se as equações (9) e (10) (XAVIER, 2016).

$$\eta_{el} = \frac{P_{bg}}{P_{comb}} \quad (9)$$

Sendo:

η_{el} : eficiência elétrica do conjunto motor-gerador [%];

P_{bg} : potência elétrica produzida da planta a biogás [kW];

P_{comb} : potência fornecida pelo combustível [kW].

$$P_{comb} = \dot{m}_{comb} \cdot PCI_{comb} \quad (10)$$

Sendo:

\dot{m}_{comb} : vazão mássica de combustível [kg/s];

PCI_{comb} : poder Calorífico Inferior do combustível [kJ/kg].

Tendo o biogás uma densidade próxima de 1,066 kg/m³ a 27°C como mostrado por Motta (2012) – ou seja, valor bem próximo de 1,1 kg/Nm³ encontrado por Okamura (2013) – calcula-se a quantidade de dejetos bovinos necessários $\dot{m}_{esterco}$ uma vez que, de acordo com Oliver et al. (2008), um bovino leiteiro tem como potencial uma produção de aproximadamente 0,0445 m³ de biogás por kg de esterco. Também será obtido o número

de vacas leiteiras que será necessário na indústria N_{bov} através da informação de que cada bovino de aproximadamente 450 kg gera por volta de 12 toneladas de dejetos por ano.

4.1.2 Planta fotovoltaica

Com o dimensionamento da planta solar fotovoltaica realizado para 260 módulos, calcula-se então a potência de projeto da planta fotovoltaica (potência instalada) através da equação (11), onde multiplica-se o número de módulos pela potência nominal de cada placa.

$$P_{fv} = N_{mód} \times P_{nom} \quad (11)$$

Dessa forma, a partir da Tabela 5, multiplica-se a energia produzida por painel pelo número de módulos para encontrar a produção energética fotovoltaica mensal ao longo do ano – assim, será possível prever meses onde haverá altos e baixos na produção de eletricidade.

4.2 ANÁLISE ECONÔMICA DO SHGE

Para analisar a viabilidade econômica do sistema híbrido, faz-se necessário um levantamento dos custos relacionados ao mesmo. Dessa forma, Laranci, Silveira e Lamas (2012) mostram que o custo da energia elétrica gerada por uma planta pode ser resumido através da equação (12).

$$C_{ge} = \left(\frac{Inv \cdot f}{H \cdot P_{SHGE}} \right) + C_{man} + C_{ope} \quad (12)$$

Sendo:

Inv : investimento da planta [US\$];

f : fator de anuidade [1/ano];

H : período de operação da planta [h/ano];

P_{SHGE} : potência do SHGE [kW];

C_{man} : custo de manutenção do SHGE [US\$/kWh];

C_{ope} : custo de operação do SHGE [US\$/kWh].

Para se conhecer mais profundamente a atuação econômica de cada planta (fotovoltaica e a biogás) no SHGE, cada sistema também será analisado independentemente através de uma adaptação da equação (12), sendo a equação (13) correspondente ao custo de geração de eletricidade pelo sistema fotovoltaico e a equação (14) ao custo para a planta à biogás (CAMPOS, 2019).

$$C_{ge_{fv}} = \left(\frac{Inv.f}{H.P} \right)_{fv} + C_{man_{fv}} + C_{ope_{fv}} \quad (13)$$

$$C_{ge_{bg}} = \left(\frac{Inv.f}{H.P} \right)_{bg} + C_{man_{bg}} + C_{ope_{bg}} \quad (14)$$

Com tal custo determinado, faz-se necessário também conhecer o tempo de retorno de investimento – ou *payback* – para saber se tal tempo estará dentro da vida útil da planta.

A vida útil da planta fotovoltaica é de 25 anos de acordo com o fabricante *Canadian Solar Inc* (2016, mostrado no ANEXO A – Ficha técnica do painel fotovoltaico *Canadian Solar MAXPOWER CS6U-330P*), já a da planta a biogás, após contato com dois fornecedores, foi informado por um deles uma vida útil de 12 anos e, por outro, uma vida de 15 anos – ambos considerando regime de operação contínuo funcionando 24 horas por dia (parando apenas para manutenção) – dessa forma, como no sistema proposto seu funcionamento seria de 12 horas por dia, considerou-se que sua vida útil seria semelhante ao da planta fotovoltaica, de 25 anos.

Para determinar o tempo de retorno de investimento, faz-se uso da equação (15) determinada por Laranci, Silveira e Lamas (2002), onde define-se o rendimento anual R_{anual} esperado da planta que se deseja analisar – onde, para se obter o rendimento do SHGE, soma-se os rendimentos individuais.

$$R_{anual} = P_{planta} \cdot H_{planta} \cdot (C_{elet} - C_{ge_{planta}}) \quad (15)$$

Sendo:

R_{anual} : retorno anual de investimento da planta desejada [US\$/ano];

P_{planta} : potência instalada da planta que se deseja analisar [kW];

H_{planta} : período de operação da planta [h/ano];

C_{elet} : custo médio de compra da energia elétrica pela concessionária [US\$/kWh];

$C_{geplanta}$: custo de geração de eletricidade da planta em questão [US\$/kWh].

4.2.1 Investimento da planta

Para a determinação do investimento da planta como um todo, primeiro deve-se obter o investimento da planta fotovoltaica Inv_{fv} , que corresponde ao custo dos painéis e do inversor, do grupo motor-gerador a biogás Inv_{mg} , e do biodigestor a ser instalado para gerar o biogás Inv_{bd} , considerando seus devidos custos de instalação como mão de obra, materiais, ferramentas e obras civis que será adotado um fator adicional de 30% do investimento – valor amplamente utilizado e aceito por diversos autores para instalações geradoras de eletricidade como Antunes (1999), Ruiz (2016) e Xavier (2016).

4.2.1.1 Planta fotovoltaica

O custo de investimento dos painéis fotovoltaicos pode ser resumido pela equação (16), uma vez que ela engloba plantas de até 300 kW (CAMPOS, 2019), onde obtém-se um valor de 54.943,96 US\$.

$$C_{fv} = 1045 \cdot P_{fv}^{0,89} \quad (16)$$

Sendo:

C_{fv} : custo de investimento dos painéis fotovoltaicos [US\$];

P_{fv} : potência da planta fotovoltaica [kW].

Para cálculo do custo de investimento no inversor, fez-se uma pesquisa na literatura sobre a relação entre custos de investimento em inversores, e custo dos módulos fotovoltaicos. Os dados coletados estão mostrados na Tabela 6.

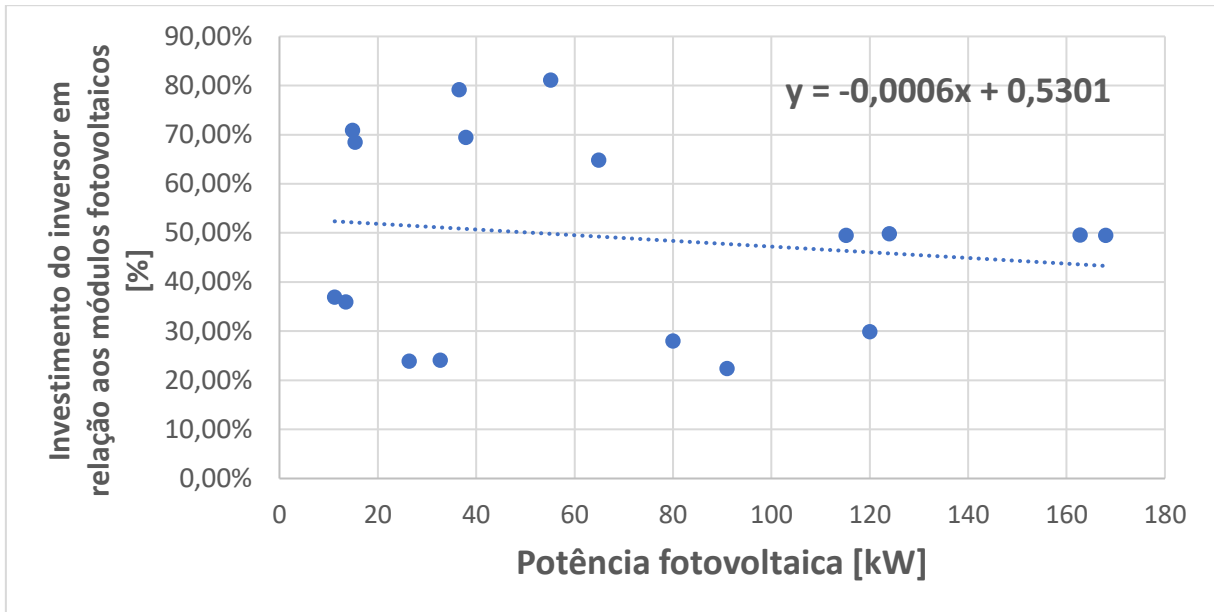
Tabela 6 – Proporção de investimentos entre inversores e módulos fotovoltaicos da literatura

Fonte	Potência fotovoltaica [kW]	Investimento no inversor	Investimento nos módulos fotovoltaicos	Investimento do inversor em relação ao fotovoltaico
Campos (2019)	11,22	3.318,04 USD	8.986,90 USD	36,92%
Campos (2019)	32,67	5.611,32 USD	23.265,32 USD	24,12%
Campos (2019)	13,53	3.819,69 USD	10.616,25 USD	35,98%
Campos (2019)	26,40	4.596,16 USD	19.246,15 USD	23,88%
Ruiz (2016)	15,37	9.260 USD	13.525,60 USD	68,46%
Ruiz (2016)	36,57	25.465 USD	32.181,60 USD	79,13%
Ruiz (2016)	55,12	39.355 USD	48.505,60 USD	81,13%
Ruiz (2016)	14,84	9.260 USD	13.059,20 USD	70,91%
Ruiz (2016)	37,90	23.150 USD	33.347,60 USD	69,42%
Ruiz (2016)	64,93	37.040 USD	57.134 USD	64,83%
Bakhshi e Sadeh (2016)	168,00	99.750 CAD	201.600 CAD	49,48%
Bakhshi e Sadeh (2016)	162,80	96.900 CAD	195.360 CAD	49,60%
Bakhshi e Sadeh (2016)	124,00	74.100 CAD	148.800 CAD	49,80%
Bakhshi e Sadeh (2016)	115,20	68.400 CAD	138.240 CAD	49,48%
Mukisa e Zamora (2019)	91,00	13.260 USD	59.150 USD	22,42%
Bakhshi-Jafarabadi, Sadeh e Dehghan (2020)	120,00	19.734 USD	66.085 USD	29,86%
Deschamps e R��ther (2019)	$\geq 80,00$	14%	50%	28,00%

Fonte: Autoria própria.

Para verificar se há alguma tendência nos valores encontrados, plotou-se em um gráfico a rela  o entre o investimento do inversor e dos módulos fotovoltaico versus a potência fotovoltaica da respectiva planta na Figura 15, juntamente com sua equa  o linear de tendência. Assim, sendo seu coeficiente angular de -0,0006 (ou seja, a rela  o estudada varia aproximadamente 0,06% para cada varia  o em kW de potência), aproxima-se este para zero e tem-se, para uma faixa de potência fotovoltaica de 11,22 kW a 168,00 kW, que o custo de investimento de inversores em uma planta fotovoltaica corresponde a aproximadamente 53,01% do custo dos módulos fotovoltaicos.

Figura 15 – Investimento do inversor em plantas fotovoltaicas em função da potência instalada



Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, calcula-se o custo de investimento do inversor do SHGE C_i proposto através da equação (17), onde obtém-se um valor de 29.125,79 US\$.

$$C_i = 0,5301 \times C_{fv} \quad (17)$$

Para a determinação dos custos totais da planta fotovoltaica como um todo, soma-se os custos relacionados ao inversor e aos módulos fotovoltaicos e multiplica-se pelo fator de 30% para sua instalação, como mencionado anteriormente. Assim, através da equação (18), obtém-se o investimento da planta fotovoltaica final de 109.290,67 US\$.

$$Inv_{fv} = (C_{fv} + C_i) \times 1,30 \quad (18)$$

4.2.1.2 Planta a biogás

Para a determinação do investimento da planta a biogás Inv_{bg} , faz-se necessário primeiramente encontrar o do grupo motor-gerador Inv_{mg} em (19) e, após, o do biodigestor Inv_{bd} em (20).

Para o investimento de equipamentos do grupo motor-gerador foi informado por dois fornecedores o custo de R\$ 137.250,00 (ou US\$ 24.734,19 , considerando a cotação do dólar de R\$ 5,549 para US\$ 1,00 no dia que foi informado o custo do grupo pelos fornecedores, 23 de Setembro de 2020) – custo bem inferior ao mapeado por Brizi et al. (2014) onde o conjunto proposto custaria em torno de US\$ 61.200,00, considerando uma potência nominal do motor de 51 kW. Para encontrar o investimento total do grupo motor-gerador considerou-se o fator de 1,30 para gastos relacionados a sua instalação como citado anteriormente, onde obteve-se um valor 32.154,45 US\$, calculado através da equação (19).

$$Inv_{mg} = C_{mg} \times 1,30 \quad (19)$$

Para o cálculo do custo inicial de implantação do biodigestor, primeiramente faz-se necessário encontrar sua capacidade volumétrica. Para isto, usou-se a proporção de 7 m³ de biodigestor para a produção de 4 m³ de biogás por dia (CALZA et al., 2015). Como o biogás possui uma densidade aproximada de 1,066 kg/m³ a 27°C (MOTTA, 2012), esta configuração do SHGE necessitará de 632,19 m³ por dia de biogás, assim, a capacidade do biodigestor deverá ser de 1106,34 m³. De acordo com Macedo (2013), o custo específico de um biodigestor canadense (escolhido para este sistema devido a sua maior disponibilidade no Brasil e menor custo) para volumes a partir de 200 m³ tende a se estabilizar em R\$ 180,00/m³ (32,44 US\$/m³, considerando a cotação do dólar de R\$ 5,549 para US\$ 1,00, do dia 23 de Setembro de 2020), considerando materiais e instalação. Dessa forma, utilizando-se a equação (20), tem-se como investimento do biodigestor um valor de 35.887,76 US\$.

$$Inv_{bd} = C_{bd} \times V_{bd} \quad (20)$$

Sendo,

C_{bd} : custo específico do biodigestor [US\$/m³];

V_{bd} : volume necessário do biodigestor [m³].

Isto resulta, como mostrado em (21), um investimento da planta a biogás de 68.042,21 US\$.

$$Inv_{bg} = Inv_{bd} + Inv_{mg} \quad (21)$$

4.2.2 Fator de anuidade

O fator de anuidade f determina um coeficiente de rendimento utilizando como base a taxa de juros adotada. Ele pode ser definido pelas equações (22) e (23) (SILVEIRA et al., 2012a).

$$f = \frac{q^k(q - 1)}{q^k - 1} \quad (22)$$

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (23)$$

Sendo:

f : fator de anuidade [1/ano];

k : número de anos [ano];

r : taxa anual de juros [%].

Nesta análise, serão adotadas as taxas de 2%, 7% e 12% ao ano uma vez que, no momento de realização desta etapa do trabalho, 2% é a taxa básica de juros Selic, 12% é aproximadamente a taxa mais barata de empréstimo encontrada em bancos para empresas, e 7% é uma taxa média a ser considerada uma vez que alguns bancos oferecem benefícios de financiamentos e empréstimos para investimentos na área de energias renováveis, como o SHGE proposto.

4.2.3 Custo de manutenção

O custo de manutenção do SHGE C_{man} corresponde a soma dos custos de manutenção da planta a biogás $C_{man_{bg}}$ e da fotovoltaica $C_{man_{fv}}$ como mostrado pela equação (24). Uma vez que Saif et al. (2010) diz que os custos de manutenção de plantas fotovoltaicas podem ser desprezíveis, pode-se resumir os custos de manutenção da planta a biogás como a soma dos respectivos custos relativos ao grupo motor-gerador $C_{man_{mg}}$ e ao biodigestor $C_{man_{bd}}$ como equacionado em (25).

$$C_{man} = C_{man_{bg}} + C_{man_{fv}} \quad (24)$$

$$C_{man_{bg}} = C_{man_{mg}} + C_{man_{bd}} \quad (25)$$

Para o custo de manutenção de grupos motor-geradores, Brizi (2014) mostra que este valor corresponde aproximadamente a 0,0130 US\$ por kWh de produção pelo próprio motor-gerador – assim, para uma análise em conjunta ao SHGE, deve-se normalizar este valor através da equação (26) para relacioná-lo não mais ao grupo motor-gerador, mas para o SHGE como um todo. Nota-se que na análise individual que também será feita, não deve-se normalizar este valor, uma vez que ele já é relativo apenas ao grupo motor-gerador.

$$C_{man_{mg}} = \frac{0,0130 \times E_{bg}}{E_{bg} + E_{fv}} \quad (26)$$

Sendo:

E_{bg} : energia elétrica média produzida por dia pela planta a biogás [kWh/dia];

E_{fv} : energia elétrica média produzida por dia pela planta fotovoltaica [kWh/dia].

Para o biodigestor, considerou-se como manutenção uma taxa de 4% ao ano do investimento realizado no mesmo equipamento (MOURA, et al., 2017).

Assim, para o SHGE como um todo tem-se um custo de manutenção de 0,01116 US\$ para cada kWh de produção neste e, para a análise individual da planta a biogás, tem-se um custo de manutenção de 0,01943 US\$ para cada kWh gerado pelo grupo motor-gerador.

4.2.4 Custo de operação

Segundo Ruiz (2016), o custo de operação C_{ope} do SHGE pode ser modelado através da equação (27) em que se considera tanto o consumo pelos equipamentos do SHGE (em grande parte devido aos inversores) quanto o custo da eletricidade local, além da potência instalada do sistema.

$$C_{ope} = \frac{P_{sec(cons)} \cdot C_{elet}}{P_{SHGE}} \quad (27)$$

Sendo:

$P_{sec(cons)}$: consumo de potência elétrica pelos equipamentos secundários do SHGE [kW];

C_{elet} : custo de eletricidade pela concessionária [US\$/kWh];
 P_{SHGE} : potência do SHGE [kW].

Para uma análise individual da planta fotovoltaica, nota-se que a equação (27) deve ser adaptada de modo que a potência da planta fotovoltaica P_{fv} substitua a potência do SHGE P_{SHGE} para se obter o custo de operação da planta fotovoltaica relativa a ela mesma $C_{ope_{fv}}$, como mostrado na equação (28).

$$C_{ope_{fv}} = \frac{P_{sec(cons)} \cdot C_{elet}}{P_{fv}} \quad (28)$$

Como o inversor é um equipamento que consumirá energia apenas da planta fotovoltaica, tem-se que o custo de operação da planta a biogás será aproximadamente zero, uma vez que existirá gastos apenas com a retirada dos dejetos na saída do biodigestor e isto será uma atividade não muito recorrente que não gastará muitas homens-horas (nota-se que a potência ativa do conjunto motor-gerador do fabricante já considera gastos internos com painéis eletrônicos e outros componentes).

De acordo com Aneel (2019) o custo de eletricidade médio no Nordeste em 2018 para demandas industriais ficou em 0,7844828 R\$/kWh. Considerando R\$ 3,5285 para cada US\$ 1,00 (média do preço do dólar estadunidense para 2018) e somando os impostos de PIS (1,65%), Cofins (7,6%) e ICMS (18% - para o estado de Ceará), tem-se um custo de eletricidade médio de 0,28694256 US\$/kWh.

Para encontrar $P_{sec(cons)}$, optou-se por resumir a potência consumida pelos equipamentos do SHGE para a potência consumida pelos inversores. Esta potência pode ser obtida a partir dos rendimentos do equipamento que, de acordo com Roberts (2016), gira em torno de 90 a 97%. Sendo assim, para este caso, adotou-se uma eficiência de 93% – arredondando de modo conservador para o primeiro valor inteiro abaixo da média. Sabendo que o inversor estará conectado apenas aos módulos fotovoltaicos (devido a necessidade de conversão de corrente contínua à alternada), tem-se que $P_{sec(cons)}$ será de aproximadamente 6 kW, calculado pela equação (29).

$$P_{sec(cons)} = (1 - \eta_{inv}) \times P_{fv} \quad (29)$$

Sendo:

η_{inv} : rendimento do inversor [%];

P_{fv} : potência total que atua sobre o inversor (ou a potência da planta fotovoltaica) [kW].

Com todos os parâmetros calculados, retorna-se à equação (27) para encontrar o custo de operação do SHGE de 0,0126 US\$/kWh, e à (28) para o mesmo custo porém, relativo apenas à planta fotovoltaica, de 0,0201 US\$/kWh.

4.3 ANÁLISE AMBIENTAL DO SHGE

Para a realização da análise ambiental do sistema proposto optou-se pela utilização de um método amplamente reconhecido na literatura que consiste em quebrar a vida do produto em determinadas etapas, incluindo processos produtivos, e analisando cada uma delas separadamente para assim, poder obter as emissões de gases de forma mais precisa – este tipo de análise costuma ser chamada de LCA, avaliação do ciclo de vida ou *life cycle assessment* em inglês (NUGENT; SOVACOOOL, 2014). Ressalta-se que esta análise ambiental proposta será baseada em estudos de gases agravantes do efeito estufa, ou seja, não será considerado outros componentes ou contaminantes químicos que podem ser liberados no meio ambiente. Para isto, será utilizado cálculos baseados em CO₂-eq (dióxido de carbono equivalente) – unidade universal de medição de potencial de aquecimento global (ou GWP, *Global Warming Potencial* em inglês), onde 1g de CO₂ é definido como 1g CO₂-eq. Os outros gases que contribuem para o aquecimento global, definidos no protocolo de Kyoto como sendo o metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hexafluoreto de enxofre (SF₆), hidrofluorcarbonos (HFCs) e perfluorcarbonos (PFCs), são trazidos para esta unidade de acordo com a sua “pegada de carbono”, como dizem muitos autores, ou quanto de dióxido de carbono equivaleria aquela quantidade deste gás na atmosfera em termos de GWP, de acordo com o documento Especificações de Verificação do Programa Brasileiro GHG Protocol (FGV e WORLD RESOURCES INSTITUTE, 2011).

Com essa quebra do ciclo de vida em etapas, facilita-se então uma análise de fatores de emissão – uma certa massa de gases (no caso a ser analisado, dióxido de carbono equivalente ou CO₂-eq) emitidos na atmosfera por quantidade de energia elétrica a ser produzida. De acordo com Brasil (2020), em 2019, o fator de emissão médio brasileiro foi de 534,1 kg CO₂-eq/MWh – ou seja, para cada MWh de energia elétrica produzida no SIN (Sistema Integrado Nacional) emitiu-se cerca de 534,1 gramas de CO₂ equivalente na atmosfera. Assim, será comparado o fator de emissão médio do sistema proposto com o do SIN.

4.3.1 Avaliação do ciclo de vida (LCA)

O LCA consiste em um interessante método pois com ele, pode-se notar os diversos impactos ambientais, diretos e indiretos, do ciclo de vida de um produto (YUE; YOU; DARLING, 2014). Porém, este exclui determinados processos com pouca contribuição, dessa forma, seu uso deve ser feito cautelosamente para não perder-se etapas importantes (RUIZ, 2016).

Para a realização do LCA, Nugent e Sovacool (2014), com base na literatura existente, sugere uma divisão em quatro fases: obtenção de matéria prima e fabricação, construção, operação e manutenção, e descomissionamento da planta.

4.3.1.1 Obtenção de matéria prima e fabricação

De acordo com Nugent e Sovacool (2014), esta é a etapa que mais demanda recursos ambientais uma vez que ela engloba a mineração ou extração de petróleo dos componentes, todos os combustíveis gastos nos processos de transformação da matéria prima ao produto final e usos de energia elétrica da rede para transformação dos itens.

Para a planta fotovoltaica deve-se considerar também componentes como vidros, silício, borrachas e plásticos para fios, metais (sendo estes estruturais ou não), inversores e outros componentes eletrônicos. Para a planta a biogás, minérios para a produção de óleos lubrificantes e metais para o motor de combustão interna, plásticos e borrachas para o biodigestor e componentes eletrônicos. E, para ambas as partes, os diversos outros itens que possam vir a ser utilizados em sua obtenção de matéria prima e fabricação que demandem quaisquer recursos ambientais direta ou indiretamente (NUGENT E SOVACOO, 2014; WHITING E AZAPAGIC, 2014).

4.3.1.2 Construção

Nesta fase deve-se considerar todas as emissões de gases agravantes do efeito estufa tanto no transporte dos produtos a localidade que se deseja instalar a planta, quanto na construção local com retroescavadeiras, soldas, e o que mais for necessário para o posicionamento, montagem, fixação dos equipamentos até o início de seu funcionamento,

considerando, também, da construção do biodigestor que exige esforços também na área de alvenaria (NUGENT E SOVACOOOL, 2014; WHITING E AZAPAGIC, 2014).

4.3.1.3 Operação e manutenção

Na fase de operação e manutenção dos painéis fotovoltaicos deve-se incluir gastos de água com sua limpeza e a substituição de algum componente caso seja necessário em sua vida útil (NUGENT; SOVACOOOL, 2014). Já na planta a biogás, tem-se a emissão de gases no transporte da retirada dos dejetos secos do biodigestor, gastos de água com limpezas (quando necessário), substituição de óleos lubrificantes do motor a combustão interna e as emissões da própria queima do biogás (WHITING E AZAPAGIC, 2014).

4.3.1.4 Descomissionamento da planta

Esta quarta e última etapa se trata do descomissionamento da planta, ou seja, desativação da mesma considerando processos de desconstrução, retirada, reciclagens e descartes. Dessa forma, difere-se das anteriores uma vez que esta tenta compensar uma parte das emissões causadas nas outras etapas (NUGENT; SOVACOOOL, 2014).

5 RESULTADOS

5.1 ANÁLISE ENERGÉTICA DO SHGE

5.1.1 Planta a biogás

Sendo o PCI_{comb} (biogás) de 18661,02 kJ/kg (XAVIER, 2016) e o PCI_{gn} (gás natural) de 46974,41 kJ/kg (COMGÁS, 2020), tem-se que o consumo de biogás será de 54,53 Nm³/h. Okamura (2013) mostra que a densidade de biogás proveniente de biodigestores (com uma proporção de metano variável entre 60 e 70%) corresponde a aproximadamente 1,1 kg/Nm³ – assim, o consumo de biogás \dot{m}_{comb} do motor proposto corresponde a 0,0167 kg/s quando em operação.

Considerando para o combustível (biogás) um PCI_{comb} de 18661,02 kJ/kg (XAVIER, 2016), obtém-se uma potência química fornecida pelo combustível P_{comb} de 311,64 kW. Assim, através da equação (9), obteve-se o rendimento elétrico da planta a biogás η_{el} de 16,36% – um valor baixo se comparado ao conjunto montado por Brizi et al. (2014), porém esperado, uma vez que optou-se por realizar os cálculos para o regime contínuo de operação, onde tem-se uma vida útil do conjunto significativamente maior em detrimento de um rendimento inferior.

Assim, como serão necessários 0,0167 kg/s ou 719,85 kg de biogás por dia (considerando 12 horas de funcionamento por dia da planta em questão), tem-se que serão necessários 15.174,81 kg de esterco por dia.

Segundo Oliver et al. (2008), uma vaca leiteira de aproximadamente 450 kg gera por volta 12 toneladas de dejetos por ano, ou seja, 32,877 kg/dia. Dessa forma, a fazenda leiteira deverá ter, no mínimo, 462 bovinos leiteiros.

Assim, a Tabela 7 resume os principais parâmetros da planta geradora a biogás.

Tabela 7 – Principais parâmetros do sistema a biogás

Parâmetro	Símbolo	Valor
Potência instalada	P_{bg}	51 kW
Energia elétrica média produzida por dia	E_{bg}	612 kWh/dia
Consumo de biogás	\dot{m}_{comb}	0,0167 kg/s
Número de bovinos leiteiros necessários	N_{bov}	462 bovinos

Fonte: Autoria própria.

5.1.2 Planta fotovoltaica

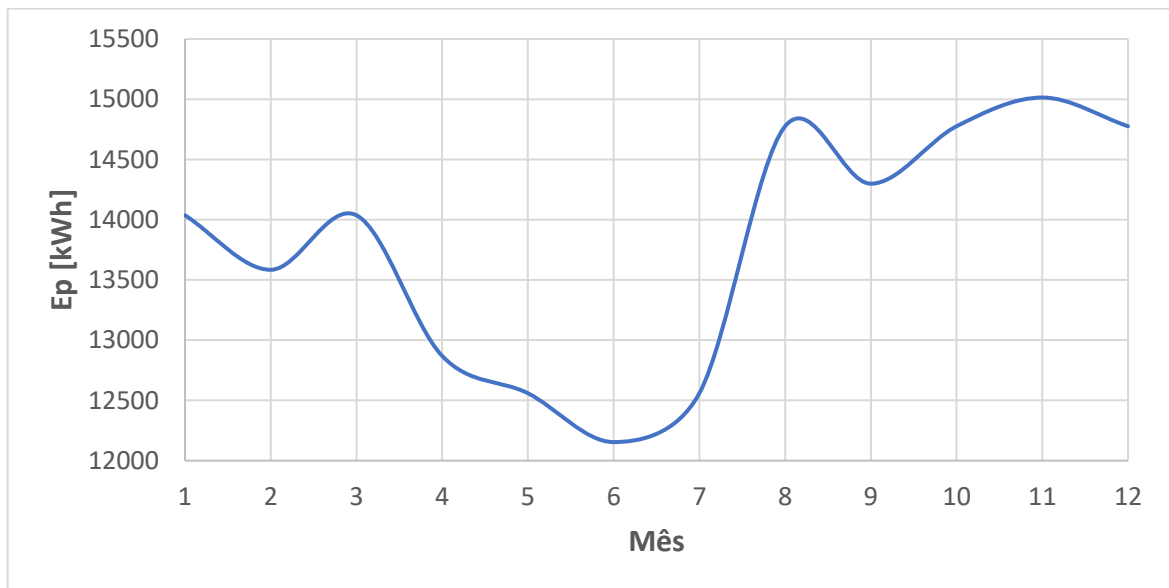
A partir de (11) tem-se como potência fotovoltaica instalada um valor de 85,80 kW. E, utilizando-se da Tabela 5, obteve-se a Tabela 8 onde plotou-se seus pontos em função dos meses na Figura 16 para uma melhor análise na produção de eletricidade.

Tabela 8 – Energia elétrica fotovoltaica gerada por mês

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
E_p $\left[\frac{kWh}{mód.mês}\right]$	54,0	52,3	54,0	49,5	48,3	46,8	48,3	56,8	55,0	56,8	57,8	56,8
E_p $\left[\frac{kWh}{mês}\right]$	14037	13584	14037	12869	12559	12154	12559	14776	14299	14776	15014	14776

Fonte: Autoria própria.

Figura 16 – Gráfico da energia fotovoltaica produzida por mês



Fonte: Autoria própria.

Através da Tabela 8 e da Figura 16 nota-se uma baixa da produção no mês de junho e uma alta em novembro, resultando em uma amplitude de 2860 kWh, o que corresponde a aproximadamente 23,53% do valor mínimo.

Assim, os principais parâmetros da análise energética relativos a planta fotovoltaica como um todo encontram-se resumidos na Tabela 9.

Tabela 9 – Principais parâmetros do sistema fotovoltaico

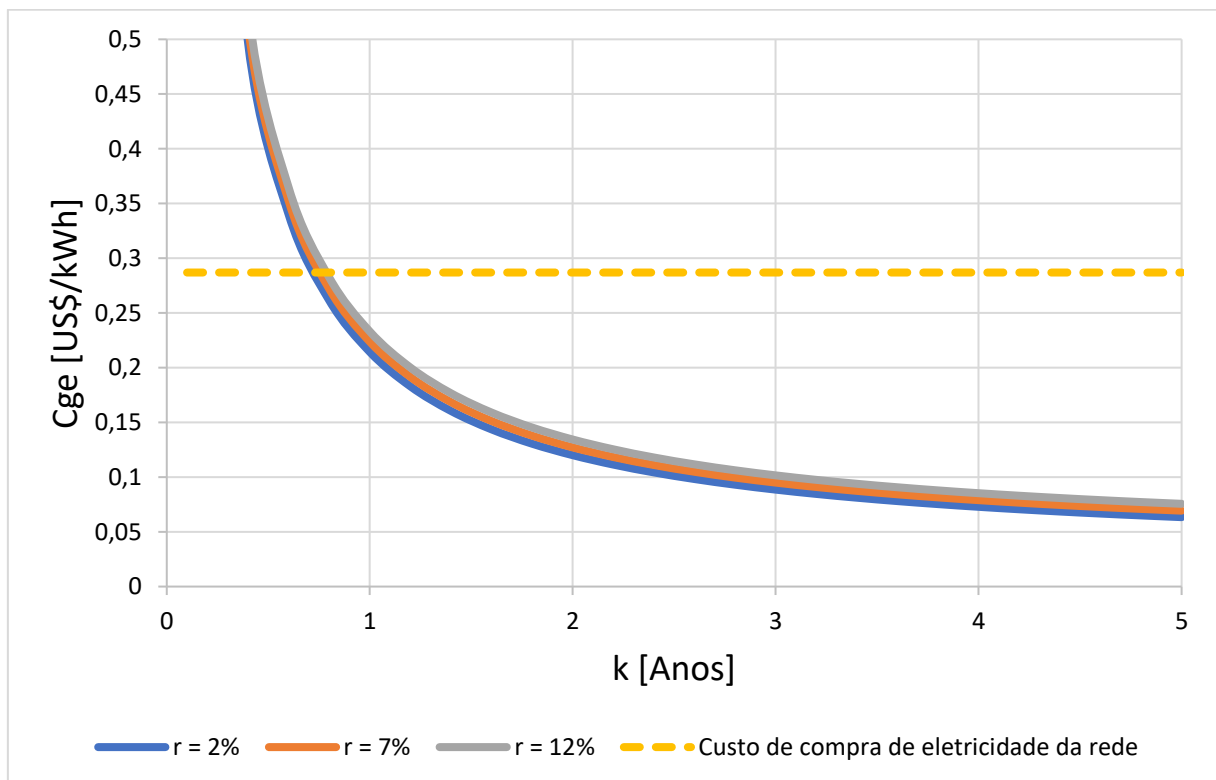
Parâmetro	Símbolo	Valor
Potência fotovoltaica instalada	P_{fv}	85,80 kW
Energia elétrica média produzida por dia	E_{fv}	453,26 kWh/dia
Área mínima necessária	A_{total}	505,52 m ²
Número de painéis necessários	$N_{mód}$	260 módulos

Fonte: Autoria própria.

5.2 ANÁLISE ECONÔMICA DO SHGE

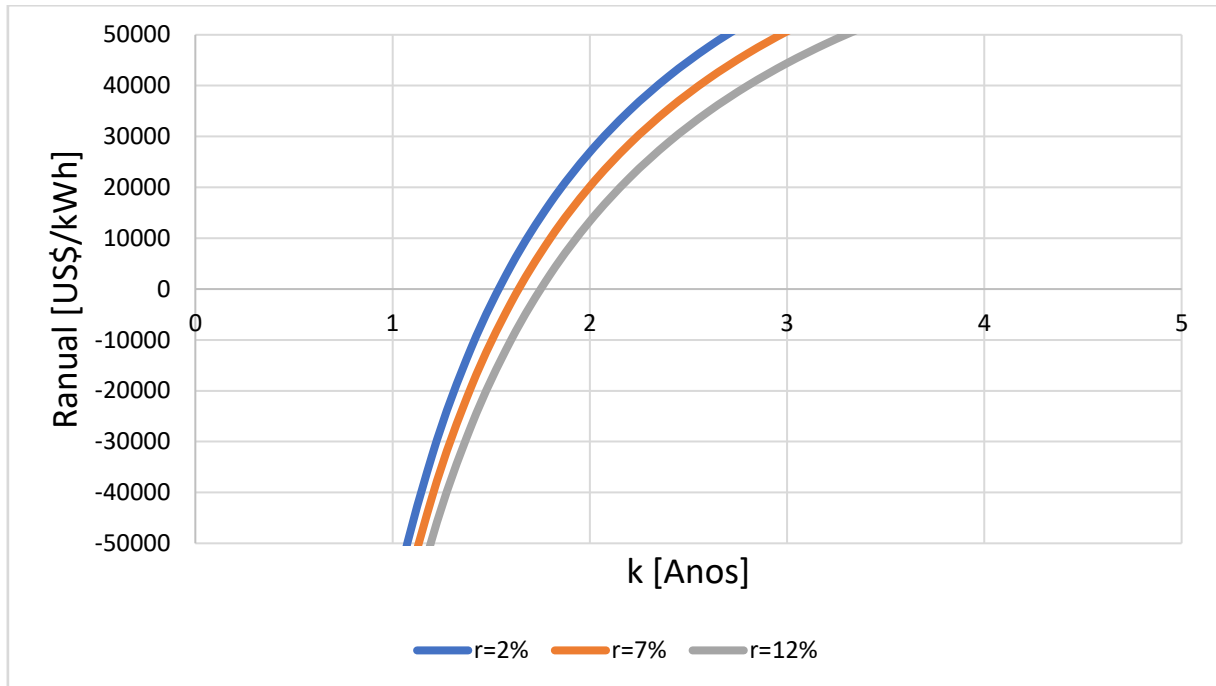
Como resultado econômico, supondo um uso de 12 horas por dia da planta a biogás e de 7 horas para a planta fotovoltaica – número médio de horas de sol a pico no nordeste brasileiro, de acordo com Tiba et al. (2020) – obteve-se o gráfico de custo de geração de eletricidade pela planta mostrado na Figura 17 e o retorno anual esperado ao longo do tempo (*payback*, em inglês) na Figura 18.

Figura 17 – Gráfico do custo de geração de eletricidade do SHGE em função do tempo para 2%, 7% e 12% de juros ao ano



Fonte: Autoria própria.

Figura 18 – Gráfico do retorno anual de investimento do SHGE proposto em função do tempo para 2%, 7% e 12% de juros ao ano



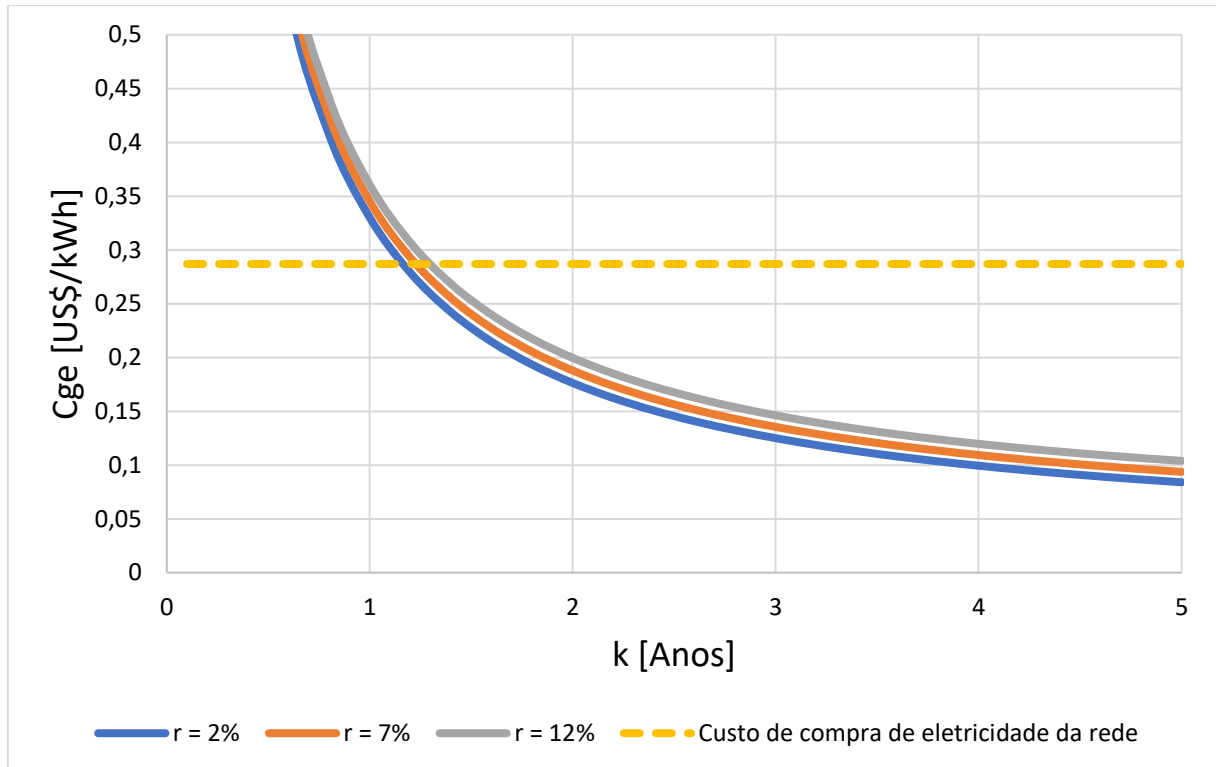
Fonte: Autoria própria.

Nota-se, para os três cenários testados (taxa de juros de 2, 7 e 12% ao ano), que o custo específico de geração de eletricidade pelo SHGE proposto – equacionado em (12) – se reduz ao longo do tempo se tornando mais barato que o custo da energia elétrica pela rede por volta de 0,75 anos (ou 9 meses). Sendo mais barato gerar eletricidade pelo SHGE do que comprar, analisa-se agora, então, o gráfico de retorno anual onde nota-se um tempo de retorno de investimento (ou tempo de *payback*) aproximado entre 1 e 2 anos de funcionamento. Assim, nota-se uma viabilidade econômica para o SHGE proposto. Porém, também serão analisados os sistemas a biogás e fotovoltaico individualmente para poder-se conhecer melhor as ponderações de cada planta.

5.2.1 Planta a biogás

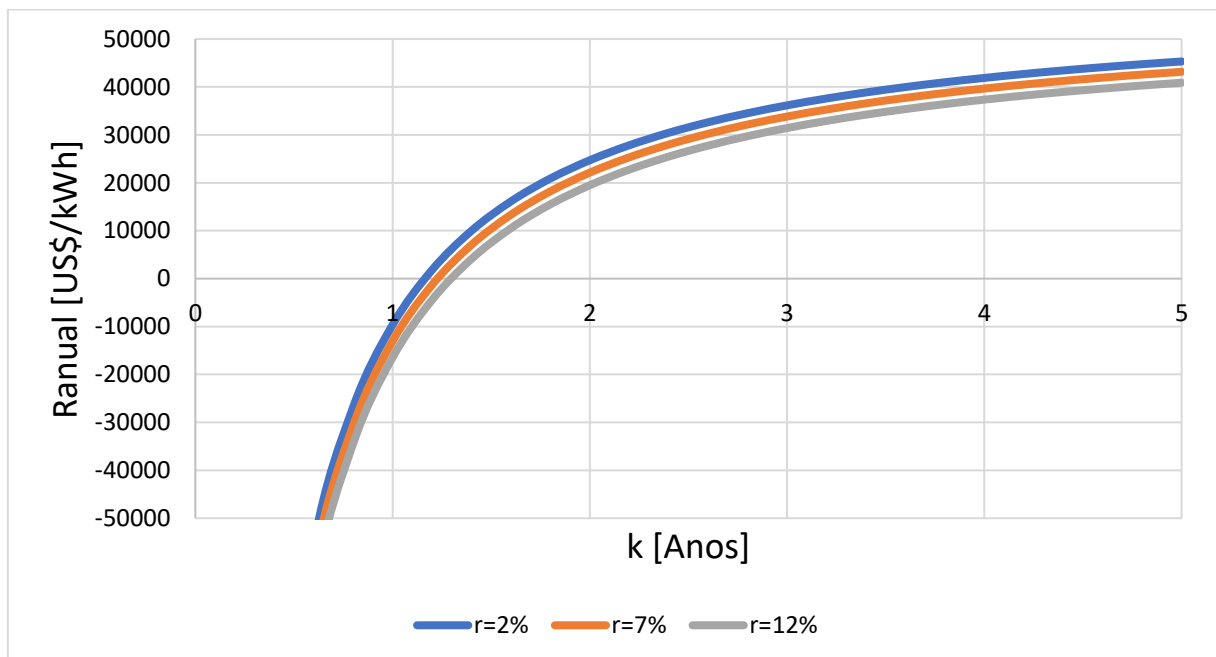
Analisando-se a planta a biogás independentemente, obteve-se a Figura 19 para o custo de geração específico de eletricidade para os mesmos 3 cenários da análise do SHGE (2%, 7% e 12% de juros ao ano) e a Figura 20 para o retorno anual de investimento.

Figura 19 – Gráfico do custo de geração de eletricidade da planta a biogás em função do tempo para 2%, 7% e 12% de juros ao ano



Fonte: Autoria própria.

Figura 20 – Gráfico do retorno anual de investimento da planta a biogás em função do tempo para 2%, 7% e 12% de juros ao ano



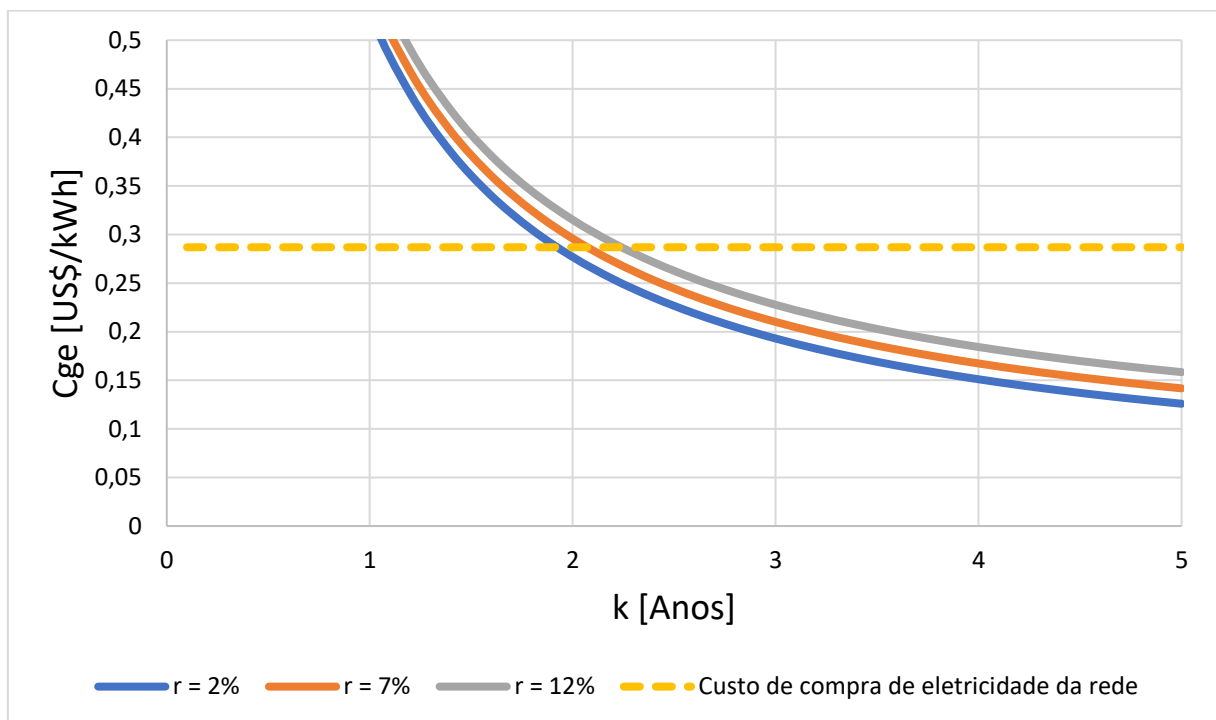
Fonte: Autoria própria.

Pelos resultados econômicos da planta a biogás, nota-se um custo de geração de eletricidade, assim como tempo de retorno de investimento, menor que do SHGE. Isso mostra que a planta em análise contribui mais positivamente para o SHGE que a planta fotovoltaica, o outro lado do sistema.

5.2.2 Planta fotovoltaica

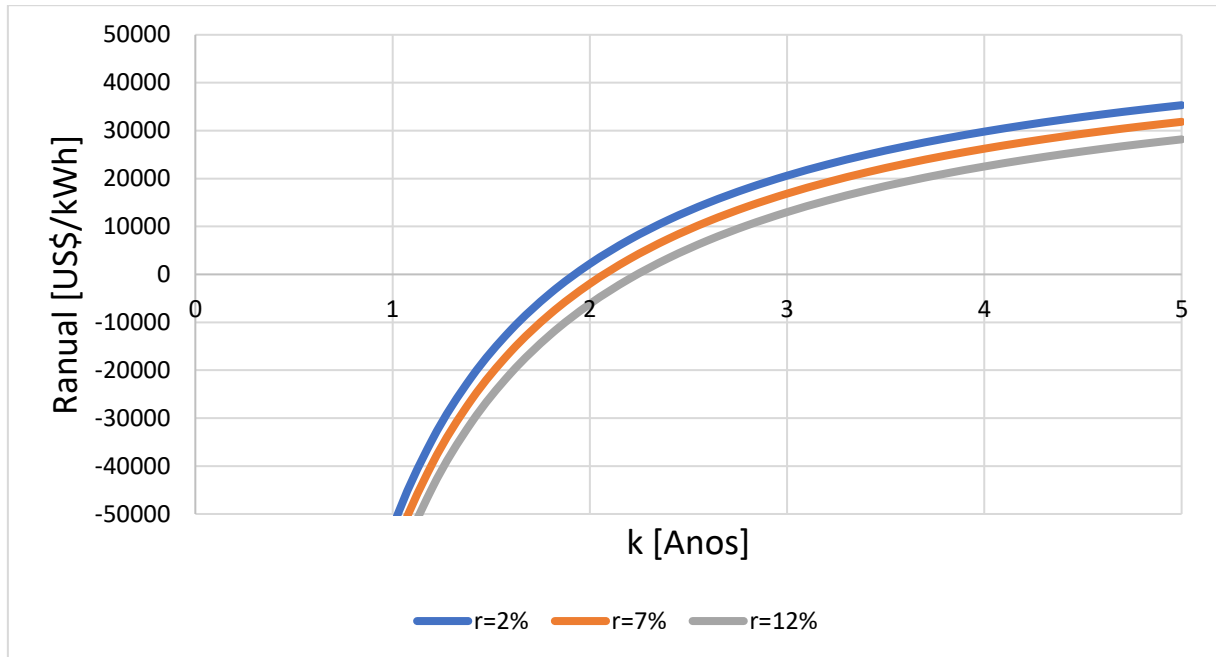
Os resultados econômicos obtidos para a planta fotovoltaica estão mostrados na Figura 21 para o custo de geração de eletricidade e na Figura 22 para o retorno anual de investimento.

Figura 21 – Gráfico do custo de geração de eletricidade da planta fotovoltaica em função do tempo para 2%, 7% e 12% de juros ao ano



Fonte: Autoria própria.

Figura 22 - Gráfico do retorno anual de investimento da planta fotovoltaica em função do tempo para 2%, 7% e 12% de juros ao ano



Fonte: Autoria própria.

Como esperado após a análise econômica do SHGE e da planta a biogás, nota-se um custo de geração de energia elétrica e tempo de retorno de investimento maior que o outro lado do sistema. Porém, a planta em questão possui um tempo de retorno de investimento menor que a vida útil do SHGE, tornando-a assim economicamente rentável também, contribuindo para a viabilidade financeira do projeto como um todo.

5.3 ANÁLISE AMBIENTAL DO SHGE

5.3.1 Planta a biogás

Para o biogás, tem-se que para cada quilograma de combustível queimado, é emitido na atmosfera cerca de 3,29 kg de CO₂-eq (XAVIER, 2016). Aproximando a composição do biogás para 60% CH₄ e 30% CO₂ (e o restante composto por gases não poluentes) tem-se, em termos equivalentes, 12,90 kg de CO₂-eq – uma vez que a pegada de carbono do metano consiste em 21 vezes a do dióxido de carbono (XAVIER, 2016). Dessa forma, caso o biogás não fosse posto em combustão, a poluição seria muito mais intensa – contribuindo por volta de 12,90 vezes a mais para o agravamento do efeito estufa, fato que colabora com a

justificativa ou motivação para implementação do SHGE proposto. Assim, já se pode começar a cogitar sua viabilidade ambiental.

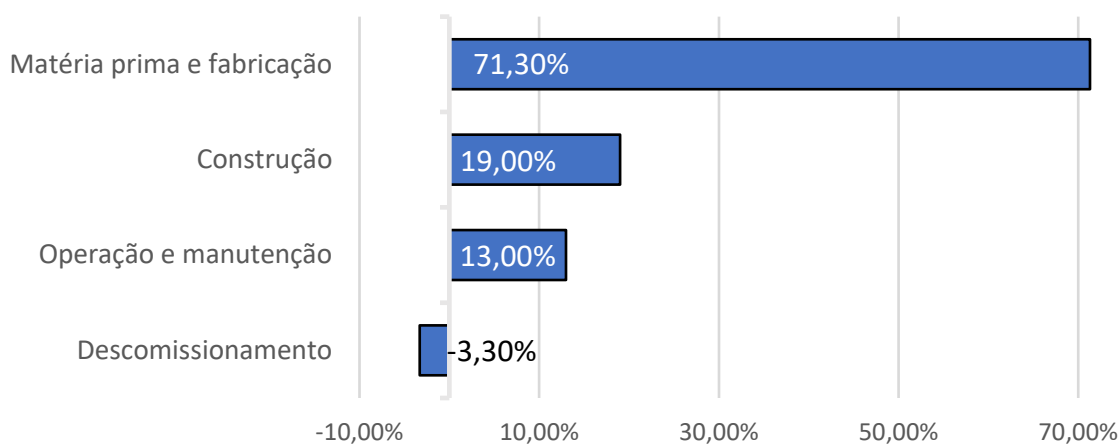
Dessa forma, utilizando-se da metodologia LCA para um sistema de geração de energia elétrica e térmica a biogás, Whiting e Azapagic (2014) obtiveram o valor de 222 g CO₂-eq/kWh em emissões agravantes do aquecimento global. Normalizando os seguintes valores para geração apenas de eletricidade como o sistema a biogás proposto, tem-se 526,22 g CO₂-eq/kWh de emissão.

Como a geração de energia elétrica brasileira em 2019 pelo SIN possui uma taxa de emissão média de 534,1 g CO₂-eq/kWh de acordo com o Brasil (2020), pode-se concluir, em termos de agravamento do efeito estufa global, que o sistema de geração de energia elétrica a biogás deste trabalho se torna ambientalmente viável, com uma redução aproximada de 7,88 g CO₂-eq/kWh ou 1,48% em emissões de GWP.

5.3.2 Planta fotovoltaica

Na primeira fase do LCA aplicado à planta fotovoltaica, destaca-se a mineração de areias de quartzo para a extração do silício fotovoltaico e a produção das células fotovoltaicas de silício, o que envolve o uso de fornos e diversos outros processos que consomem energia (FTHENAKIS e KIM, 2011). Dessa forma, tem-se certas emissões cujo nível pode variar de acordo com a matriz energética do país produtor dos painéis fotovoltaicos (BOYLE, 2004) – de acordo com o estudo feito por Nugent e Sovacool (2014), estas emissões na fase de obtenção de matéria prima e fabricação correspondem a 71,5% de todas as emissões do ciclo de vida de uma planta fotovoltaica, ou seja, a problemática ambiental do sistema fotovoltaico está concentrada na primeira fase. A segunda etapa com mais participação nas emissões é a fase de construção, onde há uso de combustíveis fósseis para os transportes necessários tanto de mão de obra, quanto de materiais e equipamentos. Também destaca-se, de modo oposto, o descomissionamento da planta, onde a sua reciclagem compensa em partes as emissões anteriores (considera-se emissões negativas). Estas emissões estão resumidas em termos proporcionais no gráfico da Figura 23.

Figura 23 – Emissões de gases agravantes do efeito estufa no ciclo de vida de plantas fotovoltaicas



Fonte: Adaptado de Nugent e Sovacool (2014).

Assim, com base no trabalho de Nugent e Sovacool (2014) (onde analisou-se 41 outros estudos de LCA com sistemas fotovoltaicos), encontrou-se uma variação de emissões entre 1 g CO₂-eq/kWh e 218 g CO₂-eq/kWh, com uma média de 49,91 g CO₂-eq/kWh. Essas variações foram estudadas por Fthenakis e Kim (2011) e conclui-se que elas são esperadas e ocorrem pelos seguintes motivos:

- diferenças nas insolações de cada localidade das plantas;
- por temperaturas ambientais diferentes (países com temperaturas mais baixas necessitam de mais energia para produzir os componentes, o que emite mais gases poluentes na atmosfera);
- por tipos de painéis fotovoltaicos diferentes (por exemplo entre módulos de silício monocristalino e policristalino);
- por estruturas de proteção diferentes (como o vidro simples, duplo, ou de composições diferentes);
- por variações nas estruturas de sustentação (como quantidades ou tipos diferentes de aços ou outros metais para a sustentação dos painéis).

Considerando todas as variações existentes entre as plantas fotovoltaicas pelo mundo analisadas por Fthenakis e Kim (2011) e Nugent e Sovacool (2014), mesmo com o valor de emissão mais alto encontrado (218 g CO₂-eq/kWh), este ainda está abaixo do fator de emissão

do SIN brasileiro (534,1 g CO₂-eq/kWh) – ou seja, em termos de gases agravantes do efeito estufa o sistema fotovoltaico proposto é uma alternativa viável para ser aplicado, onde reduz as emissões de GWP em 316,1 g CO₂-eq/kWh ou 59,18%.

6 CONCLUSÃO

Considerando a demanda elétrica de uma indústria de laticínios, dimensionou-se um SHGE baseado em uma planta fotovoltaica e um grupo motor-gerador alimentado a biogás oriundo dos dejetos bovinos da própria empresa. Dessa forma, geraria eletricidade sustentável e evitaria que o metano (CH_4), um dos piores gases para o excessivo efeito estufa, seja liberado para a atmosfera, além de uma maior independência da indústria em relação a concessionárias de energia elétrica.

Da análise energética, considerando-se uma localidade no nordeste brasileiro (localização propícia para a instalação da planta fotovoltaica por conta da alta insolação, além de grandes espaços para fazendas com pastos para bovinos e para instalação do SHGE como um todo), observou-se a necessidade da indústria possuir ao menos 260 módulos fotovoltaicos e 462 bovinos leiteiros para atingir a demanda de eletricidade do sistema dimensionado. Assim, o SHGE torna-se viável energeticamente.

Do ponto de vista econômico, a planta mostrou-se ser um investimento rentável aproximadamente a partir de 1 ano e 9 meses de seu funcionamento para uma taxa de juros de 2%, 7% ou 12% de juros – ou seja, com este tempo de funcionamento todo o dinheiro investido inicialmente já teria seu retorno. Dessa forma, o SHGE proposto é viável economicamente.

A partir da análise ambiental realizada, pode-se concluir que o SHGE como um todo contribui para a redução de emissões de gases agravantes do efeito estufa uma vez que seu potencial de aquecimento global (GWP) é menor que o do SIN em ambos os sistemas (fotovoltaico e biogás).

Para trabalhos futuros sugere-se uma análise exérgica com cálculo de eficiências e irreversibilidades do sistema proposto para um entendimento mais profundo deste, além de análises ambientais mais diversificadas, com focos diferentes do aquecimento global, como por exemplo potenciais de acidificação e eutrofização, de contaminação do meio ambiente, de destruição da camada de ozônio e de criação de oxidantes fotoquímicos, para assim ser garantida uma viabilidade ambiental mais completa englobando outros sistemas ecológicos.

Como a indústria possui uma grande demanda térmica por conta do grande número de refrigeradores necessários, também sugere-se dimensionar uma planta de cogeração para integrar o grupo motor-gerador proposto, onde a energia produzida pelos motores seria melhor aproveitada através da utilização, também, da energia térmica liberada através dos gases de exaustão e do sistema de arrefecimento, o que aumentaria a eficiência energética do

processo como um todo e, provavelmente, a análise econômica e ambiental retornariam melhores resultados.

Para um melhor aproveitamento do recurso solar, também sugere-se a instalação de um controlador de carga com MPPT (seguidor do ponto de máxima potência, ou *Maximum Power Point Tracker* em inglês). Este controlaria a planta fotovoltaica a operar em um ponto de maior rendimento, onde a potência da eletricidade gerada seria mais otimizada.

REFERÊNCIAS

- ALCÓCER, J. C. A *et al.* Uso do biodigestor na suinocultura: uma alternativa à sustentabilidade ambiental na região do maciço de Baturité, Ceará. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 9, n. 2, p. 783-818, 2020.
- ANEEL. **Resolução Normativa nº 482/2012 de 17 de Abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2020.
- ANEEL. **Tarifas médias por classe de consumo e região**. 2019. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/dados/tarifas>. Acesso em: 02 jun. 2019.
- ANTUNES, J. S. **Código computacional para análise de sistemas de cogeração com turbinas a gás**. 1999. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 1999. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/106455>. Acesso em: 04 nov. 2020.
- AVILÉS, S. M. A.; SOUZA, T. M. **Sistemas renovables com energia solar**. Guaratinguetá: Páginas e Letras, 2011.
- BAKHSHI, R.; SADEH, J. A comprehensive economic analysis method for selecting the PV array structure in grid-connected photovoltaic systems. **Renewable Energy**, Oxford, v. 94, p. 524-536, 2016.
- BAKHSHI-JAFARABADI, R.; SADEH, J.; DEGHAN, M. Economic evaluation of commercial grid-connected photovoltaic systems in the Middle East based on experimental data: a case study in Iran. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [s.l.], v. 37, 100581, p.1-9, 2020.
- BALDASSIN JUNIOR, R. *et al.* Consumo de energia elétrica de um laticínio tipo “a” e estudo de racionalização do uso de energia elétrica nos processos de resfriamento de leite e aquecimento de água: um estudo de caso. *In*: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5., 2004, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: SBEA, 2004. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000100041&lng=en&nrm=abn. Acesso em: 11 set. 2020.
- BARREIRA, P. **Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural**. 3. ed. São Paulo: Ícone, 2011.
- BELAISSAOUI, B. *et al.* Potentialities of a dense skin hollow fiber membrane contactor for biogas purification by pressurized water absorption. **Journal of Membrane Science**, Amsterdam, v. 513, p. 236-249, 2016.
- BIOGAS DIGESTER INFOGRAPHIC. **Biostar Renewables, LLC: sustainable energy solutions**, 2020. Disponível em: <https://biostarrenewables.com/waste-to-fertilizer/biogas-digester-infographic/>. Acesso em: 13 nov. 2020.

BOYLE G., *et al.* **Renewable energy: power for a sustainable future**. Second Edition. Oxford 18 University Press, 2004, 464 p.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES, 2020. Disponível em: https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_despacho.html. Acesso em: 31 maio 2020.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balço Energético Nacional 2019: ano base 2018**. Brasília, DF: Ministério das Minas e Energia, 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf>. Acesso em: 2 maio 2020.

BRIZI, F. *et al.* Energetic and economic analysis of a Brazilian compact cogeneration system: comparison between natural gas and biogas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Netherlands, v. 38, p. 193-211, 2014.

CALZA, L. F. *et al.* Avaliação dos custos de implantação de biodigestores e da energia produzida pelo biogás. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 6, p. 990-997, 2015.

CAMPOS, V. A. F. **Aspectos técnicos, econômicos e ambientais de sistemas híbridos aplicados em edificações familiares e propriedades rurais**. 2019. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2019.

CANADIAN SOLAR INC. **Ficha técnica do produto do módulo fotovoltaico V5.51P1_NA**, 2016. Disponível em: <https://download.aldo.com.br/pdfprodutos/Produto34226IdArquivo4451.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2020.

CARDOSO, D. F. S. **Modelação e simulação de um motor/gerador de relutância variável para substituição do volante de inércia do motor de combustão interna**. 2017. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletromecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2017.

CETESB. **BIOGÁS Sistema**. São Paulo: [s.n.], 2018. Disponível em: <http://Cetesb.sp.gov.br/biogas/>. Acesso em: 13 dez. 2018.

COELHO, S. T. *et al.* A conversão da fonte renovável biogás em energia. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO*, 5., 2006, Brasília-DF. **Anais [...]**. Brasília: Sociedade Brasileira de Planejamento Energético, 2006.

COELHO, T. F.; SERRA, J. C. V. Tecnologias para reciclagem de sistemas fotovoltaicos: impactos ambientais. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, Curitiba-PR, v. 15, n. 7, p. 83-99, 2018.

COLOMBAROLI, T. S. **Análise técnica, econômica e ecológica do uso de biogás em célula a combustível óxido sólido (SOFC)**. 2015. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2015.

COMGÁS. **Manual de instalação industrial**. 2020. Disponível em: <https://www.comgas.com.br/wp-content/uploads/2017/05/Manual-de-instala%C3%A7%C3%B5es-industriais-Cliente.pdf>. Acesso em: 18 out. 2020.

CUNHA, S. R. **Desenvolvimento de biodigestor anaeróbico com sistema eletrônico de controle de temperatura**. 2018. 60 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

DEGANUTTI, R. *et al.* **Biodigestores rurais: modelos indiano, chinês e batelada**, 2002. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Biodigestores_000g76qdzev02wx5ok0wtedt3spdi71p.pdf. Acesso em: 20 jun. 2015.

DESCHAMPS, E. M.; RÜTHER, R. Optimization of inverter loading ratio for grid connected photovoltaic systems. **Solar Energy**, Kidlington, v. 179, p. 106-118, 2019.

DEY, D.; SUBUDHI, B. Design, simulation and economic evaluation of 90 kW grid connected Photovoltaic system. **Energy Reports**, [s.l.], v. 6, p. 1778-1787, 2020.

FGV; WORLD RESOURCES INSTITUTE. **Especificações de verificação do programa brasileiro GHG Protocol**: edição 2011. Disponível em: https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/arquivos.gvces.com.br/arquivos_ghg/especificacoes-ghg2011.pdf. Acesso em: 27 jun. 2020.

FREITAS BUENO, R. Comparação entre biodigestores operados em escala piloto para produção de biogás alimentado com estrume bovino. **Holos Environment**, Rio Claro, v. 10, n. 1, p. 111-125, 2010.

FTHENAKIS, V. M.; KIM, H. C. Photovoltaics: life-cycle analyses. **Solar Energy**, kidlington, v. 85, n. 8, p. 1609-1628, 2011.

GLOBAL SOLAR ATLAS 2.0. **The World Bank**. Solargis, 2019. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/download/brazil>. Acesso em: 13 nov. 2020.

GÜÉMEZ, J.; FIOLEAIS, M. Relativistic description of the photoelectric effect. **American Journal of Physics**, New York, v. 86, n. 11, p. 825-830, 2018.

LARANCI, P.; SILVEIRA J. L.; LAMAS W. Q. SOLAR 1.1 software: a case study of a chicken farm illumination project. **Exacta**, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 58-69, 2012.

MACEDO, F. J. **Dimensionamento de biodigestores para tratamento de dejetos da produção suína**. 2013. 117 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia solar fotovoltaica: uma breve revisão. **Revista Virtual de Química**, Niterói, v. 7, n. 1, p. 126-143, 2015.

MORAES JUNIOR, R.; BAGNARA, M. Os princípios químicos e físicos envolvidos no funcionamento das células fotovoltaicas. **Salão do Conhecimento**, Ijuí, v. 2, n. 2, p. 1-6, 2016.

MOTTA, K. U. **Avaliação da geração de biogás de um biodigestor de dejetos bovinos e suínos**. 2012. 127 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial) - Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná em parceria com o SENAI – PR e a Universidade de Stuttgart, Alemanha, 2012.

MOURA, R. S. *et al.* Análise da viabilidade do uso de biodigestores em propriedades rurais. **ForScience: Revista Científica do IFMG**, Formiga, v. 5, n. 3, jul./dez. 2017.

MUKISA, N.; ZAMORA, R.; LIE, T. T. Feasibility assessment of grid-tied rooftop solar photovoltaic systems for industrial sector application in Uganda. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [s.l.], v. 32, p. 83-91, 2019.

MWM GERADORES. **Gerador à gas natural**: gerador MGG80.60. 2020. Disponível em: https://www.geradoresmwm.com.br/custom/cms/produtos/prod_66.pdf?cb=28894020201105004043. Acesso em: 23 set. 2020.

NASCIMENTO, R. **Energia solar no brasil**: situação e perspectivas. Estudo Técnico - Câmara dos Deputados (Consultoria Legislativa). Brasília: Consultoria Legislativa, 2017. Disponível em: http://bd.camara.gov.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/32259/energia_solar_limp.pdf?sequence=>. Acesso em: 10 fev. 2020

NUGENT, D.; SOVACOOOL, B. K. Assessing the lifecycle greenhouse gas emissions from solar PV and wind energy: a critical meta-survey. **Energy Policy**, [s.l.], v. 65, p. 229-244, 2014. Elsevier. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.048>. Acesso em: 15 nov. 2020.

OKAMURA, L. A. **Avaliação e melhoria do poder calorífico de biogás proveniente de resíduos sólidos urbanos**. 2013. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

OLIVER, A. de P. M. *et al.* **Manual de Treinamento em Biodigestão**. Salvador – BA: Instituto Winrock, 2008.

OLIVEIRA, R. D. **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbica de dejetos em abatedouros e as possibilidades no mercado de carbono**. 2009. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

PASQUALINI, A. A. Aplicação dos biodigestores na pecuária sustentável. **Revista Faculdades do Saber**, Mogi Guaçu, v. 5, n. 09, p. 598-609, 2020.

PAULINO, R. F. S. **Uso do biogás para produção de biohidrogênio**: eletrólise versus reforma a vapor. 2017. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade

de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP**. 2006. 108 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, Instituto de Eletrotécnica e Energia. São Paulo, 2006.

PEDOTT, J. G. J.; AGUIAR, A. O. Biogás em aterros sanitários: comparando a geração estimada com a quantidade validada em projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo. **Holos**, [s.l.], v. 4, p. 195-211, 2014. ISSN 1807-1600. Disponível em: <http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/1715>. Acesso em: 09 jan. 2020.

PINHO, J. T. *et al.* **Manual de implantação de sistemas híbridos fotovoltaico-eólico-diesel para geração de energia elétrica**. MME, Brasília, 2008.

PINHO, J. T.; GALDINO, M.A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro – RJ: CEPEL – CRESESB Edição, 2014.

QUADROS, D. G.; VALLADARES, R.; REGIS, U. **Utilização de dejetos na geração de energia e preservação ambiental**. FarmPoint, 2007. Disponível em: <http://www.farmpoint.com.br/cadeia-produtiva/espaco-aberto/utilizacao-de-dejetos-na-geracao-de-energia-e-preservacao-ambiental-36725n.aspx>. Acesso em: 13 nov. 2020.

RASI, S.; VEIJANEN, A.; RINTALA, J. Trace compounds of biogas from different biogas production plants. **Energy**, [s.l.], v. 32, n. 8, p. 1375-1380, 2007.

ROBERTS J. J. **Otimização de sistemas híbridos de geração de energia solar-eólico-diesel através de métodos metaheurísticos e função multiobjetivo**. 2016. 275 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

RUIZ, J. M. A. **Aspectos técnicos, econômicos e ambientais da implementação de energia eólica e solar fotovoltaica em edifícios**. 2016. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

SAIF, A. *et al.* Multi-objective capacity planning of a PV-wind-diesel-battery hybrid power system. *In: 2010 IEEE INTERNATIONAL ENERGY CONFERENCE*, 2010, Manama. **Abstracts** [...]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2010, p. 217-222.

SALAMONI, I. T.; RÜTHER, R. O potencial brasileiro da geração solar fotovoltaica conectada à rede elétrica: análise de paridade de rede. *In: IX ENCONTRO NACIONAL E V LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, 9., 2007, Ouro Preto-MG. **Anais** [...]. São Paulo, SP: ENTAC, 2007, p. 1658-1667.

SILVEIRA, J. L. *et al.* Ecological efficiency and thermoeconomic analysis of a cogeneration system at a hospital. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Netherlands, v. 16, n. 5,

p. 2894–2906, 2012a. Elsevier Ltda. Disponível em:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.007>. Acesso em: 17 set. 2020.

SILVEIRA, J. L. *et al.* Uso de biogás para produção de água gelada e eletricidade. *In*: LEMOS, E. G. M.; STRADIOTTO, N. R. **Bioenergia**: desenvolvimento, pesquisa e inovação. São Paulo: Editora Cultura Acadêmica, 2012b, cap.18. (Coleção PROPe Digital - UNESP). ISBN 9788579832567. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/123648>. Acesso em: 23 nov. 2020.

SOUZA, S. N. M.; ASSOCIADO, C. **Manual de geração de energia elétrica a partir do biogás no meio rural**. 2016. 47 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2016.

SUZUKI, A. B. P. *et al.* Uso de biogás em motores de combustão interna. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava, v. 4, n. 1, p.221-237, jan. /abr. 2011.

TIBA, C. *et al.* **Atlas solarimétrico do Brasil**: banco de dados terrestres. Recife: Editora Universitária da UFPe, 2000. Disponível em:
http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf. Acesso em: 21 set. 2020.

XAVIER, B. H. **Aspectos termodinâmicos, ecológicos e econômicos de sistemas de cogeração com motores de combustão interna operando com gás natural, biogás e gás de síntese**. 2016. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

WHITING, A.; AZAPAGIC, A. Life cycle environmental impacts of generating electricity and heat from biogas produced by anaerobic digestion. **Energy**, [s.l.], v. 70, p. 181-193, 2014.

WILDNER, F. D. **Estudo experimental da variação de velocidade de combustão para diferentes combustíveis, relações de mistura e relações de compressão em um motor ASTM CFR**. Orientador: Pedro Barbosa Mello. 2006. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRS, Porto Alegre - RS. 2006.

YUE, D.; YOU, F.; DARLING, S. B. Domestic and overseas manufacturing scenarios of silicon-based photovoltaics: life cycle energy and environmental comparative analysis. **Solar Energy**, Freiburg, v. 105, p. 669-678, 2014. Elsevier Ltda. Disponível em:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.04.008>. Acesso em: 13 abr. 2020.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ABDESHAHIAN, P. *et al.* Potential of biogas production from farm animal waste in Malaysia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Netherlands, v. 60, p. 714-723, 2016.

BLENGINI, G.A. *et al.* LCA of bioenergy chains in Piedmont (Italy): a case study to support public decision makers towards sustainability. **Resources, Conservation and Recycling**, [s.l.], v. 57, p. 36-47, 2011.

BORGES NETO, M. *et al.* Biogas/photovoltaic hybrid power system for decentralized energy supply of rural areas. **Energy Policy**, [s.l.], v. 38, n. 8, p. 4497-4506, 2010.

BUHLE, L.; STULPNAGEL, R.; WACHENCLORF, M. Comparative life cycle assessment of the integrated generation of solid fuel and biogas from biomass (IFBB) and whole crop digestion (WCD) in Germany. **Biomass Bioenergy**, [s.l.], v. 35, n. 1, p. 363-373, 2011.

CASTRO, T. S. **Análise econômica e ambiental de sistemas de geração alternativa para suprimento energético de carros elétricos**. 2018. 153 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

LAI, C. S. *et al.* Levelized cost of electricity for photovoltaic/biogas power plant hybrid system with electrical energy storage degradation costs. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 153, p. 34-47, 2017.

RAHMAN, M. M. *et al.* Hybrid application of biogas and solar resources to fulfill household energy needs: a potentially viable option in rural areas of developing countries. **Renewable Energy**, Oxford, v. 68, p. 35-45, 2014.

SGANZERLA, E. **Biodigestor**: uma solução. Porto Alegre: Agropecuária, 1983.






ANEXO A – Ficha técnica do painel fotovoltaico *Canadian Solar* MAXPOWER CS6U-330P





MAXPOWER CS6U-315 | 320 | 325 | 330P

Os novos módulos policristalinos MAXPOWER da Canadian Solar usam a mais recente tecnologia inovadora de célula de cinco barras, aumentando a saída de potência do módulo e a confiabilidade do sistema.

PRINCIPAIS RECURSOS

-  Confiabilidade aprimorada com a tecnologia de célula de 5 barras
-  Eficiência da célula de até 18,8%
-  Excepcional desempenho de baixa irradiação: 96%
-  Caixa de derivação IP67, resistência de longo prazo ao clima
-  Carga de neve pesada até 5.400 Pa, carga de vento até 2.400 Pa

-  **25 anos** de garantia de saída de potência linear
-  **10 anos** de garantia do produto em materiais e mão de obra

CERTIFICADOS DE SISTEMA DE GESTÃO*

ISO 9001:2008/Sistema de gestão da qualidade
ISO/TS 16949:2009/O sistema de gestão de qualidade do setor automotivo
ISO 14001:2004/Padrões para sistema de gestão ambiental
OHSAS 18001:2007/Padrões internacionais para saúde e segurança no trabalho

CERTIFICADOS DO PRODUTO*

IEC 61215/IEC 61730: VDE/CE
UL 1703: CSA/IEC 61701 ED2: VDE/IEC 62716: VDE/Take-e-way

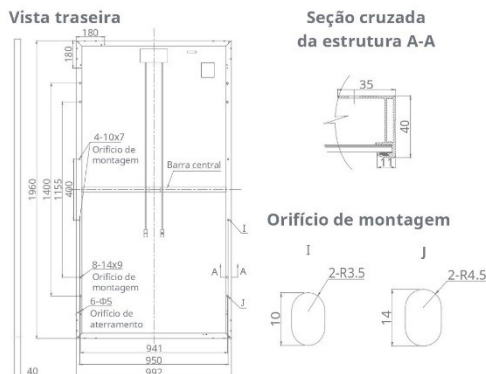


* As exigências de certificação são diferentes em cada mercado, portanto solicite a seu representante de vendas local da Canadian Solar os certificados válidos para os produtos na região em que eles serão usados.

A **CANADIAN SOLAR INC.** está comprometida a fornecer produtos solares, soluções de sistemas solares e serviços de alta qualidade para clientes em todo o mundo. Como desenvolvedora de projetos fotovoltaicos e fabricante líder de módulos solares com mais de 15 GW instalados em todo o mundo desde 2001, a Canadian Solar Inc. (NASDAQ: CSIQ) é uma das empresas de energia solar mais lucrativas do mundo.

CANADIAN SOLAR INC.

2430 Camino Ramon, Suite 240 San Ramon, CA, USA 94583-4385, www.canadiansolar.com, sales.us@canadiansolar.com

DESENHOS DE ENGENHARIA (mm)**DADOS ELÉTRICOS/STC***

CS6U	315P	320P	325P	330P
Potência nominal máx. (P _{máx})	315 W	320 W	325 W	330 W
Tensão operacional ideal (V _{mp})	36,6 V	36,8 V	37,0 V	37,2 V
Corrente operacional ideal (I _{mp})	8,61 A	8,69 A	8,78 A	8,88 A
Tensão de circuito aberto (V _{oc})	45,1 V	45,3 V	45,5 V	45,6 V
Corrente de curto-circuito (I _{sc})	9,18 A	9,26 A	9,34 A	9,45 A
Eficiência do módulo	16,20%	16,46%	16,72%	16,97%
Temperatura operacional	-40 °C ~ +85 °C			
Tensão máxima do sistema	1.000 V (IEC) ou 1.000 V (UL)			
Desempenho do módulo contra incêndio	TIPO 1 (UL 1703) ou CLASSE C (IEC 61730)			
Classificação máx. de fusíveis da série	15 A			
Classificação da aplicação	Classe A			
Tolerância de potência	0 ~ + 5 W			

* Sob condições de teste padrão (STC) de irradiação de 1.000 W/m², espectro AM de 1,5 e temperatura de célula de 25 °C.

DADOS ELÉTRICOS/NOCT*

CS6U	315P	320P	325P	330P
Potência nominal máx. (P _{máx})	228 W	232 W	236 W	239 W
Tensão operacional ideal (V _{mp})	33,4 V	33,6 V	33,7 V	33,9 V
Corrente operacional ideal (I _{mp})	6,84 A	6,91 A	6,98 A	7,05 A
Tensão de circuito aberto (V _{oc})	41,5 V	41,6 V	41,8 V	41,9 V
Corrente de curto-circuito (I _{sc})	7,44 A	7,50 A	7,57 A	7,66 A

* Sob temperatura operacional normal da célula (NOCT), irradiação de 800 W/m², espectro AM de 1,5, temperatura ambiente de 20 °C, velocidade do vento de 1 m/s.

DESEMPENHO A BAIXA IRRADIAÇÃO

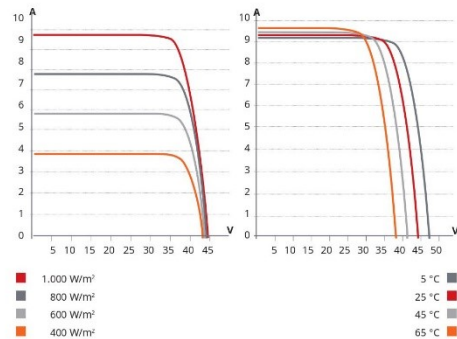
Desempenho excepcional em ambientes de baixa irradiação, eficiência média relativa de 96% a partir de uma irradiação de 1.000 W/m² a 200 W/m² (AM 1,5, 25 °C).

A especificação e os principais recursos descritos nesta ficha técnica podem ser um pouco diferentes e não estão garantidos. Devido à contínua inovação, pesquisa e melhoria de produtos, a Canadian Solar Inc. reserva-se o direito de fazer modificações nas informações descritas neste documento a qualquer momento e sem aviso prévio. Sempre adquira a versão mais recente da ficha técnica, que deve ser devidamente incorporada ao contrato legal firmado pelas partes regulamentando todas as transações relativas à compra e à venda dos produtos aqui descritos.

Atenção: Apenas para uso profissional. A instalação e o manuseio de módulos fotovoltaicos requerem habilidades profissionais. Apenas profissionais qualificados devem realizá-los. Leia as instruções de segurança e instalação antes de usar os módulos.

CANADIAN SOLAR INC.

Julho de 2016. Todos os direitos reservados. Ficha técnica do produto do módulo fotovoltaico V5.51P1_NA

CS6U-320P | CURVAS I-V**DADOS MECÂNICOS**

Especificação	Dados
Tipo de célula	Policristalino, 6 polegadas
Organização das células	72 (6 x 12)
Dimensões	1.960 x 992 x 40 mm (77,2 x 39,1 x 1,57 pol.)
Peso	22,4 kg (49,4 lb)
Tampa dianteira	Vidro temperado de 3,2 mm
Material da estrutura	Liga de alumínio anodizado
Caixa de derivação	IP67, 3 diodos
Cabo	4 mm ² (IEC) ou 4 mm ² e 12 AWG 1.000 V (UL), 1.160 mm (45,7 pol.)
Conectores	T4 (IEC/UL)
Por paleta	26 peças
Por contêiner (40' HQ)	572 peças

CARACTERÍSTICAS DE TEMPERATURA

Especificação	Dados
Coefficiente de temperatura (P _{máx})	-0,41%/°C
Coefficiente de temperatura (V _{oc})	-0,31%/°C
Coefficiente de temperatura (I _{sc})	0,053%/°C
Temperatura operacional nominal da célula	45±2 °C

SEÇÃO DO PARCEIRO

Fonte: Canadian Solar Inc (2016).

ANEXO B – Ficha técnica do grupo motor-gerador MWM MGG80.60



GERADOR À GÁS NATURAL

Gerador MGG80.60

1. Gerador 80 kVA - 60Hz



POWERED BY



2. Informações Técnicas

Especificações do Gerador	Unidade	Descrições		
Classe de Regulação		ISO8528		
Frequência	Hz	60		
Fator de Potência		0,8		
Tensão Trifásica	Vca	220 / 127 - 380 / 220 - 440 / 254		
Regime de Operação		Stand-By	Prime	COP
Potência no Regime de Operação	kVA / kW	80 / 64	72 / 58	64 / 51
Consumo ± 5%	Nm³/h	24	22,2	20,3
Bateria		12V - 95Ah - 750CCA		

Especificações do Motor	Unidade	Descrições		
Modelo		4.12TCEG-G		
Fabricante		MWM		
Aplicação		Estacionário		
Rotação	rpm	1800		
Configuração		04 Tempos / 04 Cilindros em linha		
Diâmetro x Curso	mm	105 x 137		
Tipo de Aspiração / Sistema de Injeção		Turbo Aftercooler / Eletrônico		
Taxa de Compressão		12:01		
Alternador do Carregamento de Bateria	A	90		
Especificação de Motor de Partida	Vcc - kW	12 - 3,3		
Sistema de Refrigeração		Água + Ar + Sistema de Ventilação Soprante		
Cap. Total do Líquido Refrigerante	l	18		
Especificação do Líquido Refrigerante		Havoline Xtended Life Premix 50/50		
Especificação de óleo Lubrificante		SAE 15W40 / API CI-4 / ACEA E7-08		
Cap. de lts de óleo Lubrificante com filtro	l	10		
Interv. para Subst. do filtro de óleo lub.	h	250		
Resistência de Pré Aquecimento		1000W - Aplicável apenas para geradores automáticos		

GERADOR À GÁS NATURAL

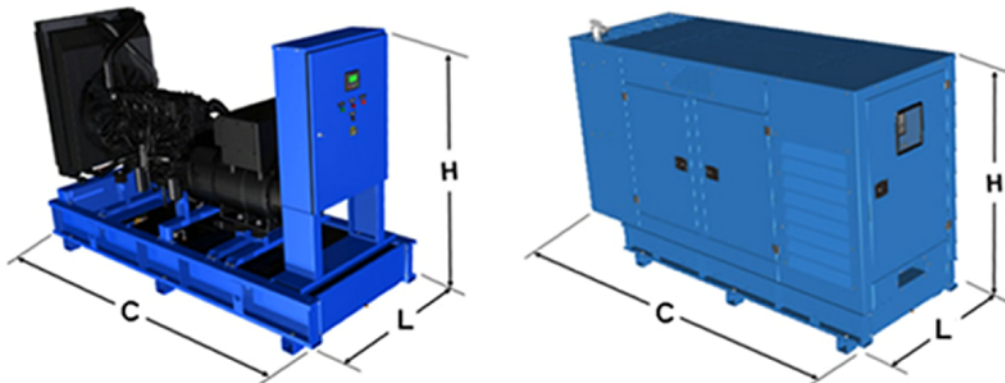
Gerador MGG80.60

Especificações do Alternador		Descrições
Tipo		Brushless
Excitação		Shunt
Regulador de Tensão		Eletrônico incorp. com resp. dinâmica de 0 a 20ms ; regulação estática de 1,5%
Grau de Proteção		IP23
Classe de Isolação		180°C (Classe H)
Distorção Harmônica máxima sem Carga		< 3%
Corrente de Curto Circuito		3x IN durante o período de 10 s
Numero de Terminais		12
Caixa de Ligação		Conectável em 3 Tensões
Mancal		Único
Refrigeração		Ar
Forma Construtiva		B15T
Passo do Enrolamento		Encurtado de 2/3
Pintura		Industrial Resistente a Salinidade com Concentração de Sal =< 1 g/m3

Especificações do Painel de Comando		Unidade	Descrições	
Tipo			Manual	Automático
Singelo Sem Rampa			DEEP SEA DS7320	
Singelo com Rampa			DEEP SEA DS8620	
Paralelo Sem Rampa			DEEP SEA DS8610 + DS331	
Paralelo com Rampa			DEEP SEA DS8610 + DS8660	
Tensão Trifásica	Vca		220 / 127 - 380 / 220 - 440 / 254	
Grau de Proteção			IP-23	
Dimensões (H x L x P)	mm		1200 x 600 x 255	
Proteção			Disjuntor manual termomagnético - tripolar fixo	
Conexão para Paralelismo entre Geradores			Disjuntor Motorizado	
Carregador de Baterias			Não	Sim

Especificações de Montagem		Unidade	Descrições	
Tipo			Aberto	Carenado
Sistema de Escape			Industrial de 3" com Segmento Elástico	Hospitalar de 4" com Segmento Elástico
Largura (L)	mm		1150	1150
Comprimento (C)	mm		2675	3126
Altura (H)	mm		1584	1756
Peso vazio	kg		1250	1602
Pintura			Eletrostática a pó em poliéster (base na cor preta e carenagem na cor azul)	
Tipo de Pintura			Texturizada	
Resistência a Salt Spray			Mínimo 500h (sobre chapa fosfatizada)	
Espessura da Pintura			80 µm [microtexturizada]	
Níveis de Ruídos	1,5 m	dB(A)	103	85
	7,0 m	dB(A)	98	ND
ND - Não Disponível				

2020



Fonte: MWM Geradores (2020).