

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Lucas Henrique Ranucci

**GERAÇÃO DISTRIBUÍDA: INTEGRAÇÃO DE GERAÇÃO SOLAR  
FOTOVOLTAICA COM BIOGÁS**

FLORIANÓPOLIS

2022

Lucas Henrique Ranucci

**GERAÇÃO DISTRIBUÍDA: INTEGRAÇÃO DE GERAÇÃO SOLAR  
FOTOVOLTAICA COM BIOGÁS**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Denizar Cruz Martins, Dr.

FLORIANÓPOLIS

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Ranucci, Lucas Henrique

GERAÇÃO DISTRIBUÍDA: INTEGRAÇÃO DE GERAÇÃO SOLAR  
FOTOVOLTAICA COM BIOGÁS / Lucas Henrique Ranucci ;  
orientador, Denizar Cruz Martins, 2022.

86 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Balanço de Potência. 3.  
Fontes Renováveis . 4. Energia Solar Fotovoltaica. 5.  
Biogás. I. Martins, Denizar Cruz. II. Universidade Federal  
de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III.  
Título.

Lucas Henrique Ranucci

**GERAÇÃO DISTRIBUÍDA: INTEGRAÇÃO DE GERAÇÃO SOLAR  
FOTOVOLTAICA COM BIOGÁS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Florianópolis, 28 de março de 2022.

---

Prof. Jean Viane Leite, Dr.

Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Denizar Cruz Martins, Dr.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

---

Dr. Antonio Luiz Schalata Pacheco, Dr.

Avaliador

Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Roberto Francisco Coelho, Dr.

Avaliador

Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais e familiares.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me acompanhar nesta jornada desde adentrar na faculdade até o presente momento de conclusão, agradeço aos meus pais Natalino Ranucci e Maria José da Silva Ranucci e a minha irmã Hellem Carla da Silva Ranucci que sempre me apoiaram e me deram força nos momentos difíceis durante o período de graduação.

Agradeço ao Professor Denizar Cruz Martins em aceitar o convite para ser o meu orientador, além disso, registro meu apreço pelas aulas que o mesmo lecionava, sempre excelentes e que assim me motivavam a estudar e me aprofundar nos conteúdos de suas disciplinas.

Agradeço ao Professor Claudio Santos do CEFET-MG que me auxiliou na ferramenta de simulação PSIM, disponibilizando seu tempo e conhecimento.

Agradeço aos demais professores e corpo docente da UFSC que me auxiliaram na obtenção do diploma, é visível o anseio de muitos destes professores por contribuir com a formação e o conhecimento científico de seus alunos.

Sou grato pela oportunidade de conseguir um estágio na Cooperativa. Considero o estágio importante para o desenvolvimento profissional do aluno pois agrega maior conhecimento a partir da possibilidade ofertada de utilizar e aplicar num contexto prático os conceitos teóricos aprendidos em sala de aula. Agradeço também pela oportunidade cedida em apresentar este trabalho desenvolvido no estágio e pela confiança do meu orientador em deixar sob minha responsabilidade a realização deste projeto.

Sou grato pelos amigos e colegas adquiridos ao longo dessa jornada e torço para desempenharem um ótimo trabalho na vida profissional.

“A vida não é sobre metas e conquistas, é sobre quem você se torna durante a caminhada”.

Phablo Ricardo

## RESUMO

Este trabalho propõe o balanço de potência, operando com a geração de energia elétrica por meio de um sistema solar fotovoltaica, juntamente com um conjunto de dois geradores de biogás operando em paralelo, ambos interligados com a rede da concessionária (sistema de geração distribuída), posteriormente o sistema supri três cargas. Destaca a importância das energias renováveis, o potencial de crescimento da geração de energia a partir do biogás. Compara os sistemas instalados em uma Cooperativa Agroindustrial e por meio do índice de fator de capacidade, indica o quanto cada sistema gera e o quanto que poderia estar gerando em seu máximo potencial. Utiliza um circuito Malha de Sincronismo de Fase (PLL) para realizar o sincronismo da rede com as gerações, contendo as principais informações como: fase, frequência e amplitude dos sinais de entrada. O sistema fotovoltaico apresenta por meio da simulação a conexão com a rede e a partir do inversor on-grid detalha os principais blocos para o funcionamento como: Seguidor do Ponto de Máxima Potência (MPPT) somado com conversor CC-CC, conversor CC-CA e o controle para comutação das chaves. Em contrapartida, na geração por biogás apresenta a máquina primária conectado à máquina síncrona e posteriormente sua conexão à rede. Foi utilizado o software PSIM como principal ferramenta para realizar a simulação e verificação dos valores e gráficos. Como análise final, os resultados do balanço de potência e de cada sistema de geração se apresentam muito satisfatórios.

**Palavras-chave:** Geração solar. Geração biogás. Balanço de potência.

## ABSTRACT

This work proposes the power balance, operating with the generation of electric energy through a photovoltaic solar system, together with a set of two biogas generators operating in parallel, both interconnected with the utility grid (distributed generation system), later the system supplies three loads. It highlights the importance of renewable energies, the growth potential of energy generation from biogas. It compares the systems installed in an Agroindustrial Cooperative and, through the capacity factor index, indicates how much each system generates and how much it could be generating at its maximum potential. It uses a Phase Locked Loop (PLL) circuit to synchronize the network with the generations, containing the main information such as: phase, frequency and amplitude of the input signals. The photovoltaic system presents, through simulation, the connection to the grid and, from the on-grid inverter, details the main blocks for operation such as: Maximum Power Point Tracker (MPPT) added with DC-DC converter, DC-AC converter and the control for switching the switches. On the other hand, in biogas generation, the primary machine is connected to the synchronous machine and then its connection to the grid. PSIM software was used as the main tool to perform the simulation and verification of values and graphs. As a final analysis, the results of the power balance and each generation system are very satisfactory.

**Keywords:** Solar generation. Biogas generation. Power balance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes de geração solar <i>on-grid</i> .....	19
Figura 2 – Circuito de geração solar.....	20
Figura 3 – Máximo ponto de potência.....	21
Figura 4 – Conversor CC/CC <i>boost</i> .....	21
Figura 5 – Conversor CC/CC <i>boost</i> primeira etapa de condução. ....	22
Figura 6 – Conversor CC/CC <i>boost</i> segunda etapa de condução.....	22
Figura 7 – Conversor CC-CA.....	24
Figura 8 – Controle do conversor CC-CA trifásico.....	25
Figura 9 – Alimentação do enrolamento de campo através dos anéis coletores. ....	27
Figura 10 – (a) Máquina síncrona (b) Tensão senoidal bobina “a”.....	28
Figura 11 – Módulos fotovoltaicos instalados na cobertura (a) Conjunto 1 (b) Conjunto 2....	30
Figura 12 – (a) Inversor <i>on-grid</i> (b) Placa de dados do inversor. ....	30
Figura 13 – Ligação dos módulos no inversor. ....	31
Figura 14 – (a) Transformador a seco (b) Placa de dados do transformador. ....	31
Figura 15 – Curvas de máxima potência dos módulos fotovoltaicos.....	32
Figura 16 – Biodigestor de tratamento dos líquidos e armazenamento do gás. ....	34
Figura 17 – Sistema de segurança (a) Queimadores (b) Válvula de segurança. ....	35
Figura 18 – Placa de dados gerador.....	36
Figura 19 – (a) Ignição motor a combustão (b) Gerador a biogás.....	36
Figura 20 – Filtro do gás. ....	37
Figura 21 – QTA do gerador. ....	37
Figura 22 – QTA (a) Controlador do gerador (b) Sonda lambda. ....	38
Figura 23 – Monitoramento dos geradores.....	39
Figura 24 – Fluxo de potência do sistema. ....	46
Figura 25 – Geração renovável maior que a carga. ....	46
Figura 26 – Geração renovável igual a carga. ....	47
Figura 27 – Geração renovável menor que a carga. ....	48
Figura 28 – Geração renovável nula.....	48
Figura 29 – Curvas características do painel solar a partir do PSIM. ....	49
Figura 30 – FB-PLL trifásico. ....	50
Figura 31 – Fase e frequência do sinal de entrada.....	51
Figura 32 – Amplitude do sinal de entrada. ....	51

Figura 33 – Reconstrução do sinal de saída baseado no sinal de entrada. ....	52
Figura 34 – Painel solar com conversor CC-CC <i>boost</i> .....	53
Figura 35 – Fluxograma da técnica Perturba e Observa.....	54
Figura 36 – Sistema do controle P&O no PSIM. ....	55
Figura 37 – Circuito de controle do inversor CC-CA. ....	57
Figura 38 – Circuito comparador para geração do SPWM. ....	58
Figura 39 – Layout geração fotovoltaica, módulos fotovoltaico e inversor.....	59
Figura 40 – Curva potência dos módulos e potência injetada na rede. ....	60
Figura 41 – Geração de energia fotovoltaica trifásica.....	61
Figura 42 – Variações de correntes da geração fotovoltaica, rede e das cargas.....	61
Figura 43 – Variação de potência no inversor <i>on-grid</i> .....	62
Figura 44 – Considerando os degraus de carga em 0,3 s; em 0,5 s e em 0.85 s com o desligamento do sistema fotovoltaico.....	63
Figura 45 – Gerador a biogás PSIM. ....	64
Figura 46 – Correntes das gerações a biogás, rede e das cargas. ....	65
Figura 47 – Variações das correntes com desligamento das gerações. ....	65
Figura 48 – Layout do sistema implementado no PSIM apenas com geração a biogás.....	66
Figura 49 – Layout de conexão dos equipamentos e carga no PSIM.....	68
Figura 50 – Geração maior que a carga.....	69
Figura 51 – Geração de energia igual a carga. ....	70
Figura 52 – Geração de energia igual a carga com degrau de carga. ....	71
Figura 53 – Geração e rede drenando a carga. ....	71
Figura 54 – Geração renovável inferior a carga com degrau de carga.....	72
Figura 55 – Geração inferior a carga com degrau de carga e degrau na geração.....	73
Figura 56 – Geração renovável nula.....	74
Figura 57 – Geração renovável nula com degrau de carga.....	75

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Nível dos reservatórios região Sudoeste e Centro-Oeste. ....	17
Gráfico 2 – Produção de energia solar ano 2021.....	33
Gráfico 3 – Tensão e corrente gerador 1 .....	40
Gráfico 4 – Potência gerada no gerador 1 .....	40
Gráfico 5 – Consumo de gás gerador 1 .....	41
Gráfico 6 – Tensão e corrente gerador 2 .....	42
Gráfico 7 – Potência gerada no gerador 2 .....	42
Gráfico 8 – Consumo de gás gerador 2 .....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre biogás purificado e outros combustíveis. ....	26
Tabela 2 – Velocidade síncrona.....	28
Tabela 3 – Geração do biogás.....	44
Tabela 4 – Dados do projeto do conversor <i>boost</i> . ....	52
Tabela 5 – Componentes conversor <i>boost</i> . ....	53

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABiogás	Associação Brasileira do Biogás
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CONT	Bloco de Controle
DFA	Análise Dinâmica de Fourier (do inglês, Dynamic Fourier Analysis)
DFS	Síntese Dinâmica de Fourier (do inglês, Dynamic Fourier Synthesis)
FB-PLL	Baseado no Fourier – Malha de Sincronismo de Fase (do inglês, Fourier Based - Phase Locked Loop)
GD	Geração Distribuída
MPP	Ponto de Máxima Potência (do inglês, Maximum Power Point)
MPPT	Seguidor do Ponto de Máxima Potência (do inglês, Maximum Power Point Tracker)
OSR	Reconstrução do Sinal de Original (do inglês, Original Signal Reconstruction)
PD	Detector de Fase (do inglês, Phase Detector)
PI	Proporcional Integral
PLL	Malha de Sincronismo de Fase (do inglês, Phase Locked Loop)
PWM	Modulação por Largura de Pulso (do inglês, Pulse Width Modulation)
QTA	Quadro de Transferência
SM	Máquina Síncrona (do inglês, Synchronous Machine)
SPWM	Modulação por Largura de Pulso Senoidal (do inglês, Sinusoidal Pulse Width Modulation)
UPD	Unidade de Produção de Desmamados
UPL	Unidade de Produção de Leitos

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta I_{Lb}$	Variação da corrente de entrada boost
$\Delta V_{Ob}$	Variação da tensão de saída boost
$C_b$	Capacitor boost
C	Carbono
H	Hidrogênio
O	Oxigênio
$C_{m\acute{a}x}$	Capacidade máxima de geração do sistema
$D_b$	Diodo boost
$d_s$	Dias
$E_b$	Tensão de entrada boost
$FC_{BG1}$	Fator de capacidade da geração do biogás 1
$FC_{BG2}$	Fator de capacidade da geração do biogás 2
$FC_{BGT}$	Fator de capacidade da geração do biogás total
$FC_{FV}$	Fator de capacidade da geração fotovoltaica
$f_{sb}$	Frequência de comutação boost
$f_{sca}$	Frequência de comutação inversor
$f_a$	Frequência de amostragem
$f_{nyq}$	Frequência de Nyquist
$f_z$	Frequência uma década abaixo do cruzamento por zero (malha de tensão)
$f_{cz}$	Frequência de cruzamento por zero (malha de tensão)
$z$	zero do compensador do PT (malha de tensão)
$h_{rs}$	Horas
$I_{Ob}$	Corrente de saída boost
$I_{Dmedb}$	Corrente média no diodo boost
$I_{Eb}$	Corrente média de entrada boost
$I_{LMb}$	Corrente máxima no indutor boost
$I_{Lmb}$	Corrente mínima no indutor boost
$I_{Lmedb}$	Corrente média no indutor boost
$I_{Smedb}$	Corrente média na chave de comutação boost
$L_b$	Indutor boost

$L_{ac}$	Indutância de acoplamento com a rede
$R_{ac}$	Resistência de acoplamento com a rede
$r_{on}$	Resistência da chave de comutação
$P_{BG1}$	Potência da geração do biogás 1
$P_{BG2}$	Potência da geração do biogás 2
$P_{BGT}$	Potência da geração do biogás total
$P_{C1}$	Potência da carga 1
$P_{C2}$	Potência da carga 2
$P_{C3}$	Potência da carga 3
$P_{CT}$	Potência da carga total
$P_{FV}$	Potência da geração fotovoltaica
$P_{m\acute{a}x}$	Potência máxima de geração do sistema
$P_{m\acute{a}x,med}$	Potência máxima medida do sistema de geração
$P_{m\acute{a}x,ps}$	Máxima potência do painel solar
$P_R$	Potência da rede da concessionária
$P_{Ob}$	Potência de saída conversor boost
$S_b$	Chave de comutação boost
$V_{ob}$	Tensão de saída boost
$A_{ps}$	Área do painel solar
$C_d(s)$	Controlador PI transformada d
$C_q(s)$	Controlador PI transformada q
$k_p$	Ganho controlador PI (malha de corrente)
$k_i$	Ganho controlador PI (malha de corrente)
$K_i$	Ganho do controlador PI (malha de tensão)
$\tau_i$	Constante de tempo
$D$	Duty cycle
$E_{fe}$	Eficiência energética
$FC$	Fator de capacidade
$GW$	Gigawatts
$G(s)$	Função de transferência indutor
$G_v(s)$	Função de transferência malha de tensão
$C_i(s)$	Função de transferência do compensador malha de tensão
$M$	Ganho de modulação em amplitude

P&O	Perturba e Observa
$C_{ap}$	Capacitor barramento CC inversor
$\lambda$	Mistura de combustível

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	16
1.1.1	Objetivo Geral.....	16
1.1.2	Objetivos Específicos .....	16
<b>2</b>	<b>FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS .....</b>	<b>17</b>
2.1	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	18
2.1.1	Sistema de geração solar fotovoltaica .....	19
2.1.2	MPPT .....	20
2.1.3	Conversor CC-CC .....	21
2.1.4	Conversor CC-CA .....	24
2.2	BIOGÁS .....	25
2.2.1	Alternador .....	27
<b>3</b>	<b>SISTEMAS EXISTENTES .....</b>	<b>29</b>
3.1	SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICA .....	29
3.2	BIOGÁS .....	34
<b>4</b>	<b>BALANÇO DE POTÊNCIA.....</b>	<b>45</b>
4.1	GERAÇÃO RENOVÁVEL MAIOR DO QUE A CARGA .....	46
4.2	GERAÇÃO RENOVÁVEL IGUAL A CARGA .....	47
4.3	GERAÇÃO RENOVÁVEL INFERIOR A CARGA .....	47
4.4	GERAÇÃO RENOVÁVEL NULA .....	48
<b>5</b>	<b>RESULTADO DAS SIMULAÇÕES .....</b>	<b>49</b>
5.1	SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICA .....	49
5.1.1	FB-PLL Trifásico.....	50
5.1.2	MPPT .....	52
5.1.3	Controle do Inversor .....	55
5.1.4	Sistema solar fotovoltaico operando <i>on-grid</i> .....	58
5.1.5	Sistema solar fotovoltaico operando <i>on-grid</i> juntamente com as cargas.....	60

5.2	BIOGÁS .....	63
5.3	BALANÇO DE POTÊNCIA.....	66
<b>5.3.1</b>	<b>Geração renovável maior do que a carga.....</b>	<b>68</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Geração renovável igual a carga.....</b>	<b>69</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Geração renovável inferior a carga.....</b>	<b>71</b>
<b>5.3.4</b>	<b>Geração renovável nula.....</b>	<b>73</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>76</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>78</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A dependência energética brasileira pela geração das hidroelétricas é muito elevada, por mais que o Brasil contenha um dos maiores recursos hídricos do mundo, devido à escassez de chuva, os reservatórios não estão conseguindo se recuperar (ELIAS, 2021).

Uma forma de contornar essa dependência energética é o investimento em fontes renováveis operando no regime de Geração Distribuída (GD). As GDs são centrais de geração de qualquer potência conectadas na rede de distribuição. Na atualidade, a produção de energia solar fotovoltaica e a produção de energia eólica têm se destacado como formas alternativas para geração de energia, devido a sua viabilidade prática e econômica, contudo outra alternativa é destacada no presente trabalho, a de geração energética a partir do biogás, que apresenta perspectivas promissoras.

Os sistemas solares fotovoltaicos estão divididos em dois grupos: isolados ou conectados na rede. Quando operam isoladamente, além dos módulos e do inversor *on-grid*, necessitam de baterias para o armazenamento.

Para o funcionamento da geração solar além de todos os periféricos como módulos fotovoltaicos, sistemas de proteções e medidor bidirecional é no inversor que se encontram os conversores CC-CC para elevação ou redução da tensão contínua fornecida pelos módulos, conversor CC-CA para transformar a corrente contínua em alternada e o Seguidor do Ponto de Máxima Potência (MPPT) responsável por garantir a máxima potência fornecida pelos módulos fotovoltaicos, ou seja, todo o controle do sistema está no inversor.

Mesmo com os investimentos realizados nas energias renováveis, vale ressaltar que as fontes de gerações principais como: hidroelétricas, térmicas, nucleares., permaneceram fornecendo a maior parte da demanda para o sistema elétrico, pois as gerações renováveis apresentam variações e oscilações que podem impactar na confiabilidade do sistema.

Esse TCC foi motivado pela gestão energética da Cooperativa, no qual os principais investimentos nessa área são da geração a partir de biogás, apresentando uma crescente expansão na sua Unidade de Produção de Leitos (UPL) e na recém construída Unidade de Produção de Desmamados (UPD). Vale destacar que a Cooperativa está diversificando sua matriz energética, realizando investimentos e implementando seus primeiros sistemas de geração solar fotovoltaica.

## 1.1 OBJETIVOS

Nesse capítulo estão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos abordados durante este trabalho e que serviram como direcionamento para a realização do mesmo.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Realizar o balanço de potência do sistema de geração distribuída, contendo uma geração solar e dois geradores de biogás.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

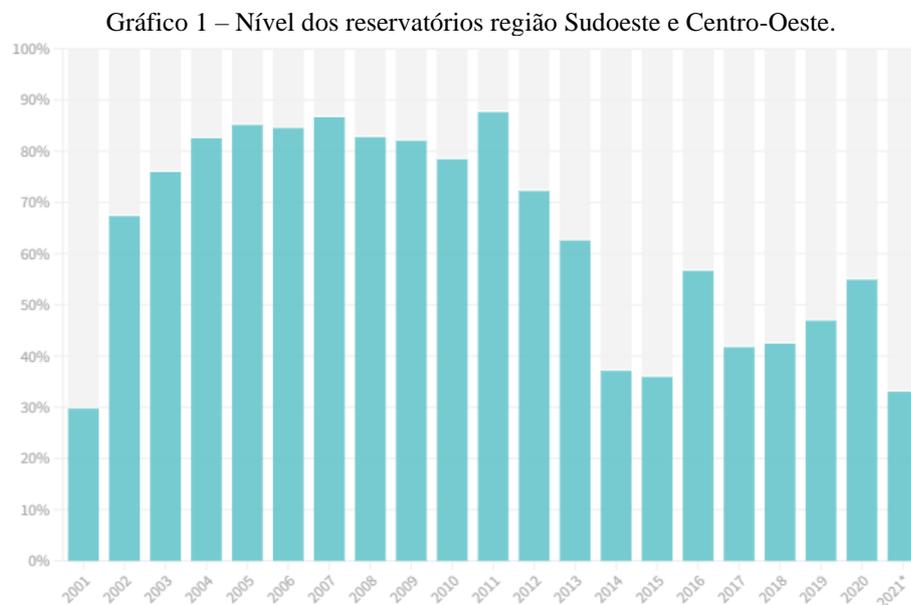
Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Comparação entre os dois sistemas de energias renováveis: biogás e solar fotovoltaica;
- Estudo dos sistemas instalados e sua viabilidade;
- Estudo dos blocos que controlam um inversor *on-grid*;
- Estudo da geração a partir do biogás;
- Análise e comparação das simulações realizadas.

O trabalho está dividido em cinco capítulos. O Capítulo 2 apresenta o estudo da geração solar fotovoltaica, contendo os blocos de controle e o estudo da geração a biogás. No Capítulo 3 expõe os sistemas instalados, e realiza as análises da sua produção de energia e viabilidade. O Capítulo 4 exhibe os cenários do balanço de potência que o sistema deve atender. Os resultados das simulações de ambos os sistemas e dos balanços de potência referidos no Capítulo 5. Por fim, no Capítulo 6 apresenta a conclusão e as ponderações do trabalho desenvolvido conjuntamente com a apresentação de sugestões para melhorias e pesquisas futuras na área.

## 2 FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS

Nas últimas décadas os reservatórios hídricos brasileiros têm apresentados níveis críticos, onde a principal justificativa é caracterizada pela escassez de chuva, destacando que em 2001 teve-se um apagão ocasionado pelo baixo nível do reservatório. Observando o gráfico 1 nota-se que a partir do ano de 2012 o nível dos reservatórios apresenta dificuldade de se reestabelecer em níveis adequados. Este cenário impacta na elevação dos custos de produção na energia elétrica a partir das termoelétricas, com isso, os custos são redistribuídos aos consumidores nas faturas de energia elétrica por meio de taxas como a bandeira vermelha (ELIAS, 2021).



Fonte: jornal CNN Brasil<sup>1</sup> (\*2021 até 17/05)

Apesar dos obstáculos, a energia produzida pelas hidroelétricas é considerada uma fonte de energia renovável e a sua contribuição é imprescindível no setor elétrico brasileiro. Em decorrência estão sendo realizados investimentos em novas fontes de energia renováveis, e com a operação dessas novas fontes interligadas no sistema elétrico brasileiro, ter-se-á uma menor demanda de potência das hidroelétricas, implicando no menor consumo dos seus reservatórios.

<sup>1</sup> Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/business/como-a-falta-de-chuva-recorde-esta-fazendo-sua-conta-de-luz-ficar-mais-cara/>>. Acesso em: 10 jan. 2022.

Vale destacar que o Brasil possui uma das matrizes elétricas mais limpas do mundo. A participação das fontes renováveis na matriz elétrica é de 85%, dos quais aproximadamente 60% correspondem à fonte hidráulica, 8% à biomassa, 11% à eólica, 2% a solar centralizada e 5% à geração distribuída, majoritariamente proveniente de painéis solares (ANEEL, 2022, p. 01).

O foco principal deste trabalho se dará em duas fontes de energias renováveis, a solar fotovoltaica e a biogás, as quais serão discutidas nas seções posteriores.

## 2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Atualmente no Brasil, totaliza-se 9 GW de geração solar, proveniente de 828 mil sistemas operando conectados à rede, sendo 44,3% de consumidores residenciais, 33,1% de consumidores comerciais, 13,6% de consumidores rurais, 7,7% de consumidores industriais e os 1,3% restantes distribuídos entre consumidores do poder público, setor público e iluminação pública (LUNA, 2022).

A eficiência de um módulo fotovoltaico é um parâmetro que indica o quanto de irradiância solar que incide na superfície do módulo é convertida em energia elétrica. Esse parâmetro é medido em porcentagem e pode ser calculado utilizando-se a equação 2.1 (SVARC, 2022).

$$E_{fe} = \frac{P_{\text{máx.ps}}}{A_{ps} \cdot 1000} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Nos últimos anos a eficiência média de conversão em um módulo fotovoltaico aumentou de 15% para 20%, este avanço implica em um aumento de potência de um módulo padrão de 250 W para 330 W. Nos dias atuais, o módulo fotovoltaico mais eficiente encontrado no mercado apresenta uma taxa de 22,6% de conversão (SVARC, 2022).

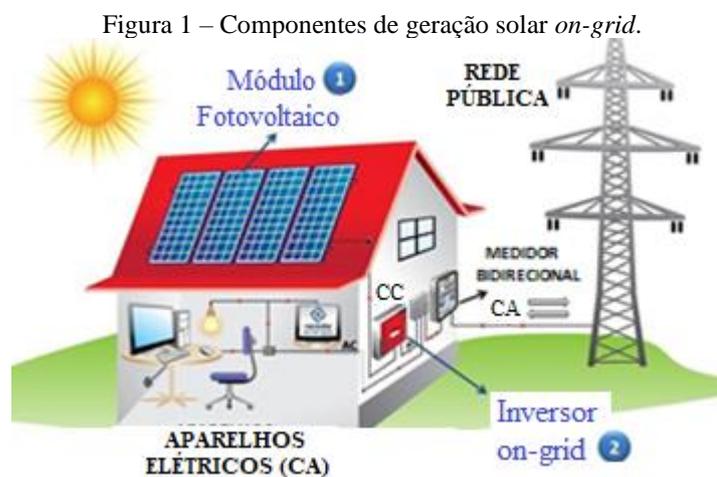
Uma das vantagens do aumento da eficiência é a diminuição da quantidade de área necessária para a instalação de um sistema. Outros benefícios são: o tempo de reembolso que será menor e o sistema que gerará mais energia durante seu tempo de vida médio que é de 20 anos, atualmente (SVARC, 2022).

Por outro lado, há alguns fatores práticos que interferem na eficiência dos módulos, são eles: irradiância, sombreamento, orientação do módulo, temperatura, localização

(latitude), período anual (clima) e acumulação de poeira e outros sedimentos sobre os módulos (SVARC, 2022).

### 2.1.1 Sistema de geração solar fotovoltaica

Os principais componentes que contemplam um sistema fotovoltaico interligado com a rede são: módulos fotovoltaicos, inversor *on-grid*, componentes de proteção e o medidor bidirecional. Pode-se observar na figura 1 como são interligados os componentes.

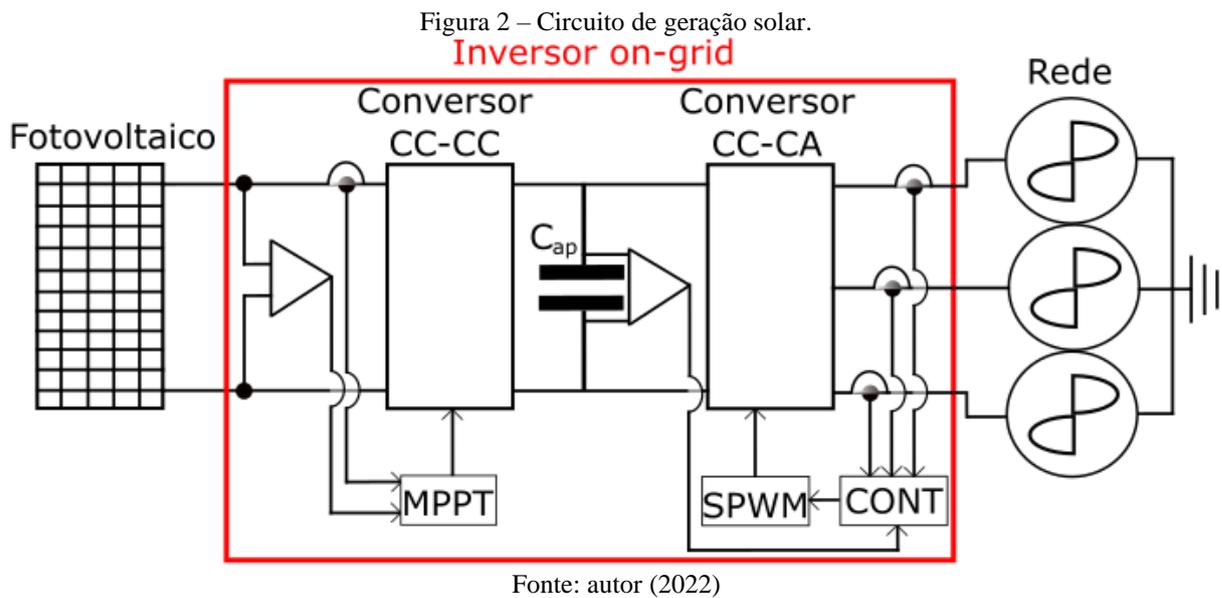


Dos componentes que englobam o sistema de geração solar fotovoltaica, para o correto funcionamento do sistema está presente os periféricos como: módulos fotovoltaicos, sistema de proteção, medidor bidirecional, além destes uma das peças fundamentais para o correto funcionamento é o inversor *on-grid*, pois nos sistemas que são conectados à rede elétrica ele é o responsável por realizar a interligação das tensões CC dos módulos fotovoltaicos com a tensão CA da rede.

É apresentado na figura 2 o circuito de geração solar com a expansão do inversor *on-grid*, indicando os demais componentes necessários para seu funcionamento. Tem-se o sensor de tensão e de corrente no lado CC monitorando as grandezas dos módulos fotovoltaicos e enviando as medições ao MPPT para garantir a máxima potência dos módulos, a partir das informações enviadas pelo MPPT ocorre o chaveamento do conversor CC-CC por meio da Modulação por Largura de Pulso (PWM).

<sup>2</sup> Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/energia-solar-fotovoltaica>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

Ainda sobre a figura 2, no lado CA tem-se os sensores de corrente enviando as medições ao Bloco de Controle (CONT), no barramento CC, tem um sensor de tensão enviando a medição ao CONT, após o processamento dos dados pelo CONT são gerados e enviados sinais senoidais para a comparação com o sinal da portadora na Modulação por Largura de Pulso Senoidal (SPWM). Com isso, é possível realizar a comutação das chaves do conversor CC-CA.

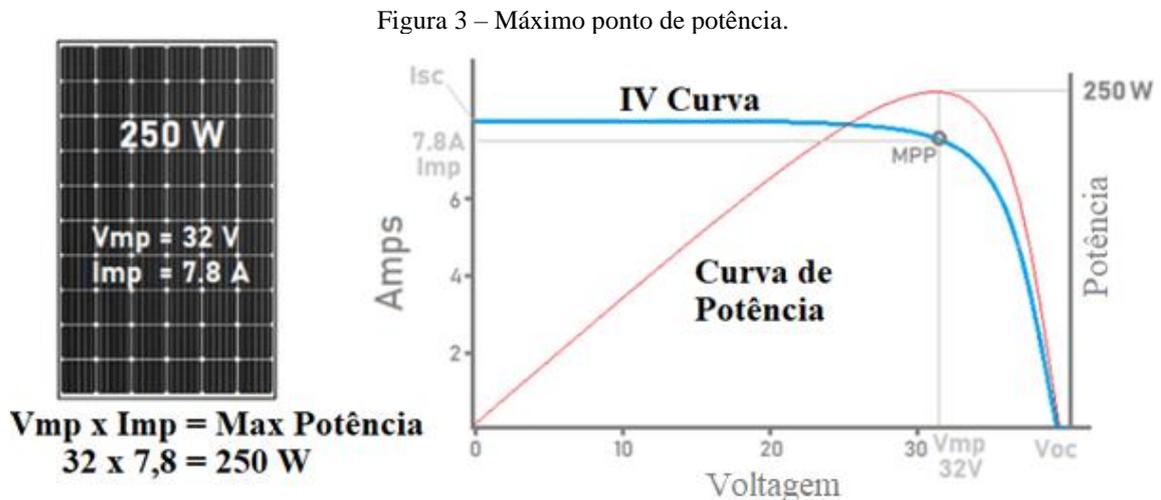


### 2.1.2 MPPT

O primeiro MPPT foi criado pela empresa AERL em 1985, proporcionando o uso dessa tecnologia em praticamente todos os inversores solares conectados à rede. O MPPT é um conversor CC/CC, cujo princípio de funcionamento é rastrear o ponto com a melhor combinação de tensão e corrente para gerar a máxima potência, isto é necessário visto que durante o dia há variações da irradiância solar e das condições climáticas impactando na quantidade de energia produzida. O uso dessa tecnologia pode aumentar a energia produzida pelos módulos fotovoltaicos em até 30% se o mesmo sistema for controlado por razão cíclica fixa (SVARC, 2020).

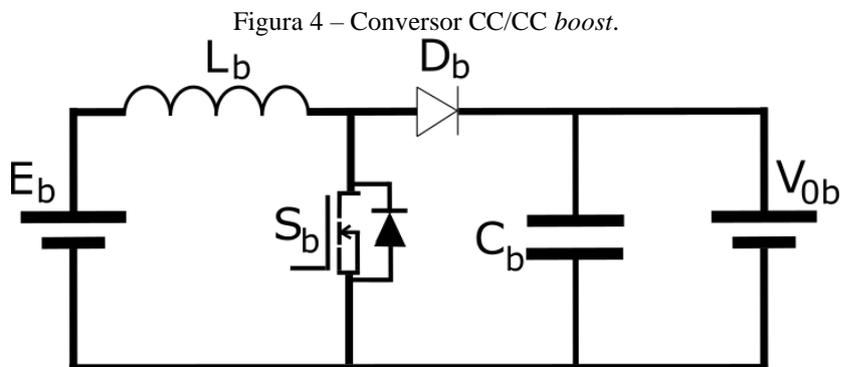
A figura 3 apresenta um módulo fotovoltaico com potência máxima total de 250 W, tensão de 32 V e corrente de 7,8 A onde esses valores estão considerando uma temperatura de 25 °C e uma irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup>, ao analisarem as curvas representadas no módulo no ponto de intercessão Ponto de Máxima Potência (MPP) da corrente e tensão dos valores

citados, tem-se a máxima potência fornecida pelo módulo. Ao variar a temperatura ou a irradiância, encontram outros valores de tensão e corrente onde o MPPT estará garantindo o melhor ponto de intercessão.



### 2.1.3 Conversor CC-CC

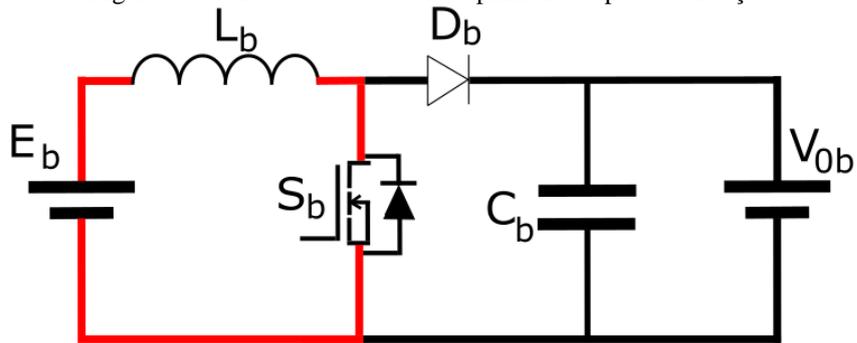
O conversor CC-CC considerado para o trabalho foi um *boost*, que é um circuito elevador de tensão e está representado na figura 4, o qual é composto de um capacitor ( $C_b$ ), um indutor ( $L_b$ ), uma chave de comutação ( $S_b$ ), um diodo ( $D_b$ ), uma fonte de alimentação CC ( $E_b$ ) que está representando o módulo fotovoltaico e a carga representada por uma fonte de saída ( $V_{0b}$ ), sendo o barramento CC que alimenta o conversor CC-CA.



<sup>3</sup> Disponível em: <<https://www.cleanenergyreviews.info/blog/mppt-solar-charge-controllers>>. Acesso em: 24 fev. 2022.

O conversor *boost* pode ser separado em duas etapas de operação: *on* e *off*. A etapa *on* pode ser observada na figura 5, na qual ocorre o armazenamento de energia no indutor, estando indicado em vermelho o caminho que a corrente percorre enquanto a chave de comutação está acionada, sendo que o restante do circuito fica sem alimentação devido ao diodo estar polarizado inversamente.

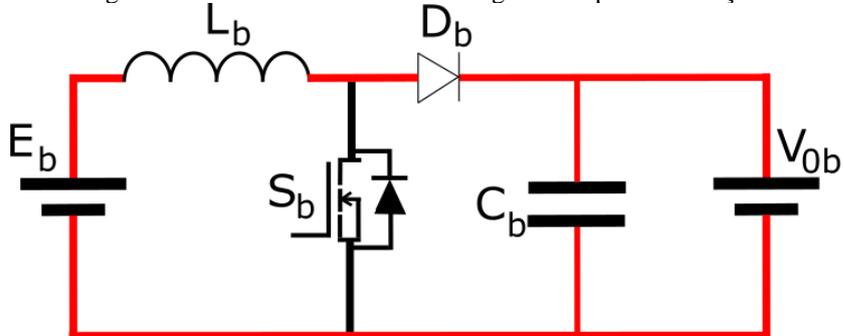
Figura 5 – Conversor CC/CC *boost* primeira etapa de condução.



Fonte: autor (2022)

A segunda etapa de funcionamento do conversor *boost* é representada na figura 6, se dá no momento em que a chave para de conduzir (*off*). Dessa forma, o diodo é polarizado diretamente e entra em condução, novamente em vermelho está destacado o caminho que a corrente percorre enquanto o diodo está fechado, com isso, a fonte de tensão da entrada  $E_b$  juntamente com o indutor  $L_b$ , fornecem energia para a fonte de tensão na saída  $V_{0b}$  e armazena energia no capacitor. O conversor retorna para primeira etapa após o fechamento da chave  $S_b$ .

Figura 6 – Conversor CC/CC *boost* segunda etapa de condução.



Fonte: autor (2022)

Para o desenvolvimento do projeto do conversor *boost* foram utilizadas as equações de 2.2 até 2.9, com elas foi possível determinar os componentes para o projeto e os esforços que

esses componentes devem suportar (MARTINS, BARBI, 2006). A equação 2.2 determina a razão cíclica, responsável pelo tempo de condução da chave. Com a equação 2.3 foi determinado o valor da capacitância, sendo que a variação desejada na onda de saída é especificada pelo projetista e inserida por meio do item ( $\Delta V_{0b}$ ). A partir da equação 2.4 foi possível determinar o indutor para o projeto do *boost*, novamente frisando que a variação de corrente é determinada pelo projetista.

$$\frac{V_{0b}}{E_b} = \frac{1}{1-D} \quad \rightarrow \quad D = 1 - \frac{E_b}{V_{0b}} \quad (2.2)$$

$$C_b = \frac{D \cdot I_{0b}}{f_{sb} \cdot \Delta V_{0b}} \quad (2.3)$$

$$L_b = \frac{D \cdot E_b}{f_{sb} \cdot \Delta I_{Lb}} \quad (2.4)$$

Com a equação 2.5 conseguiu-se calcular o valor médio de corrente de entrada, sendo a mesma corrente que percorre o indutor. Já a equação 2.6 apresenta a máxima corrente que passa no indutor e opostamente a equação 2.7 apresenta a mínima corrente que percorre o indutor.

$$I_{Eb} = I_{Lmedb} = \frac{I_{0b}}{1-D} \quad (2.5)$$

$$I_{LMb} = I_{Lmedb} + \frac{\Delta I_{Lb}}{2} \quad (2.6)$$

$$I_{Lmb} = I_{Lmedb} - \frac{\Delta I_{Lb}}{2} \quad (2.7)$$

A corrente média que percorre a chave de comutação pode ser calculada com a equação 2.8, já a corrente média do diodo pode ser determinada por meio da equação 2.9.

$$I_{Smedb} = \frac{(I_{LMb} + I_{Lmb}) \cdot D}{2} \quad (2.8)$$

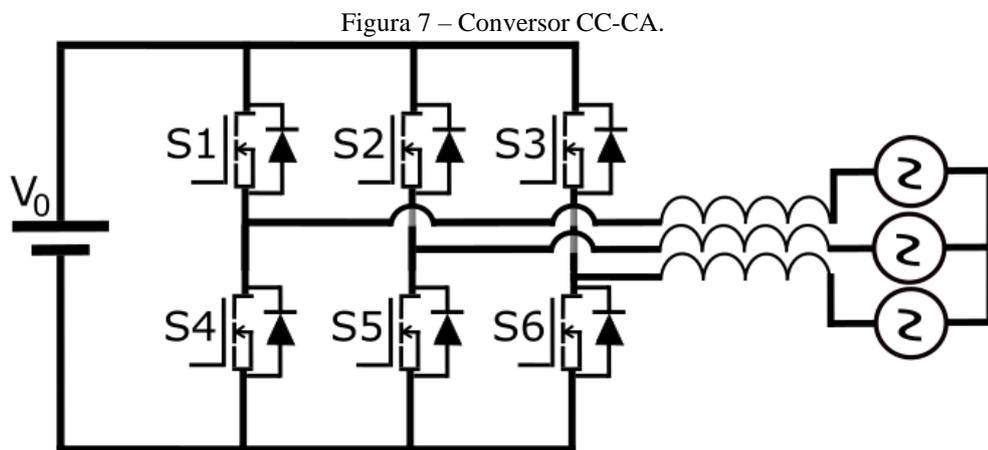
$$I_{Dmedb} = \frac{(I_{LMb} + I_{Lmb}) \cdot (1-D)}{2} \quad (2.9)$$

### 2.1.4 Conversor CC-CA

Os conversores CC-CA ou inversores devem ser capazes de fornecer uma corrente ou tensão com qualidades aceitáveis, seguindo as normas e recomendações da ANEEL (Resolução Normativa n° 482/2012, sendo modificada pela n° 687/2015, posteriormente pela n° 786/2017) ou das concessionárias de energia do seu estado. Quando os inversores estiverem conectados na rede CA no sistema de geração distribuída, sua tensão é definida pelo sistema, dessa forma, o inversor é responsável por controlar a injeção ou absorção de corrente, consequentemente controlando a potência (POMILIO, 2013).

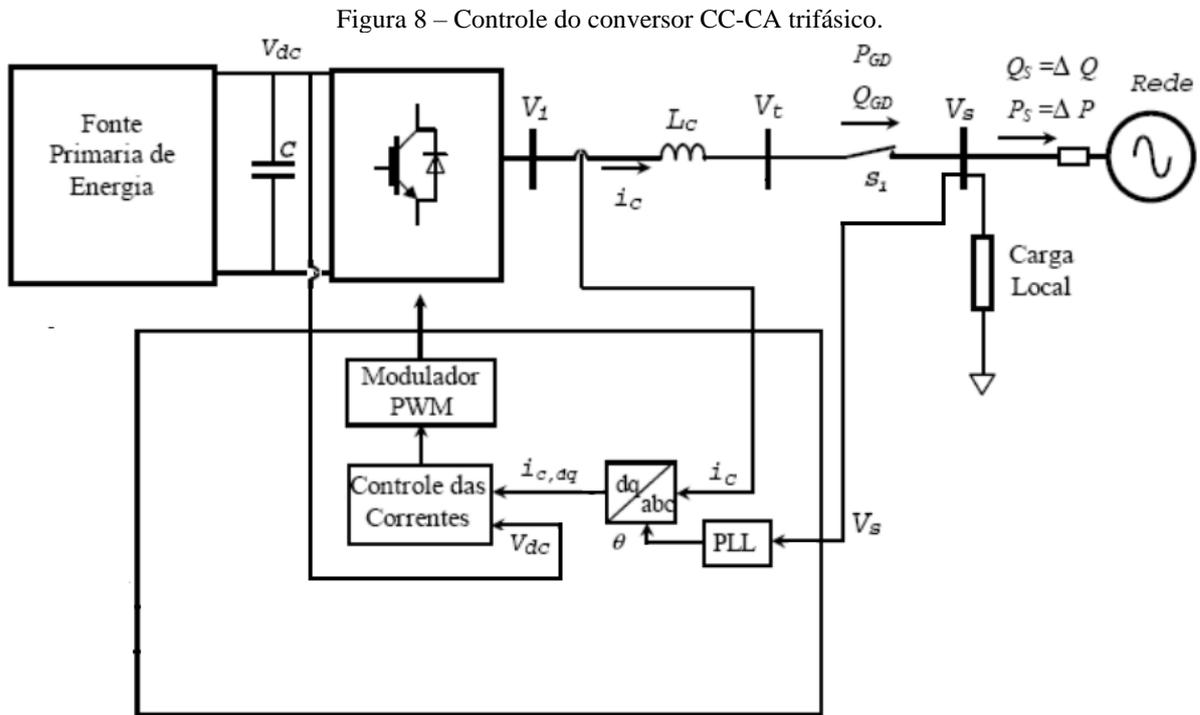
O inversor do tipo fonte de tensão sempre deverá ter sua conexão realizada por meio de indutores de acoplamento que atuam no controle da corrente e sobre a potência produzida. A fim de que o controle da corrente ocorra como o esperado, deve-se ter uma tensão contínua superior ao valor de pico da tensão alternada (POMILIO, 2013).

Na figura 7 tem-se o conversor CC-CA que é alimentado pela fonte  $V_0$  no barramento CC, após encontra-se a ponte das chaves de comutação (S1...S6), as chaves não podem ser acionadas no mesmo braço pelo fato ocasionando curto-circuito e danificando o inversor. Ao final indica-se a rede de alimentação.



Fonte: autoria (2022)

Segundo Pomilio (2013), uma ideia de controle de um inversor trifásico está apresentada na figura 8, em que se faz a transformação do sistema trifásico em sistema bifásico girante dq, controlando a potência ativa e a reativa, é necessário também um circuito Malha de Sincronismo de Fase (PLL) para realizar o sincronismo das tensões da rede.



Fonte: adaptada do livro POMILIO<sup>4</sup> (2013)

## 2.2 BIOGÁS

O biogás é produzido através da decomposição de matéria orgânica por meio de processos químicos gerando o gás metano, combustível que é utilizado para transformar a energia do processo químico em energia mecânica por meio do processo de combustão e, posteriormente, a energia mecânica é transformada em energia elétrica pelos biogeradores. Normalmente o gás é composto de 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% composto de uma mistura contendo hidrogênio, nitrogênio, amônia, ácido sulfídrico, monóxido de carbono, aminas e oxigênio (ECYCLE, 2019).

A Associação Brasileira do Biogás (ABiogás) afirmou que até o final do ano de 2021 o biogás terá um crescimento de 30% em relação ao ano de 2020. Trata-se de uma fonte

<sup>4</sup> Disponível em: <<https://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/files/it744/cap5.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2022.

energética com um potencial grandioso, tanto quanto a energia eólica e a solar. O Brasil tem o maior potencial do mundo para a produção do biogás, tanto que se os resíduos da agropecuária e do saneamento fossem utilizados para a produção de biogás, seria possível suprir entorno de 35% da demanda energética brasileira (LUNA, 2021).

O metano ( $\text{CH}_4$ ) tem potencial de efeito estufa 21 vezes maior que o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), logo o  $\text{CH}_4$  é muito agravante para o efeito estufa, contribuindo para o aquecimento global e por esse motivo o metano não deve ser lançado na atmosfera diretamente, logo o  $\text{CH}_4$  é transformado em  $\text{CO}_2$  por meio de sua queima. Sabe-se que o potencial calorífico do biogás varia em função da presença de metano em sua composição, sendo que quanto mais metano mais rico é o biogás. A geração de energia elétrica do biogás está diretamente interligada com a produção do gás, que justamente por se tratar de um gás, suas características dependem de pressão, temperatura, umidade, concentração do metano e demais gases, ou seja, com a variação do biogás pode-se ter variações na energia como corrente, frequência, tensão, potência, entre outros (COSTA, 2006).

É interessante realizar a comparação da capacidade calorífica do biogás em relação aos outros combustíveis encontrados na natureza, esses dados podem ser consultados na tabela 1.

Tabela 1 – Comparação entre biogás purificado e outros combustíveis.

<b>Combustíveis</b>	<b>1 m<sup>3</sup> de biogás equivale a</b>
Gasolina	0,613 l
Querosene	0,579 l
Óleo diesel	0,553 l
Gás de cozinha (GLP)	0,454 l
Lenha	1,536 kg
Álcool hidratado	0,790 l
Eletricidade	1,428 kWh

Fonte: adaptada Barreta<sup>5</sup> (2003)

Tratando da eficiência energética de geradores a biogás com potência instalada em torno de 30 kW até 20 MW, com o princípio de funcionamento do motor ciclo Otto tocado a gás, o rendimento elétrico está entre 30% a 40% (CENBIO, 2003).

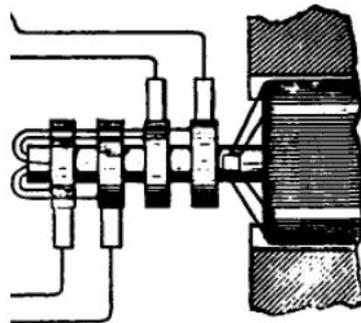
<sup>5</sup> BARRERA, Paulo. **Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural**. Editora Ícone, São Paulo, 2ª Ed., 2003.

### 2.2.1 Alternador

O alternador é a peça fundamental para a geração da energia, recebe a energia mecânica proveniente da máquina primária e a converte em energia elétrica. As máquinas síncronas são importantes fontes de geração de energia, que ao serem consideradas em um cenário onde uma máquina primária impulsiona o alternador, são responsáveis por cerca de 99% da potência gerada (LEÃO, 2016).

As máquinas síncronas são compostas por duas partes principais, o estator que representa a parte fixa e o rotor que representa a parte móvel. No estator estão presentes os enrolamentos de armadura e no rotor encontram-se os enrolamentos de campo. O enrolamento de campo é excitado por uma corrente contínua que geralmente é levada até o enrolamento do rotor através de anéis coletores juntamente com escovas de carvão, para uma melhor compreensão na figura 9 apresenta-se os anéis coletores e as escovas. Em sistemas mais modernos a excitação ocorre a partir da excitatriz CA e de retificadores de estado sólido acoplados diretamente no rotor que é conhecido como excitação sem escova. Outros sistemas que utilizam a excitatriz CA e retificadores fixados na carcaça da máquina precisam do sistema de escova para indução da corrente (FITZGERALD, UMANS, KINGSLEY JR, 2006).

Figura 9 – Alimentação do enrolamento de campo através dos anéis coletores.

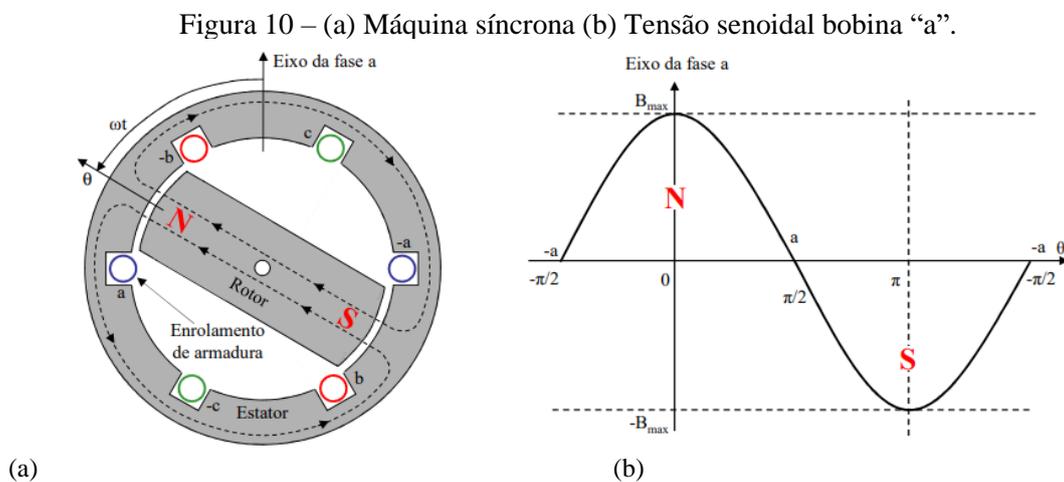


Fonte: slide Fabio Leão<sup>6</sup> (2016)

O enrolamento de armadura consiste em três bobinas de  $N$  espiras apresentado na figura 10 (a), contendo os enrolamentos a-a, b-b e c-c que estão alojados nas ranhuras do estator e distribuídos geometricamente defasados de  $120^\circ$  (LEÃO, 2016). À medida que o

<sup>6</sup> Disponível em: <[https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/slides-2016-cap5\\_eletrotecnica\\_fabioleao.pdf](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/slides-2016-cap5_eletrotecnica_fabioleao.pdf)>. Acesso em: 14 fev. 2022.

rotor realiza o movimento de rotação, o fluxo concatenado induz uma tensão no enrolamento de armadura que varia no tempo. Se forem consideradas as distribuições senoidais da densidade do fluxo e a velocidade constante no eixo do rotor, a tensão resultante na bobina será senoidal no tempo, como é possível visualizar na figura 10 (b) onde está representada a tensão senoidal no tempo da bobina “a”. A tensão senoidal na armadura passa por um ciclo completo a cada revolução da máquina, esse ciclo implica na frequência da senoide. Na tabela 2 tem-se a coluna com o número de polos da máquina e as colunas das frequências, na qual é obtido o resultado de rotação da máquina por minuto para atingir a frequência desejada (FITZGERALD, UMANS, KINGSLEY JR, 2006).



Fonte: slide Fabio Leão<sup>7</sup> (2016)

Tabela 2 – Velocidade síncrona.

Número de polos	60 Hz	50 Hz
2	3600 rpm	3000 rpm
4	1800 rpm	1500 rpm
6	1200 rpm	1000 rpm
8	900 rpm	750 rpm
10	720 rpm	600 rpm
12	600 rpm	500 rpm

Fonte: adaptada DT-5 WEG<sup>8</sup> (2020)

Quando um gerador síncrono é conectado a um sistema de grande porte, com rede de transmissão e contendo outros geradores de menor porte, a tensão e frequência nos seus terminais de armaduras são fixadas pelo sistema, uma aproximação válida nesse cenário é

<sup>7</sup> Disponível em: <[https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/slides-2016-cap5\\_eletrotecnica\\_fabioleao.pdf](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/slides-2016-cap5_eletrotecnica_fabioleao.pdf)>. Acesso em: 14 fev. 2022.

<sup>8</sup> Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h68/h68/WEG-curso-dt5-caracteristicas-e-especifica-o-de-geradores-artigo-tecnico-portugues.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2022.

considerar o sistema como uma fonte de tensão e frequência constante comumente conhecido como barramento infinito (FITZGERALD, UMANS, KINGSLEY JR, 2006).

Para a conexão dos geradores em paralelo com a rede, utiliza-se a mesma orientação de quando os geradores operam em paralelo. A tensão dos geradores deve ser igual, o ângulo das fases e a frequência das tensões devem ser iguais e a sequência de fase deve ser a mesma no ponto de conexão (WEG, 2020).

Segundo Leão (2016), para a sincronização de um gerador interligado com a rede, primeiramente é necessário ligar a máquina primária para ajustar a velocidade do gerador com o valor desejado de frequência, posteriormente, faz-se indispensável o controle da corrente de excitação do gerador ajustando a amplitude da senoide para que a rede e o gerador tenham valores semelhantes. Deve-se também cuidar da sequência de fase, pois se não estiverem em sincronia poderá ocorrer curto-circuito.

### **3 SISTEMAS EXISTENTES**

Os sistemas em estudo neste trabalho já estão instalados em duas unidades distintas em uma Cooperativa. O biogás está instalado em uma UPL, já o sistema solar está instalado em uma Unidade de Insumos e Sementes.

#### **3.1 SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICA**

O sistema de geração fotovoltaico trabalha on-grid com a rede da concessionária, fornecendo uma potência máxima de 75 kVA. No total tem-se 204 módulos conforme mostrado nas figuras 11 (a) e 11 (b) no qual a potência do lado CC totaliza 89,76 kW com a irradiância próximo a 1000 W/m<sup>2</sup> e temperatura entorno de 25 °C.

Figura 11 – Módulos fotovoltaicos instalados na cobertura (a) Conjunto 1 (b) Conjunto 2.



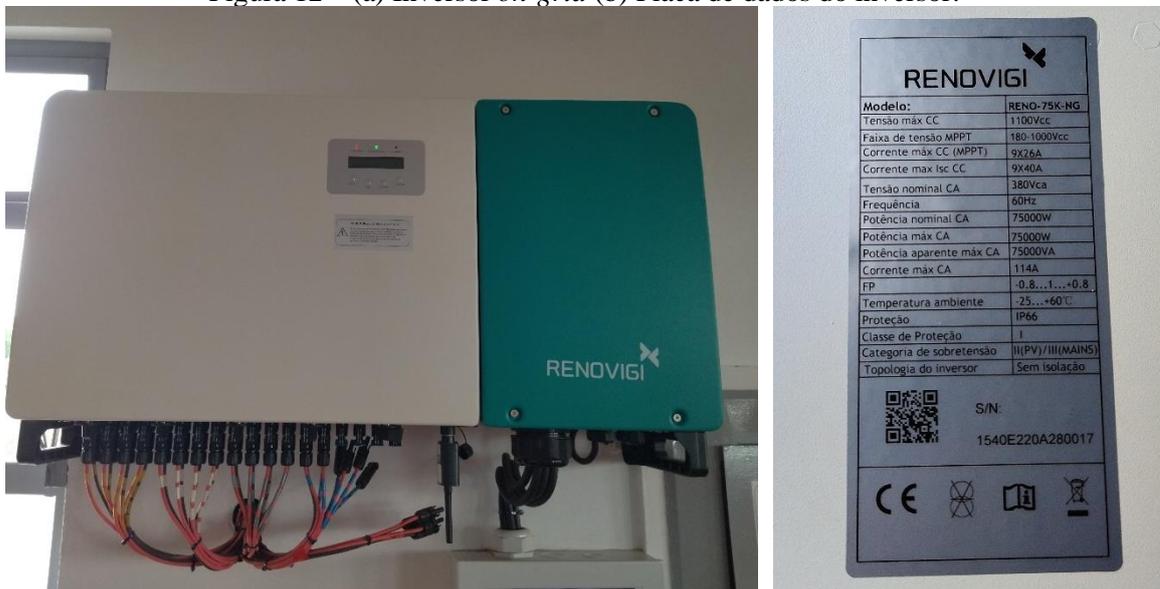
(a)

(b)

Fonte: autor (2022)

O inversor escolhido pela empresa que desenvolveu a instalação do sistema foi o RENO-75k-NG apresentado na figura 12 (a), o inversor conta com 98,7% de eficiência e suporta uma potência máxima de 112,5 kW do lado CC. Ademais, é certificado pelo INMETRO para a aprovação junto a Copel. Tem-se o algoritmo MPPT de alta precisão, o qual consegue garantir até 26 A de corrente máxima (RENOVIGI, 2015).

Figura 12 – (a) Inversor *on-grid* (b) Placa de dados do inversor.



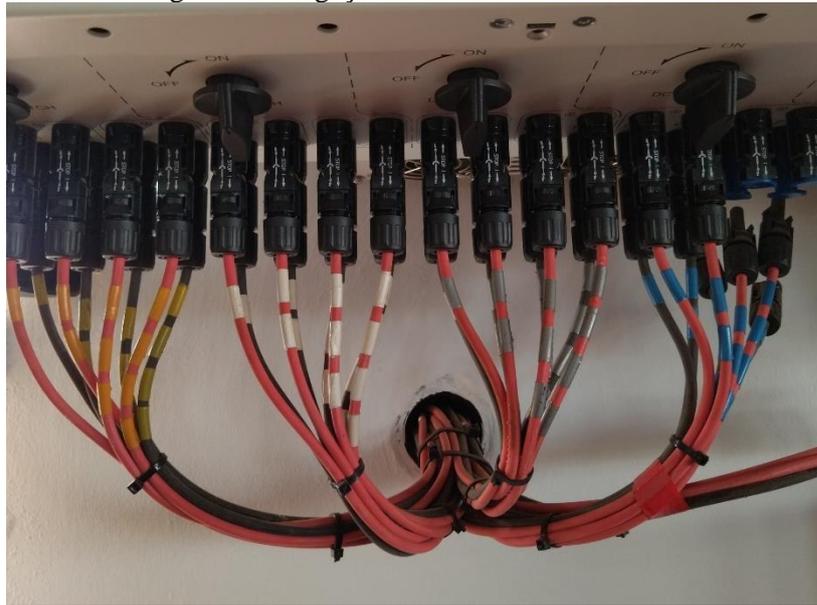
(a)

(b)

Fonte: autor (2022)

A conexão dos módulos até o inversor são distribuídas em sete MPPTs como pode-se observar na figura 13, é observável também um conjunto de *string* desligado, que consiste de um caminho reserva para uma possível manutenção em um dos outros MPPTs. Os módulos são interligados em série e conectados em uma *string*, porém cada MPPT tem duas *string*, cujas conexões se dão de forma paralela.

Figura 13 – Ligação dos módulos no inversor.



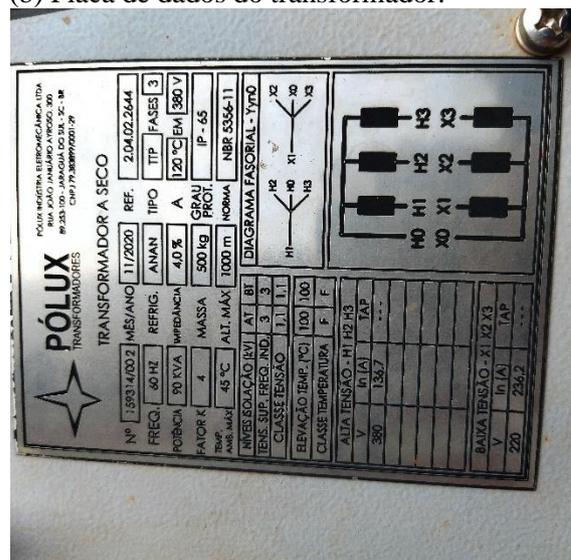
Fonte: autor (2022)

Na maioria das unidades da Cooperativa, há uma tensão de trabalho interna de 220/380 V, logo foi adquirido um inversor com tensão nominal de 380 V, contudo a instalação ocorreu em uma unidade de insumo na qual não se tem uma subestação de entrada, com isso a unidade é alimentada diretamente pela rede da Copel cuja tensão é 127/220 V. Para interligar o sistema foi necessário adquirir um transformador abaixador de 380 V para 220 V, sendo que o transformador a seco está ilustrado na figura 14 (a).

Figura 14 – (a) Transformador a seco (b) Placa de dados do transformador.



(a)

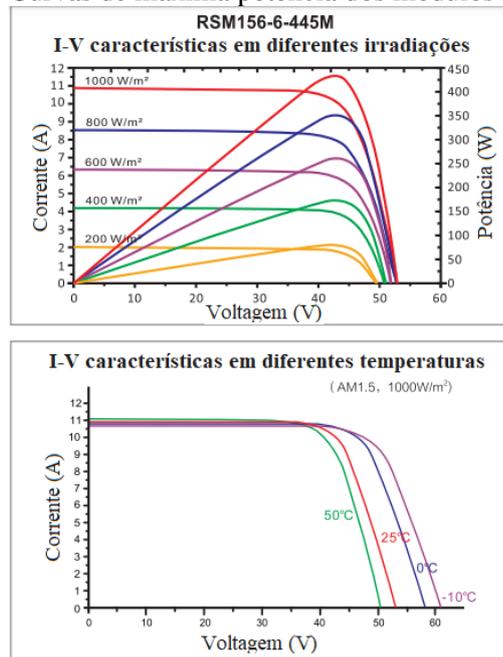


(b)

Fonte: autor (2022)

Os módulos fotovoltaicos utilizados no sistema são da marca *Risen* com o código RSM 156-6-440M, sendo sua potência máxima de 440 W com irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup> e temperatura em 25°C, na figura 15 representam as curvas características de potência do módulo solar, de corrente por tensão quando ocorre a variação de irradiância e de temperatura. Na aquisição foi exigido um módulo com boa eficiência energética. O painel em questão apresenta 20,3% de conversão da luz solar em energia elétrica por m<sup>2</sup>.

Figura 15 – Curvas de máxima potência dos módulos fotovoltaicos.

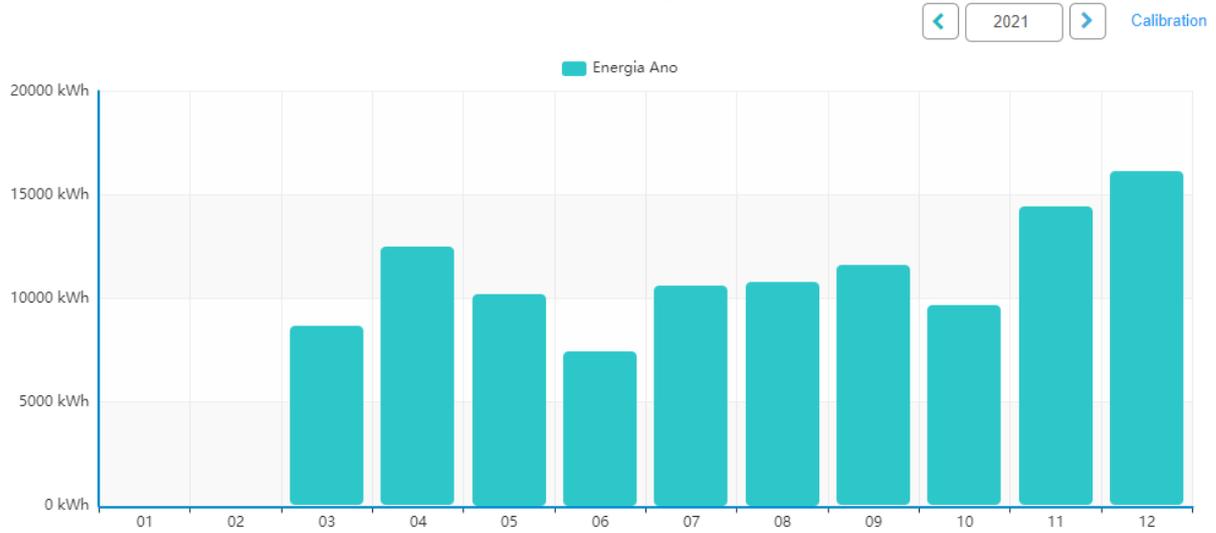


Fonte: adaptada datasheet RSM 156-6-430M-455M<sup>9</sup> (2022)

O sistema foi instalado recentemente e está em estudo para verificação da viabilidade de futuras instalações nas demais unidades da Cooperativa no oeste do estado do Paraná, o sistema teve seu *startup* em 11 de março de 2021 e ao longo do ano apresentou uma produção de 80,52 MW. No gráfico 2 pode-se observar a variação da produção durante o período, sendo que o mês de menor produção foi junho (inverno na região sul do Brasil).

<sup>9</sup> Disponível em: <[https://helte.com.br/17\\_risen](https://helte.com.br/17_risen)>. Acesso em: 08 jan. 2022.

Gráfico 2 – Produção de energia solar ano 2021.



Fonte: autor (2022)

Uma forma de medir a viabilidade do sistema é a partir do fator de capacidade apresentado na equação 3.1, o quociente da potência máxima produzida (este dado é adquirido por meio do sistema de monitoramento da geração) pela capacidade máxima do sistema. A capacidade máxima de produção do sistema é apresentada na equação 3.2, sendo o produto da multiplicação da potência máxima pelos dias e pelas horas (CONTEUDISTA, 2020).

$$FC = \frac{P_{\text{máx.med}}}{C_{\text{máx}}} \quad (3.1)$$

$$C_{\text{máx}} = P_{\text{máx}} \cdot h_{rs} \cdot d_s \quad (3.2)$$

No caso de análise do sistema fotovoltaico, será considerado o cenário anual devido a variação de produção entres os meses, entretanto como o sistema não está a um ano completo em funcionamento, será ponderada a produção até o dia 19/02/2022, totalizando 346 dias de funcionamento e atingindo uma produção de 101,738 MWh, logo substituindo os valores em 3.3 chegou-se em um rendimento aproximado de 16% do sistema anual.

$$FC_{FV} = \frac{P_{\text{máx.med}}}{P_{\text{máx}} \cdot h_{rs} \cdot d_s} \rightarrow FC_{FV} = \frac{101,738M}{75k \cdot 24 \cdot 346} \rightarrow FC_{FV} = 0.163 \quad (3.3)$$

### 3.2 BIOGÁS

O sistema de biogás instalado na unidade mencionada, apresenta uma tecnologia defasada em relação aos novos sistemas de geração de biogás. O controle existente da entrada de gás não possui uma comunicação com a sonda lambda de monitoramento dos gases do escapamento, com isso, o motor ciclo Otto trabalha as vezes com a sonda rica (consumindo gases demasiadamente) e as vezes com a sonda pobre (prejudicando a vida útil do motor). Pode-se até fazer uma analogia com o sistema de admissão existente nos carros mais antigos, os quais eram alimentados pelo carburador, em que a injeção de combustível não possuía um controle efetivo com a mudança de carga do motor, já o sistema de injeção eletrônica consegue atuar conforme a variação de carga no motor. Com a sonda lambda é possível realizar o monitoramento dos gases e alterar o tempo de injeção dos bicos.

Aqui é apresentado por meio de algumas imagens o sistema instalado na UPL, o processo se inicia com uma lagoa separando os sólidos dos líquidos antes de entrar nos biodigestores, após este processo o líquido entra no biodigestor conforme a figura 16 e permanece no local entre 15 a 20 dias, ocorrendo durante esse período o processo químico necessário para a produção dos gases.

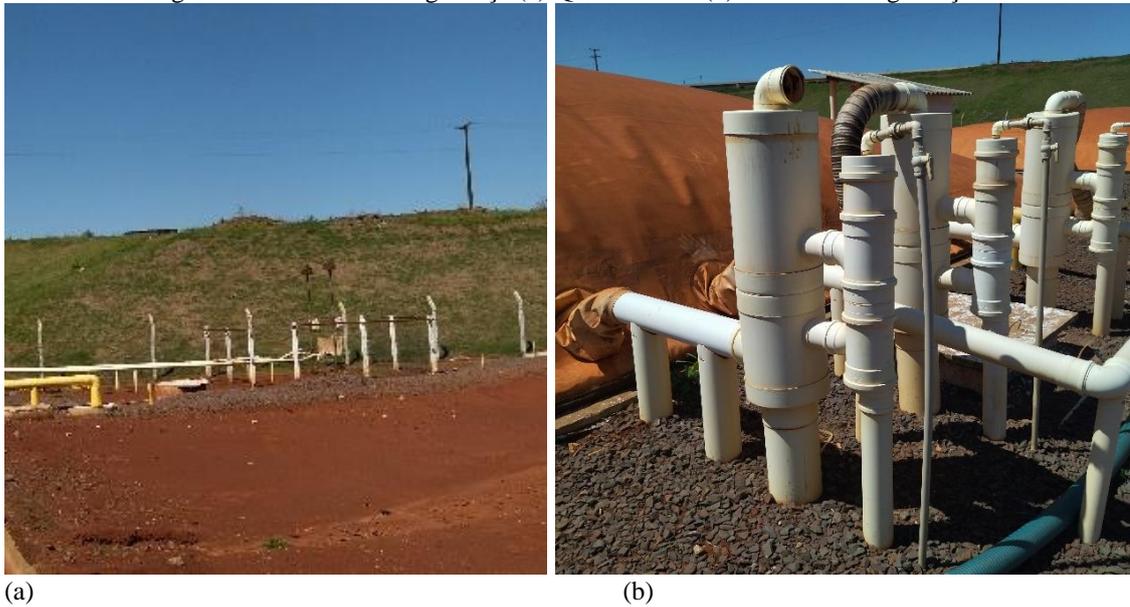
Figura 16 – Biodigestor de tratamento dos líquidos e armazenamento do gás.



Fonte: autor (2021)

Quando a produção de gás é maior do que a consumido pelo gerador, tem-se dois sistemas de proteção para não danificar a lona do bio, apresentados na figura 16. A primeira proteção seria os queimadores presentes na figura 17 (a), responsáveis pelo processo de queima dos gases antes de serem expelidos ao meio ambiente. A segunda proteção se dá por meio de válvulas próximas aos tanques conforme na figura 17 (b), um sistema de proteção reserva caso os queimadores apresentem defeito ou não consigam queimar a quantidade de gases produzidas.

Figura 17 – Sistema de segurança (a) Queimadores (b) Válvula de segurança.



(a)

(b)

Fonte: autor (2021)

Há dois geradores instalados na unidade com a potência aparente de 120 kVA em *standy by* e a potência aparente de 75 kVA em regime permanente. Ambos os geradores trabalham em regime permanente e dessa forma conseguem produzir uma potência total de 150 kVA. Na figura 18 apresenta-se a placa de dados do gerador.

Figura 18 – Placa de dados gerador.



Fonte: autor (2021)

No motor ciclo Otto do gerador ocorre o processo de queima dos gases, sendo que o componente responsável pela queima do combustível são as velas de ignição que operam em conjunto com as bobinas de ignição, já a bobina é responsável por elevar a tensão a níveis elevados e essa alta tensão rompe o dielétrico do ar no *gap* (distância entre eletrodo central e lateral da vela) gerando uma faísca. As bobinas e os cabos que conduzem a eletricidade estão apresentados na figura 19 (a). Esta característica resulta em uma das principais desvantagem do conjunto, visto que devido a composição dos gases ocorre uma degradação nas velas que necessitam de manutenção preventiva ou até mesmo corretiva. Ademais, outra manutenção importante para o motor é a realização da troca dos filtros e do óleo do motor. O gerador completo está apresentado na figura 19 (b) contendo a máquina primária (motor a combustão de gás) e o alternador.

Figura 19 – (a) Ignição motor a combustão (b) Gerador a biogás.



(a)



(b)

Fonte: autor (2021)

Os gases contêm uma porcentagem de água em sua composição e para que essa água não prejudique o processo de combustão do motor do gerador, é necessário que o gás passe por um filtro, que é apresentado na figura 20, e posteriormente seja direcionado até os motores.

Figura 20 – Filtro do gás.



Fonte: autor (2021)

Na figura 21 apresenta-se o Quadro de Transferência do Gerador (QTA), onde ocorre a comutação das chaves para o gerador conectar com a rede.

Figura 21 – QTA do gerador.

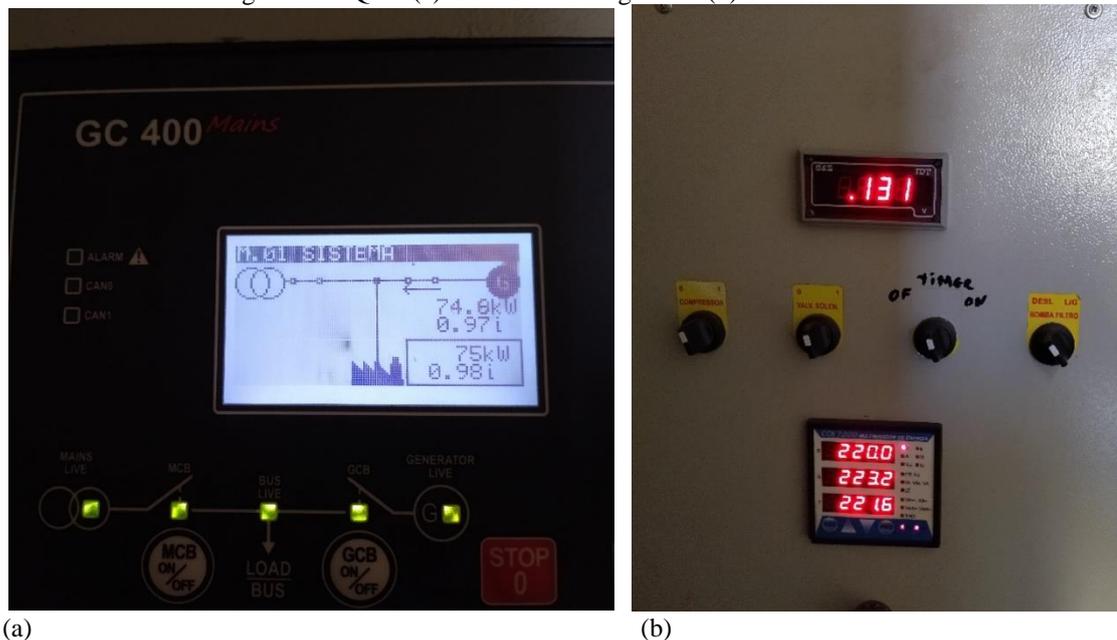


Fonte: autor (2021)

O controle para o acionamento das chaves do QTA são setadas e comandadas pelo controlador GC 400 *Mains* apresentado na figura 22 (a). Esse controlador é específico para o trabalho de geradores em paralelos e além dos controles tem-se uma IHM, na qual é possível acompanhar a produção em kVA, fator de potência, conexões da rede/barra/gerador. Ao navegar pelo menu pode-se ainda acompanhar as tensões de fase e tensões de linha, correntes, sentido de giro das fases e entre outros parâmetros (SICES, 2017).

O parâmetro lambda ( $\lambda$ ) é uma forma de acompanhar a mistura estequiométrica, que se dá a partir da relação entre ar e combustível, ideal para o processo de combustão completa. A mistura estequiométrica ideal é  $\lambda = 1$ , mistura estequiométrica pobre é  $\lambda < 1$ , mistura estequiométrica rica é  $\lambda > 1$  (SANTOS, 2012). Na figura 22 (b) pode-se observar o valor adquirido pelo monitoramento da sonda lambda. Vale ressaltar que a escala do equipamento está trocada, logo o valor correto seria 1,31  $\lambda$ , indicando que o motor está trabalhando rico (consumido gás demasiadamente).

Figura 22 – QTA (a) Controlador do gerador (b) Sonda lambda.



Fonte: autor (2021)

Como o gerador está instalado na UPL, localizada distante da matriz, foi instalado um sistema de monitoramento chamado CCK. Com ele pode-se conferir os valores de potência, tensão, corrente e consumo de gás em tempo real conforme tela do supervisório apresentada na figura 23. O CCK possui um banco de dados, que contém gráficos do

funcionamento dos geradores durante o dia, mês e ano, que pode ser consultado a qualquer momento.

Figura 23 – Monitoramento dos geradores.

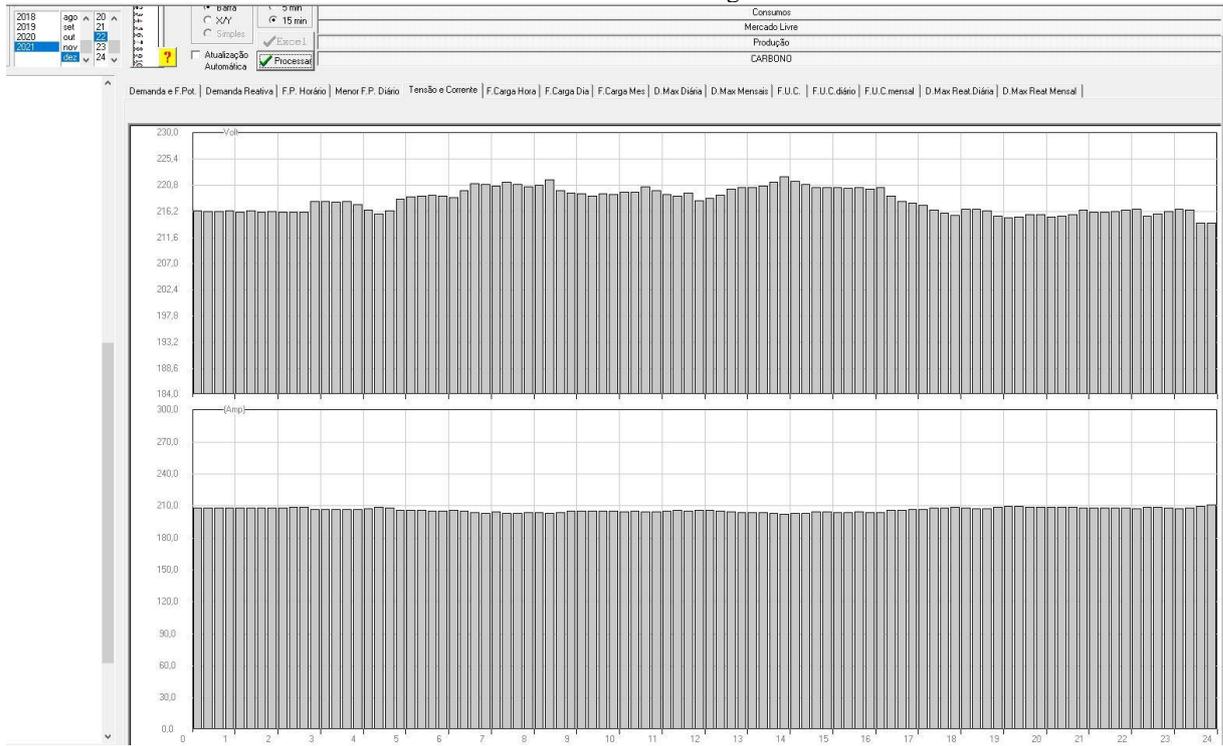


Fonte: autor (2021)

Os gráficos são gerados pelo supervisório do CCK e ficam armazenados em nuvem. No eixo do tempo (eixo horizontal) tem-se a opção de trabalhar com duas escalas, de 5 minutos ou 15 minutos (cada barra), no caso desses gráficos optou-se por 15 minutos para melhor visualização.

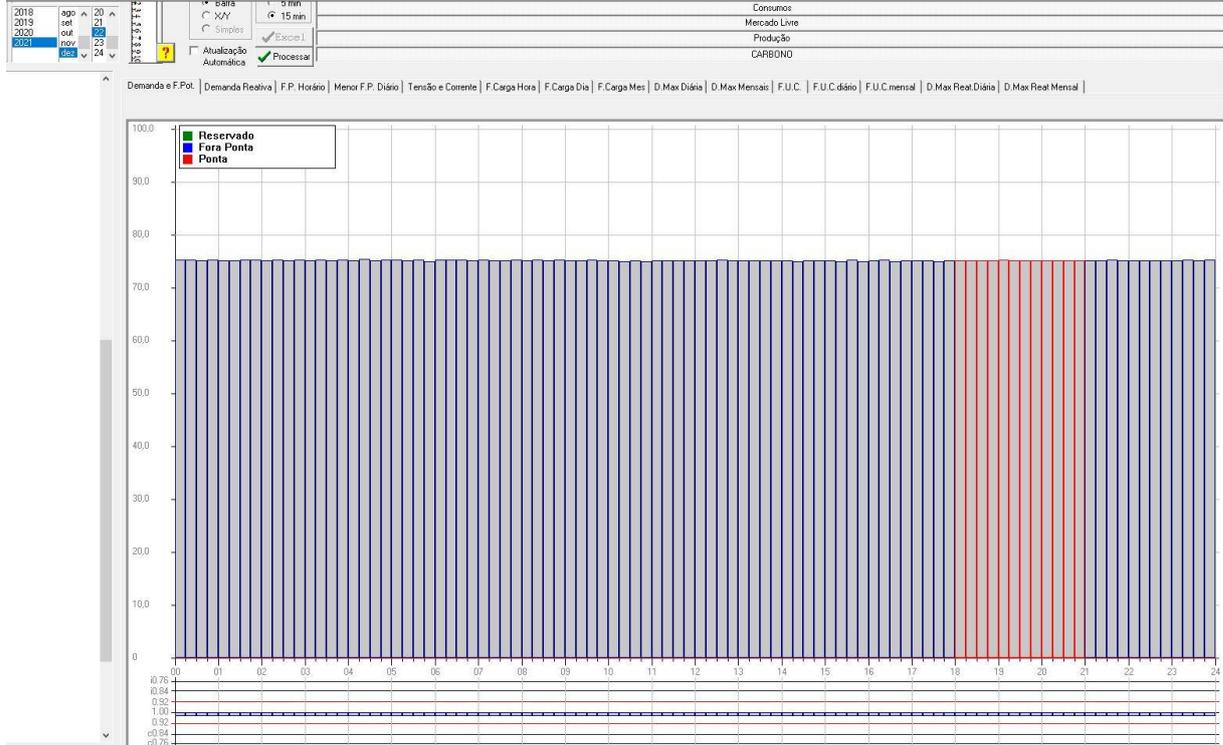
No gráfico 3 apresenta-se a tensão e corrente, sendo que o gráfico da corrente está mais constante enquanto o gráfico da tensão apresenta uma pequena variação. O gráfico 4 apresenta a potência aparente em kVA gerada, na qual se observa uma geração constante com funcionamento de 24 horas, sendo que o horário de ponta está destacado por meio de barras de contorno vermelho. O gráfico 5 apresenta o consumo de gás que, nesse gerador em questão, apresenta muita oscilação, tendo como possíveis motivos a falta de uma manutenção ou a ausência de um melhor controle de injeção dos gases.

Gráfico 3 – Tensão e corrente gerador 1



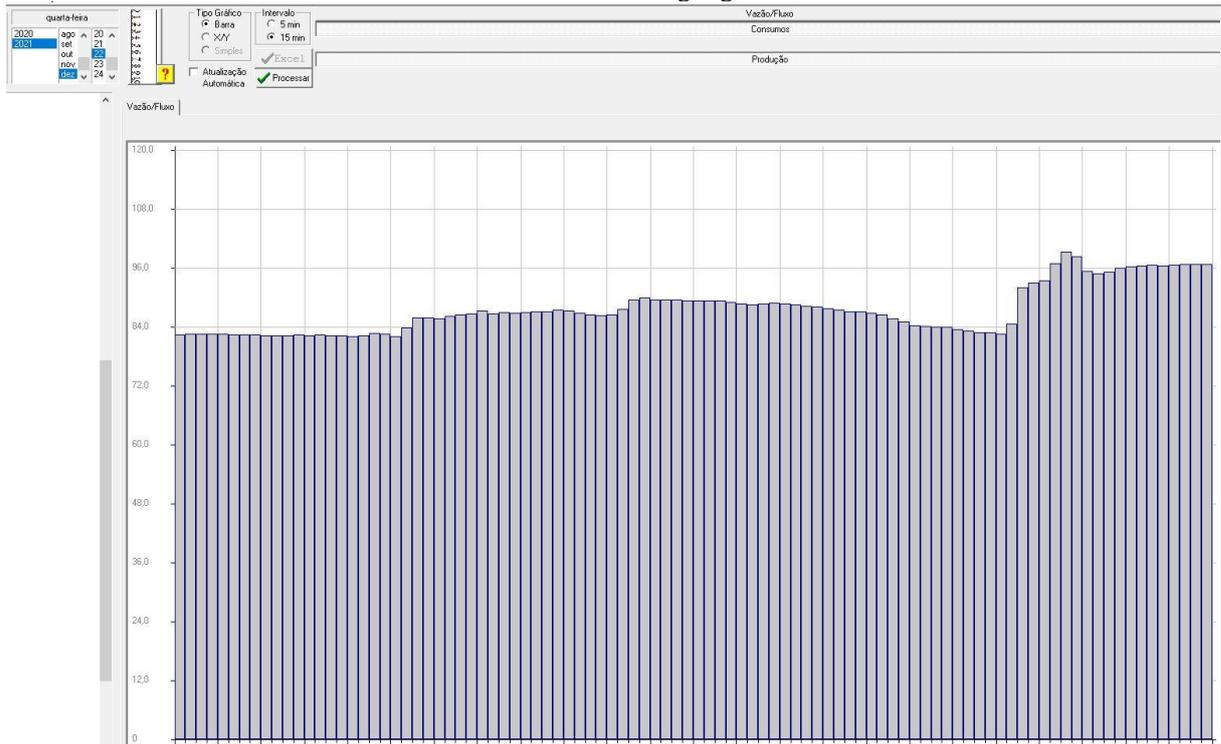
Fonte: autor (2021)

Gráfico 4 – Potência gerada no gerador 1



Fonte: autor (2021)

Gráfico 5 – Consumo de gás gerador 1



Fonte: autor (2021)

A partir dos dados adquiridos pelo CCK pode-se calcular o fator de capacidade do gerador 1 utilizando a equação 3.4, com uma produção anual de 421,29 MWh e realizando as substituições necessárias chegou-se a aproximadamente 64% de rendimento do sistema.

$$FC_{BG1} = \frac{P_{\text{máx.med}}}{P_{\text{máx}} \cdot h_{rs} \cdot d_s} \rightarrow FC_{BG1} = \frac{421,29M}{657M} \rightarrow FC_{BG1} = 0.641 \quad (3.4)$$

Já os demais gráficos apontam informações do gerador 2. No gráfico 6 observa-se a tensão e a corrente sendo que novamente o gráfico da corrente está mais constante e o gráfico da tensão apresenta uma pequena variação. O gráfico 7 apresenta a potência aparente em kVA gerada e outra vez tem-se uma geração constante com funcionamento de 24 horas. O gráfico 8 apresenta o consumo de gás, sendo mais linear e inferior em comparação com o outro gerador. Segundo o pessoal da manutenção, esse comportamento pode estar associado ao fato de que o gerador 2 está mais próximo do filtro.

Gráfico 6 – Tensão e corrente gerador 2

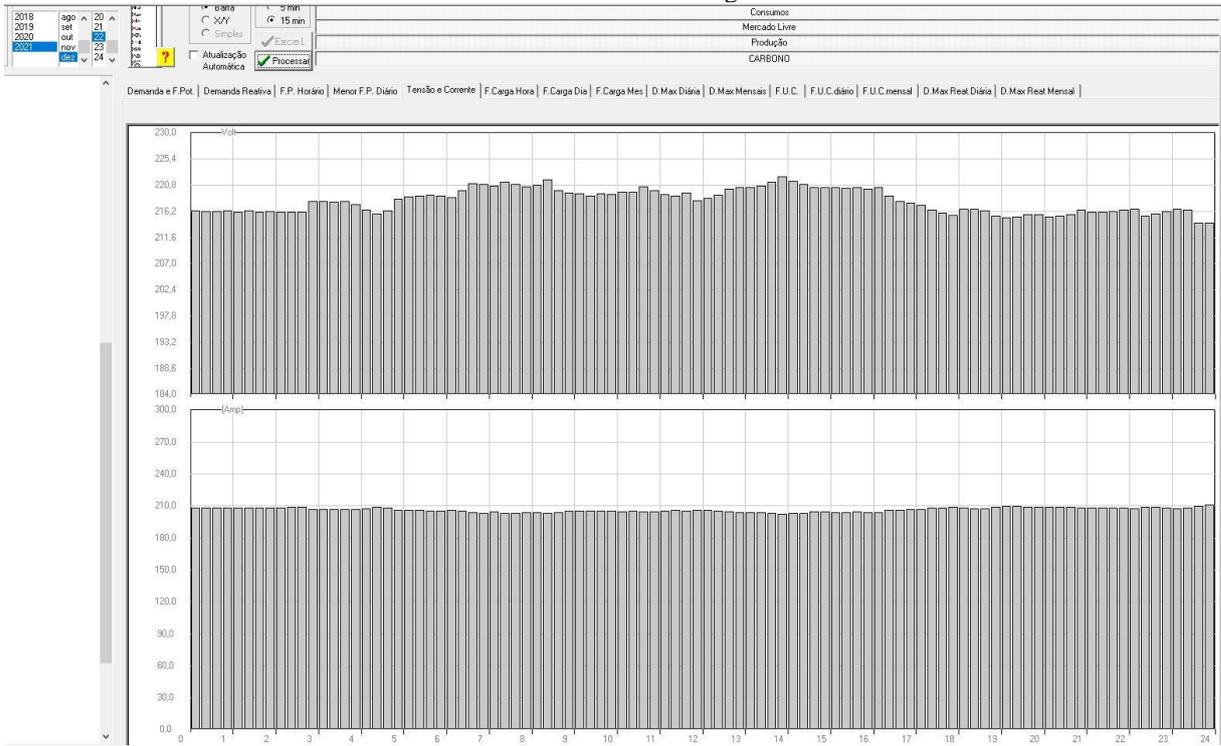


Gráfico 7 – Potência gerada no gerador 2

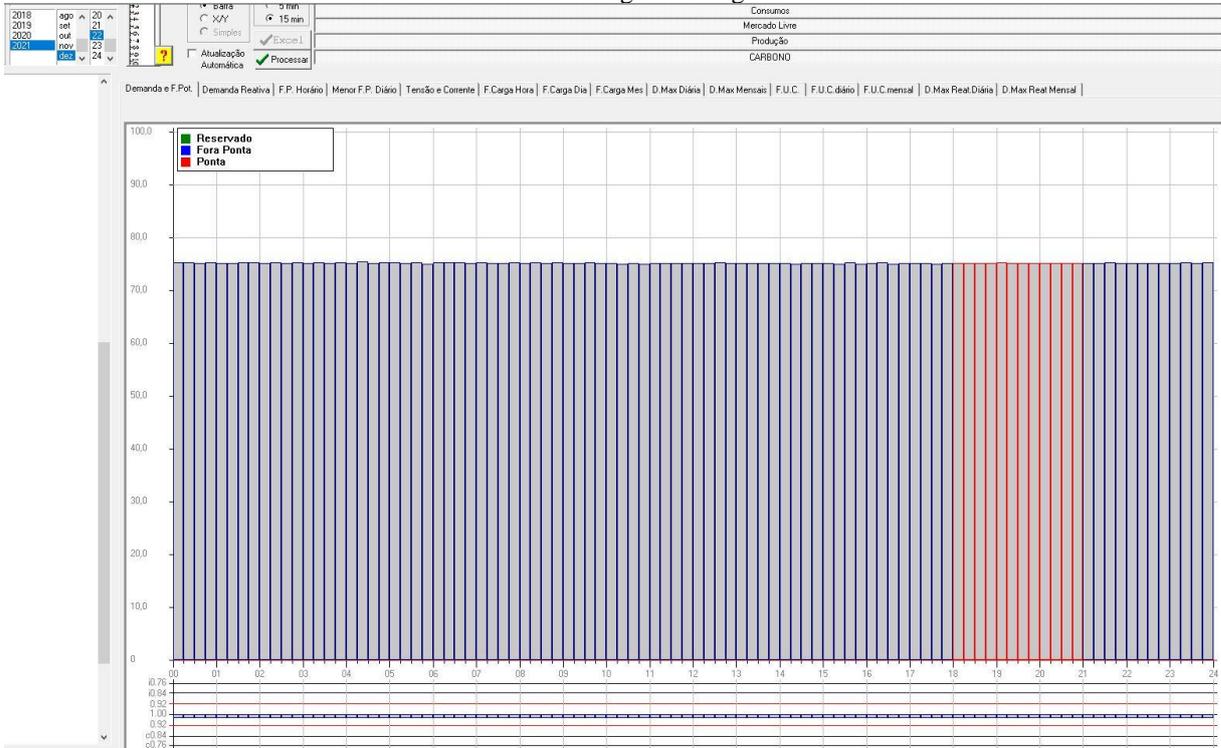
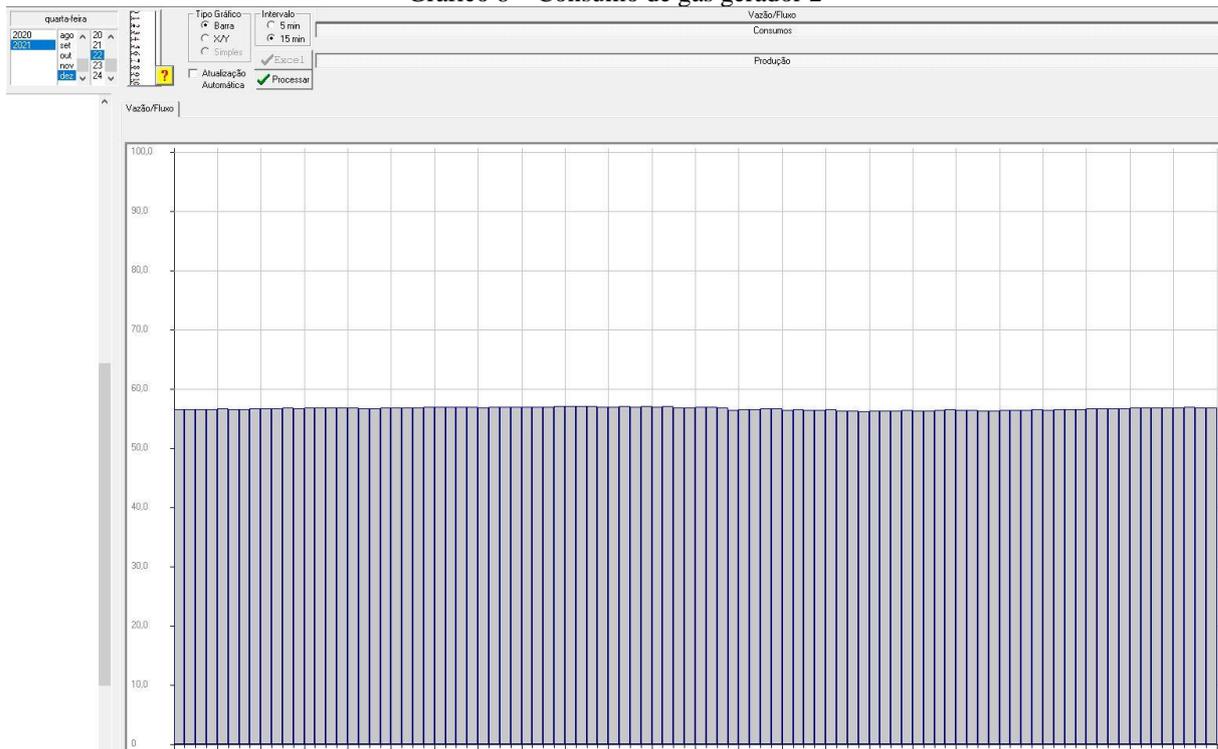


Gráfico 8 – Consumo de gás gerador 2



Fonte: autor (2021)

Apartir dos dados foi calculado o fator de capacidade do gerador 2 utilizando a equação 3.5, com uma produção anual de 485,5 MWh e realizando as substituições necessárias chegou-se a aproximadamente 74% de rendimento do sistema.

$$FC_{BG2} = \frac{P_{\text{m}\acute{a}\text{x}.med}}{P_{\text{m}\acute{a}\text{x}} \cdot h_{rs} \cdot d_s} \rightarrow FC_{BG2} = \frac{485,5M}{657M} \rightarrow FC_{BG2} = 0.7389 \quad (3.5)$$

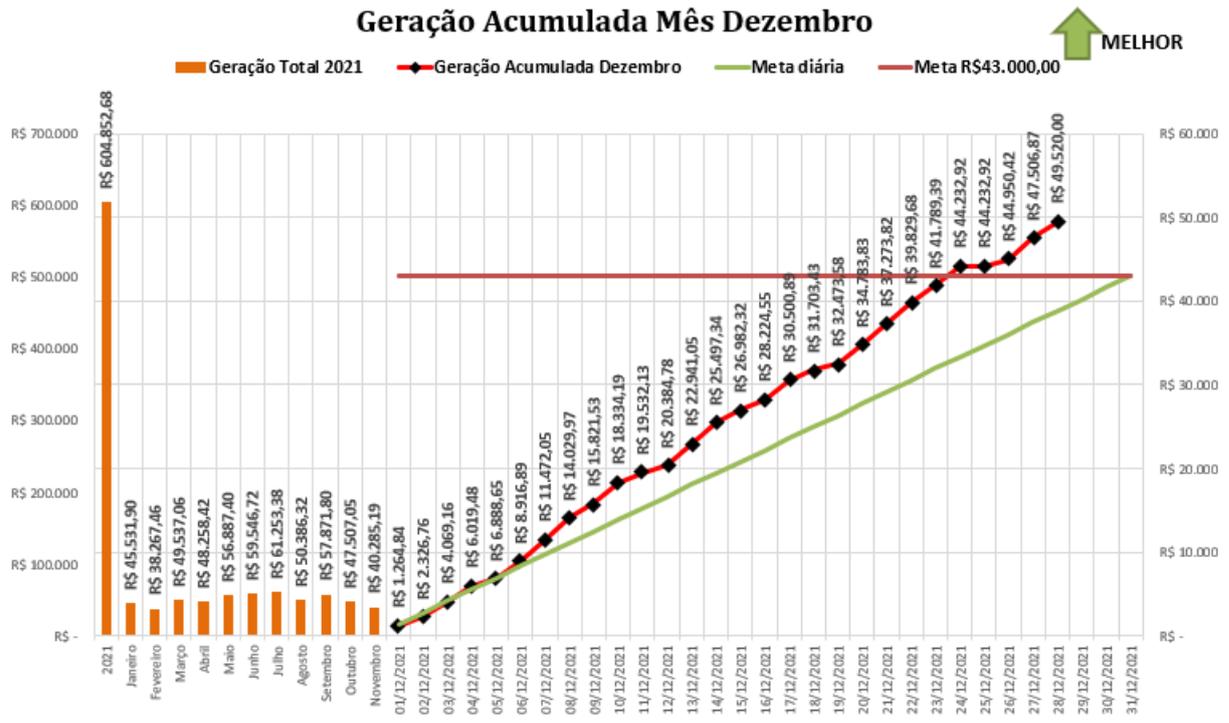
Como explicação da diferença dos fatores de capacidade dos geradores de biogás, pode-se apontar os desgastes dos equipamentos do motor e pelas manutenções. Ao analisar também o gráfico referente ao consumo de gás, nota-se que o gerador 2 tem uma melhor performance. Realizando o cálculo do fator de capacidade de ambos os geradores utilizando a equação 3.6, a produção anual é a soma de ambos geradores totalizando 906,79 MWh e com as substituições necessárias obtém-se 69% de rendimento do sistema.

$$FC_{BGT} = \frac{P_{\text{m}\acute{a}\text{x}.med}}{P_{\text{m}\acute{a}\text{x}} \cdot h_{rs} \cdot d_s} \rightarrow FC_{BGT} = \frac{906,79M}{1,314G} \rightarrow FC_{BGT} = 0.69 \quad (3.6)$$

Os dados apresentados na tabela 1 indicam a produção de energia pelo biogás durante o ano de 2021. Tem-se um acumulado de R\$ 604.852,68 de economia anual, não considerando a depreciação dos equipamentos (sem o fechamento dos últimos dois dias do ano). Esse cálculo é da produção de energia durante dois horários estipulados pela concessionária de energia, o horário fora de ponta com o preço do kW/h de R\$ 0,48 e o horário de ponta com o preço do kW/h de R\$ 1,83 (COPEL, 2021).

Há também uma meta interna de produção de energia totalizando R\$ 43.000,00. Calculando a média geral, chega-se a um valor próximo de R\$ 50.000,00 por mês, com esses dados confirma-se a viabilidade do sistema. Pode-se destacar que esses sistemas estão sendo adotados em outras UPL e a nova UPD.

Tabela 3 – Geração do biogás.  
**Geração Acumulada Mês Dezembro**



Fonte: autor (2021)

#### 4 BALANÇO DE POTÊNCIA

Atualmente na Cooperativa, ambos sistemas já instalados operam interligados com a rede da concessionária. Baseando nesses agrupamentos, o trabalho contempla o estudo e a simulação do sistema no modo interligado.

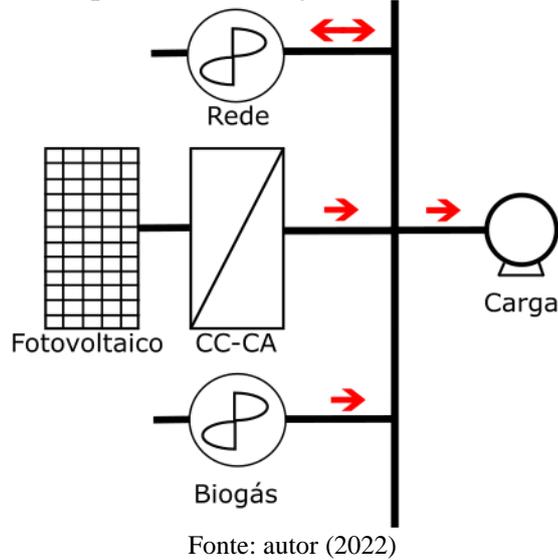
O gerador a biogás apresenta um consumo de gás demasiado, como já abordado anteriormente, por consequência resultaria em uma interrupção de geração de energia por falta de gás. Com a realocação do sistema fotovoltaico ou até mesmo a instalação de um novo sistema na mesma propriedade (UPL), tem-se a hipótese onde o fotovoltaico opera no período diurno e a geração a biogás opera somente no período noturno, como vantagem operaria no horário de ponta. Pode-se ter um outro cenário onde a quantidade de gás esteja muito elevada e ambos os sistemas operem em conjunto durante o período diurno.

O balanço de potência foi baseado em tese de Coelho (2013), sendo adaptada para o sistema do presente trabalho. Para exemplificar os possíveis cenários utilizou-se a equação 4.1, realizando o balanço de potência, ou seja, a somatória da potência gerada juntamente com a potência consumida deverá ser igual a zero.

$$P_{FV} + P_{BGT} + P_{CT} + P_R = 0 \quad (4.1)$$

Para resumir o sistema, além do equacionamento 4.1, a figura 24 apresenta o fluxo de potência do sistema indicando quais blocos injetam potência e quais consomem potência. Na GD solar fotovoltaica e biogás o fluxo é unidirecional injetando potência quando estão em funcionamento, a carga também é unidirecional consumindo potência quando em funcionamento. Já na rede o fluxo é bidirecional podendo injetar ou consumir potência do sistema.

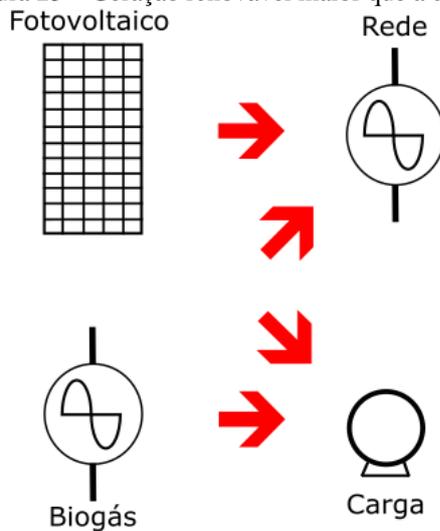
Figura 24 – Fluxo de potência do sistema.



#### 4.1 GERAÇÃO RENOVÁVEL MAIOR DO QUE A CARGA

Quando a produção de energia na geração está maior do que a consumida, o excedente começa a ser injetado na rede da concessionária como destacado na figura 25, de forma indireta pode-se inferir que a rede está atuando como carga (recebendo potência), de acordo com as fontes de energia renováveis. Este cenário está apresentado pela equação 4.2 a seguir.

Figura 25 – Geração renovável maior que a carga.

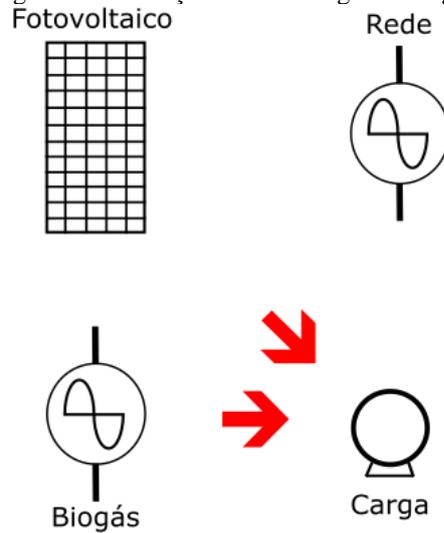


$$\underbrace{P_{FV} + P_{BGT}}_{\text{Geração}} = \underbrace{P_{CT} + P_R}_{\text{Consumo}} \quad (4.2)$$

#### 4.2 GERAÇÃO RENOVÁVEL IGUAL A CARGA

Ao abordar o cenário em que a geração se iguala à potência consumida pela carga, pode-se destacar que a rede está operando de forma ociosa, o cenário em questão é representado na figura 26. O balanço de potência está apresentado na equação 4.3.

Figura 26 – Geração renovável igual a carga.



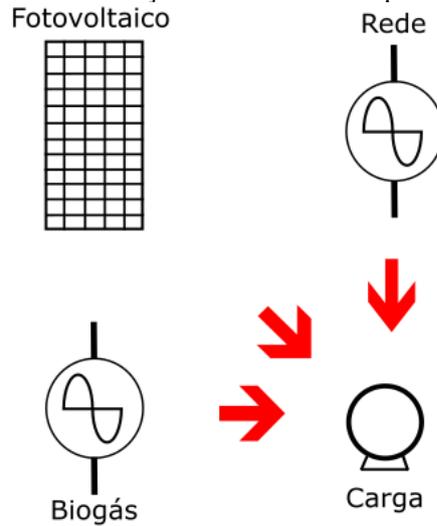
Fonte: autor (2022)

$$\begin{cases} P_R = 0 \\ \underbrace{P_{FV} + P_{BGT}}_{\text{Geração}} = \underbrace{P_{CT}}_{\text{Consumo}} \end{cases} \quad (4.3)$$

#### 4.3 GERAÇÃO RENOVÁVEL INFERIOR A CARGA

Com a inserção de mais carga na unidade, a potência gerada torna-se insuficiente para suprir a carga, com isso, a rede começa a fornecer potência conforme indicado na figura 27, sendo possível verificar tal fenômeno pela equação 4.4.

Figura 27 – Geração renovável menor que a carga.



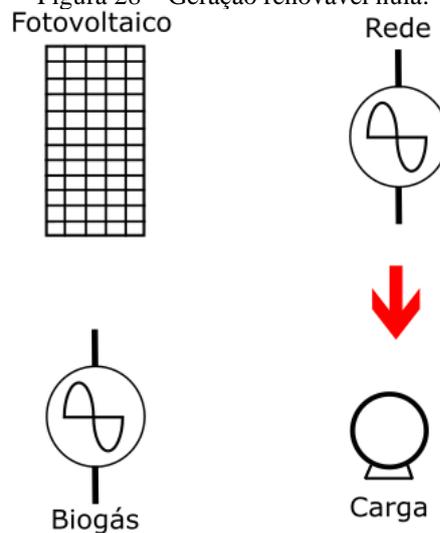
Fonte: autor (2022)

$$\underbrace{P_{FV} + P_{BGT} + P_R}_{\text{Geração}} = \underbrace{P_{CT}}_{\text{Consumo}} \quad (4.4)$$

#### 4.4 GERAÇÃO RENOVÁVEL NULA

Com a geração renovável nula a rede de alimentação assumirá todo o suprimento da carga, esse cenário é possível em uma eventual manutenção nos equipamentos de geração. A figura 28 ilustra esse cenário hipotético e por meio da equação 4.5 descreve-se as gerações renováveis nulas.

Figura 28 – Geração renovável nula.



Fonte: autor (2022)

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{BGT} = 0 \\ P_{FV} = 0 \\ \underbrace{P_R}_{\text{Geração}} = \underbrace{P_{CT}}_{\text{Consumo}} \end{array} \right. \quad (4.5)$$

## 5 RESULTADO DAS SIMULAÇÕES

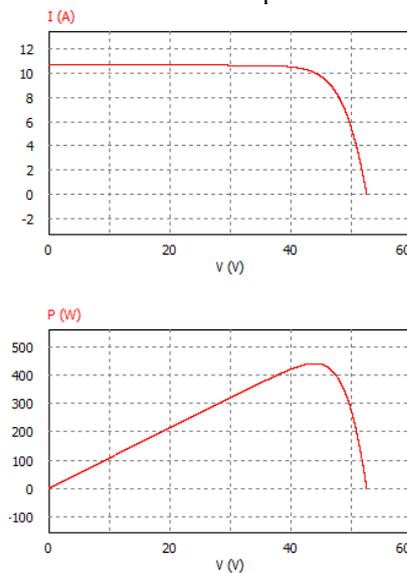
Para a simplificação do trabalho, considerou-se a carga puramente resistiva e balanceada. O software utilizado para a realização das simulações foi o PSIM, a partir do qual se conseguiu observar os gráficos contendo as formas de ondas geradas.

### 5.1 SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICA

A simulação da produção de energia aplicando os módulos fotovoltaicos apresentou grandes desafios, no qual realizar o desenvolvimento da interligação dos blocos foi o maior deles. Para a compreensão de funcionamento do sistema completo, as simulações foram divididas em etapas ao longo deste capítulo.

Inicialmente, inseriram as características do módulo fotovoltaico apresentado no item 3.1 no software, sendo possível representar as curvas características de tensão pela corrente e de potência pela tensão com a irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup> a 25 °C, conforme mostrado na figura 29.

Figura 29 – Curvas características do painel solar a partir do PSIM.



Fonte: autor (2022)

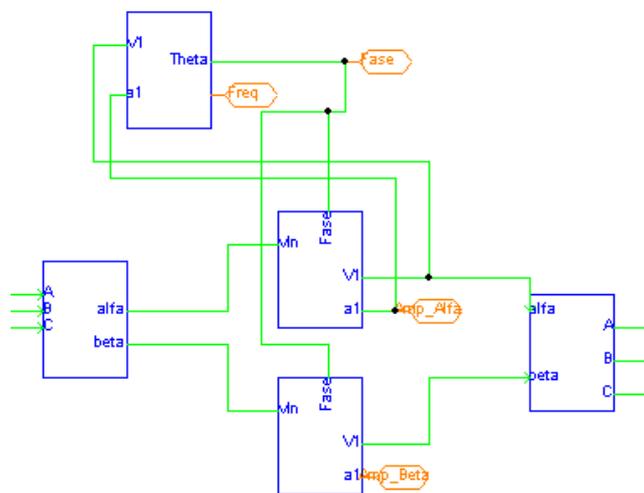
### 5.1.1 FB-PLL Trifásico

O Baseado no Fourier – Malha de Sincronismo de Fase (FB-PLL) utiliza a série de Fourier como ferramenta para permitir a reconstrução da frequência fundamental, fase e amplitude de um sinal de entrada, podendo modelar sinais de sistemas monofásico e trifásico. O sinal de entrada passa pelo bloco Análise Dinâmica de Fourier (DFA) sendo que suas saídas contêm os harmônicos desejados e, posteriormente, passa pelo Reconstrução do Sinal Original (OSR), utilizado para reconstruir os harmônicos estimados, contendo as informações de amplitude e fase. No Detector de Fase (PD) tem-se a determinação da fase e frequência do sinal (SANTOS, FERREIRA, SILVA, FILHO, 2013).

A diferença do FB-PLL monofásico para o FB-PLL trifásico é a adição de um bloco no qual realiza-se a transformação de *Clarke* no sinal de entrada e após a transformação o sinal alimenta o bloco Síntese Dinâmica de Fourier (DFS) que são os blocos DFA e OSR ligados em série. Nos sistemas trifásicos ausentes do condutor neutro não é necessário realizar a consideração de harmônicos de sequência zero no algoritmo (SANTOS, FERREIRA, SILVA, FILHO, 2013).

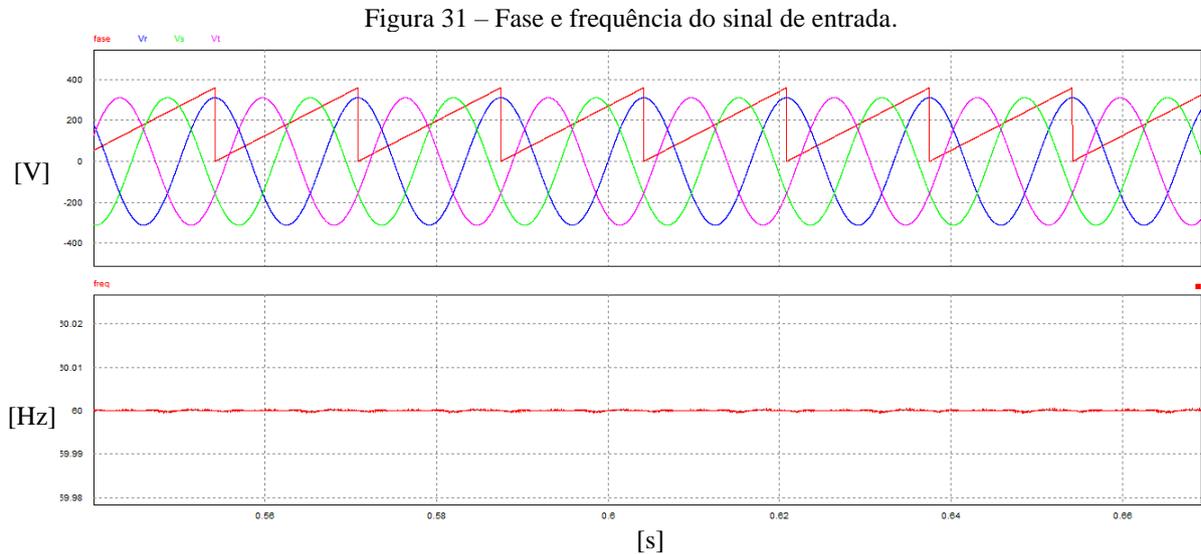
Implementando o FB-PLL chegou-se no subcircuito apresentado na figura 30, que contém o bloco da transformação *Clarke* recebendo o sinal, os dois blocos DFS recebendo o sinal da transformação e fornecendo as amplitudes de alfa e beta. O sinal saindo do DFS está passando pelo PD para determinação da fase e frequência. Por último, os sinais passam pela transformação inversa de *Clarke* retornando os sinais calculados pelo algoritmo.

Figura 30 – FB-PLL trifásico.



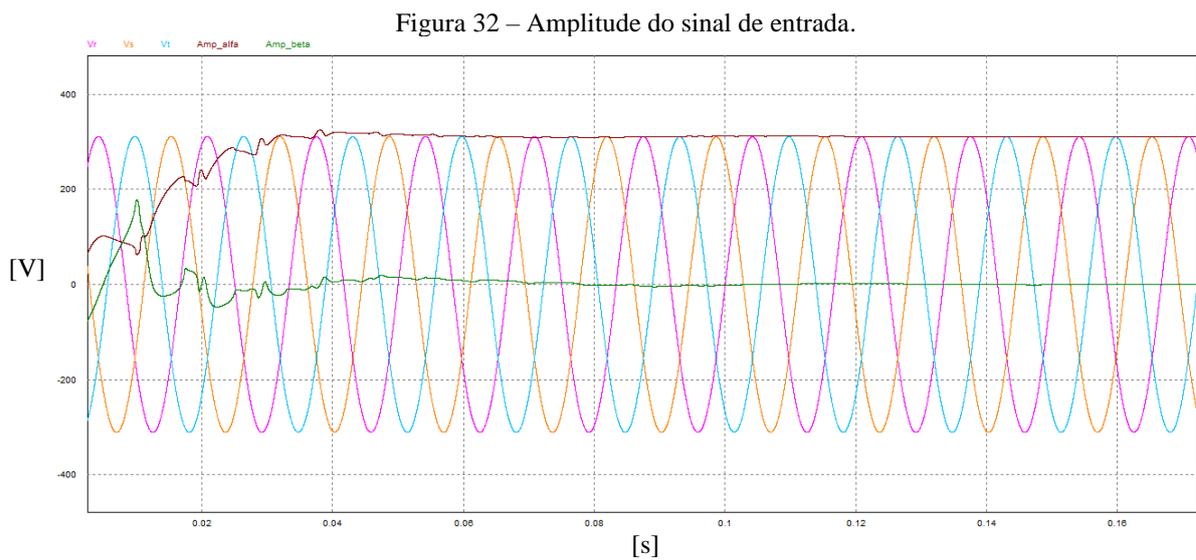
Fonte: autor (2022)

Os resultados presentes na figura 31, indicam a fase do sinal de entrada representado por um sinal dente de serra na cor vermelha, apontando para o centro da senoide de referência (ângulo 0), posteriormente tem-se o valor de frequência fundamental da senoide de entrada.



Fonte: autor (2022)

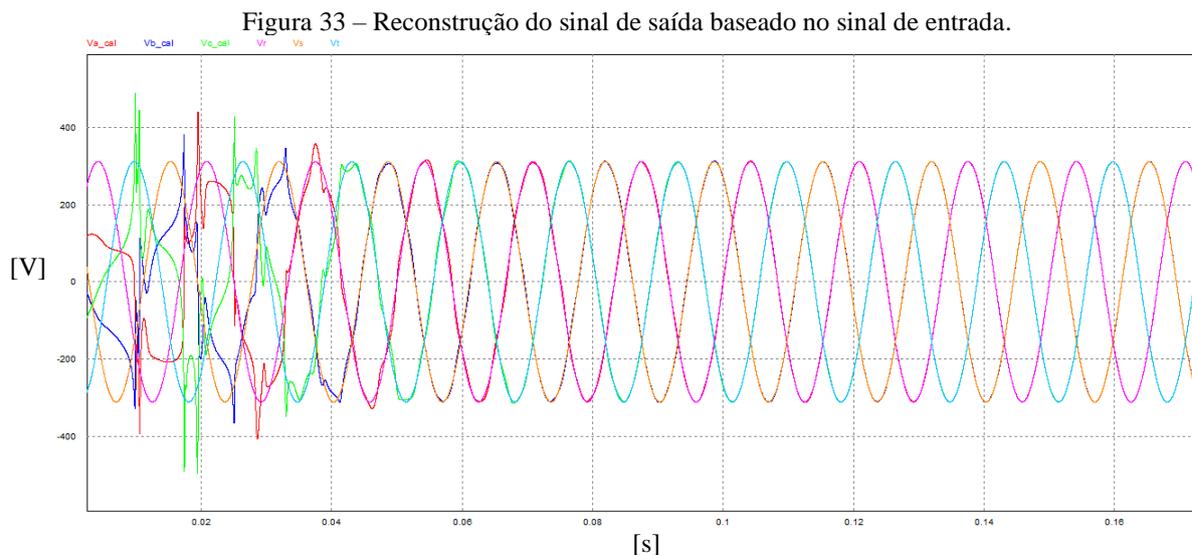
Já na figura 32 podem ser observadas as amplitudes dos sinais de entrada, sendo que a amplitude alfa (cor roxa) indica o pico máximo do sinal e a amplitude beta (cor verde) indica o ponto de cruzamento da senoide.



Fonte: autor (2022)

Concluiu-se a partir da figura 33 que o bloco FB-PLL apresenta resultados aceitáveis e após o período de transitório os sinais calculados mostram-se idênticos aos sinais de entrada.

Devido ao período transitório presente na determinação do FB-PLL que está utilizando em torno de três ciclos para estabilização, as demais curvas da geração solar fotovoltaica e da geração a biogás apresentam distorções no período transitório ocasionados por essa instabilidade.



Fonte: autor (2022)

### 5.1.2 MPPT

Para a realização do projeto do conversor *boost* utilizaram os dados fornecidos pelo catálogo do inversor em estudo. Os dados apresentados na tabela 4 representam apenas um MPPT, entretanto ao todo são sete MPPT's com potência total de 75 kW.

Tabela 4 – Dados do projeto do conversor *boost*.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>
Potência de saída ( $P_{0b}$ )	10,72 (kW)
Tensão de saída ( $V_{0b}$ )	1000 (V)
Tensão de entrada ( $E_b$ )	180 (V)
Variação da tensão de entrada ( $\Delta V_{0b}$ )	5%
Variação da corrente de entrada ( $\Delta I_{Lb}$ )	10%
Frequência de chaveamento ( $f_{sb}$ )	18 (kHz)

Fonte: autor (2022)

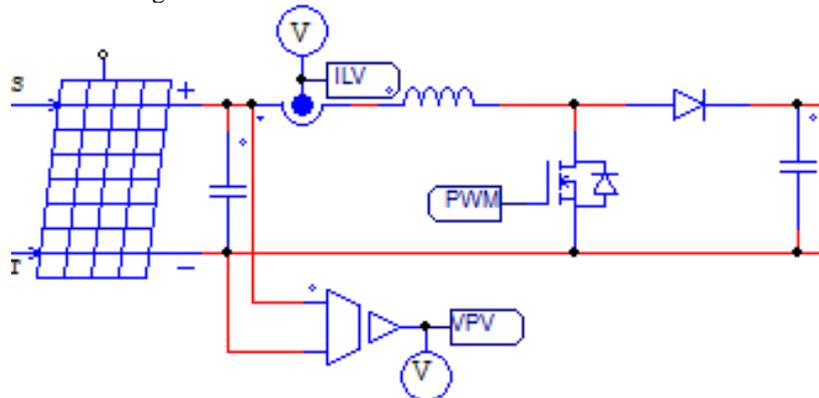
Utilizando-se as equações apresentadas outrora no item 2.1.3 (página 21), foi possível chegar-se aos componentes presentes na tabela 5: vale ressaltar que os mesmos não estão com valores comerciais. A figura 34 indica o *layout* no programa PSIM, contendo o módulo fotovoltaico conectado em série com o conversor *boost*. Os sensores de corrente e de tensão são responsáveis pelo monitoramento e envio dos dados ao sistema de controle do MPPT.

Tabela 5 – Componentes conversor *boost*.

Componente	Valor
Indutância ( $L_b$ )	68,84 (uH)
Capacitância ( $C_b$ )	9,77 (uF)

Fonte: autor (2022)

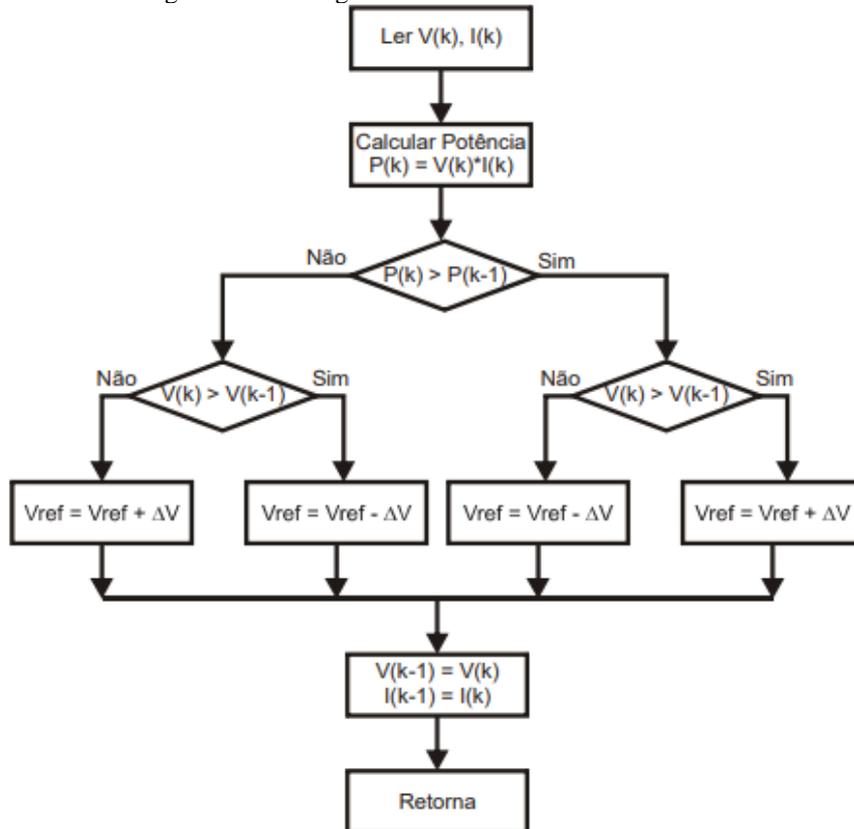
Figura 34 – Painel solar com conversor CC-CC *boost*.



Fonte: autor (2022)

Segundo Imhoff (2007) para o desenvolvimento do algoritmo de monitoramento do MPPT, utilizou-se o método perturba e observa (P&O) baseado no fluxograma indicado na figura 35. Fez-se uso do bloco de programação em linguagem “C” no *software* PSIM, com isso, foram monitorados os sinais de entrada dos sensores de corrente e de tensão, calculou-se o produto da tensão e corrente e monitorou-se por meio de um *loop* se foi alterado o valor da potência, após realizou-se o incremento ou decremento da razão cíclica.

Figura 35 – Fluxograma da técnica Perturba e Observa.

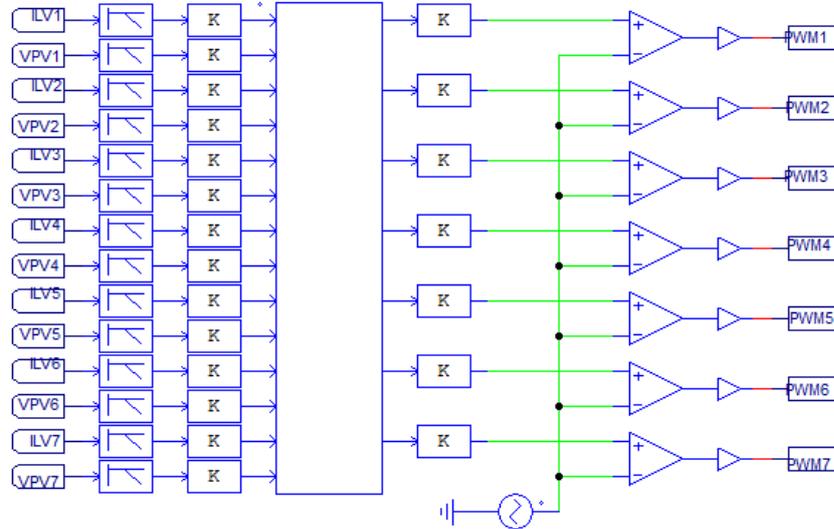


Fonte: dissertação IMHOFF<sup>10</sup> (2007)

O sinal antes de entrar no bloco C presente na figura 36, passa por um filtro passa baixa e por algumas constantes até o circuito comparador. A comparação ocorre entre o sinal resultante e uma portadora com sinal dente de serra de 18 kHz, produzindo então o sinal PWM para a comutação da chave do conversor *boost*.

<sup>10</sup> Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8608/JOHNINSONIMHOFF.pdf>>. Acesso em: 24 jan. 2022.

Figura 36 – Sistema do controle P&amp;O no PSIM.



Fonte: autor (2022)

### 5.1.3 Controle do Inversor

O indutor de acoplamento entre o inversor e a rede CA é responsável por atenuar o *ripple* de chaveamento do inversor, o projeto do indutor deve levar em conta a estabilidade de injeção da corrente na rede, dependendo da frequência de amostragem ( $f_a$ ). Para o cálculo do indutor utilizou-se a equação 5.1, considerando uma indutância mínima para atenuar -20 dB da frequência de Nyquist, realizando as substituições resultou na equação 5.2, na qual considera uma  $f_a$  de 18 kHz chegou-se ao valor de indutância de 2 mH (BRITO, 2013).

$$G(s) = \frac{1}{s \cdot L_{ac}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \frac{f_{nyq}}{10} \cdot L_{ac}} = 0,1 \quad (5.1)$$

$$L_{ac} \geq \frac{100}{f_a \cdot \pi} \rightarrow L_{ac} \geq 1,77 \text{ mH} \quad (5.2)$$

Para o sistema de controle de corrente, foi utilizado um controlador Proporcional Integral (PI), o qual mede a corrente de entrada e a compara com uma corrente de referência, gerando o sinal do erro passando no PI. O PI permite obter um erro nulo do sinal por meio da integração, fazendo com que o sinal da corrente medida se aproxime do sinal de referência. O controlador está apresentado na equação 5.3, já as suas constantes são calculadas por meio do

equacionamento 5.4. No caso da constante de tempo ( $\tau_i$ ), deve satisfazer a inequação apresentada em 5.5. Realizando as substituições necessárias, em que o valor da frequência de chaveamento do inversor é 20 kHz, chegou-se no valor de  $\tau_i \geq 5 \text{ us}$  (TAVARES, 2018).

$$C_d(s) = C_q(s) = \frac{s \cdot k_p + k_i}{s} \quad (5.3)$$

$$k_p = \frac{L_{ac}}{\tau_i} \quad k_i = \frac{R_{ac} + r_{on}}{\tau_i} \quad (5.4)$$

$$\frac{1}{\tau_i} \leq 10 \cdot f_{sca} \rightarrow \tau_i \geq 5 \text{ us} \quad (5.5)$$

Os valores típicos de  $\tau_i$  estão em torno de  $0,5 \text{ ms} \leq \tau_i \leq 5 \text{ ms}$ , considerando o valor de 2 ms, já para o valor de  $R_{ac}$  é considerado nulo, e  $r_{on}$  foi considerado 20 m $\Omega$ , desta forma tem-se os resultados das constantes apresentadas em 5.6 (TAVARES, 2018).

$$k_p = 1 \quad k_i = 10 \quad (5.6)$$

O controle da malha de tensão foi baseado novamente no PI, com sua função de transferência apresentada na equação 5.7. Para uma referência constante, os ganhos do PI devem ser elevados a fim de anular o erro. Para isso, atribuiu-se um polo na origem e um zero uma década abaixo, conforme destacado na equação 5.8. Logo, para calcular o zero do compensador utilizou-se a equação 5.9 (SOUZA, 2018).

$$G_v(s) = -\frac{M}{2 \cdot C_{ap} \cdot s} \quad (5.7)$$

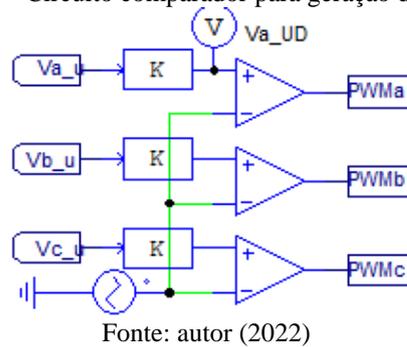
$$f_z = \frac{f_{cz}}{10} \quad f_z = 0,6 \quad (5.8)$$

$$z = 2 \cdot \pi \cdot f_z \quad (5.9)$$



O circuito comparador está indicado na figura 38, e como o sinal de saída das correntes tem amplitudes elevadas, foi necessário antes de entrar no circuito comparador, multiplicar por uma constante para diminuir a amplitude do sinal. O sinal senoidal da corrente de amplitude menor é comparado com um sinal da portadora triangular de 20 kHz com amplitude de -1 V até 1 V, gerando o sinal SPWM e produzindo os pulsos para o acionamento das chaves de comutação.

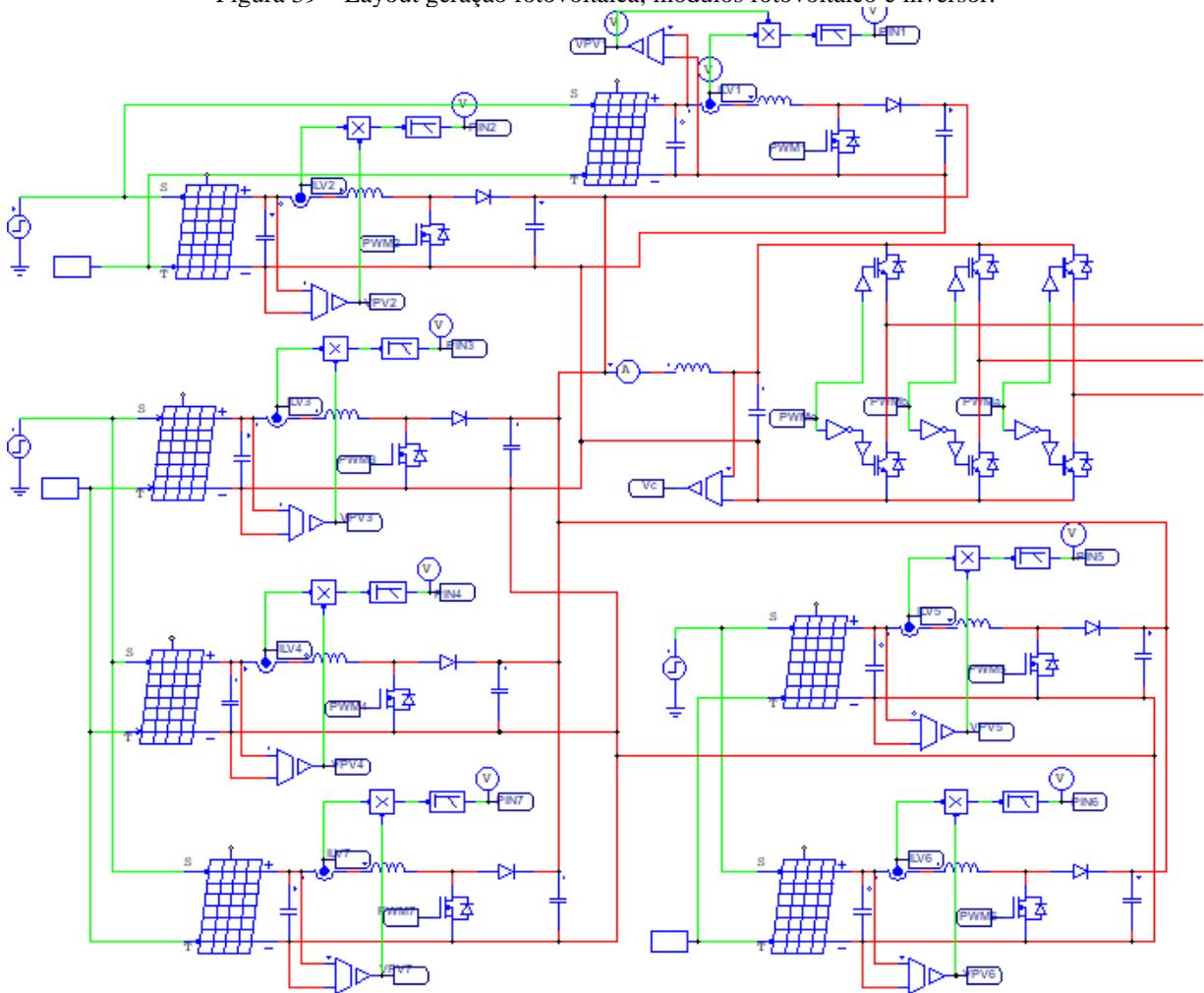
Figura 38 – Circuito comparador para geração do SPWM.



#### 5.1.4 Sistema solar fotovoltaico operando *on-grid*

Realizando a integração de todos os circuitos, apresenta-se na figura 39 o *layout* da geração fotovoltaica contendo os módulos fotovoltaicos com sete MPPT's e o inversor trifásico conectado à rede.

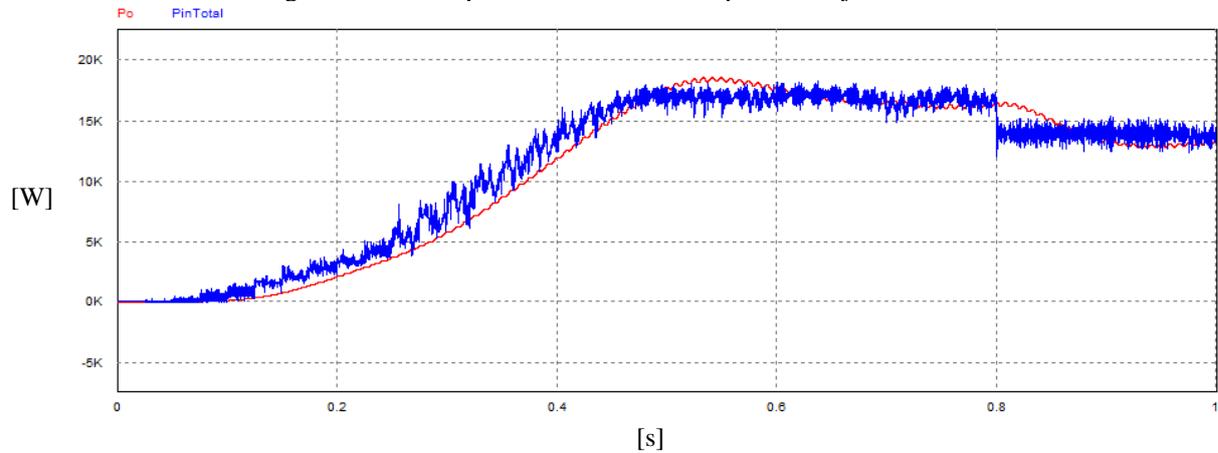
Figura 39 – Layout geração fotovoltaica, módulos fotovoltaico e inversor.



Fonte: autor (2022)

Na figura 40 tem-se a geração solar fotovoltaica operando com o primeiro degrau de irradiância solar de  $1000 \text{ W/m}^2$ , sendo que no instante 0,8 segundos houve uma redução para  $800 \text{ W/m}^2$ . Em azul está indicada a potência total dos módulos fotovoltaicos, e em vermelho a potência que a rede está absorvendo. Vale ressaltar que a interação desse sistema com potência maior do que 18 kVA apresentou alguns problemas, contudo, considerando a potência citada, o sistema funcionou como era o esperado. Conclui-se que após o degrau na geração solar fotovoltaica a rede segue a potência fornecida pela geração.

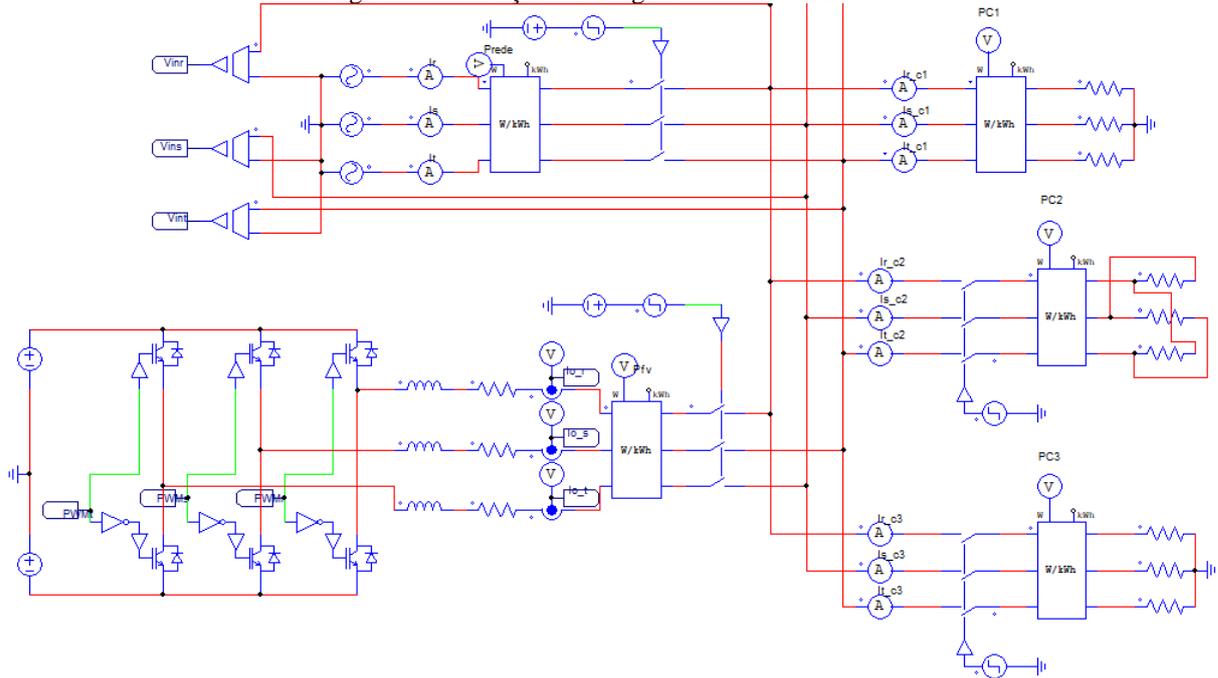
Figura 40 – Curva potência dos módulos e potência injetada na rede.



### 5.1.5 Sistema solar fotovoltaico operando *on-grid* juntamente com as cargas

Devido ao esforço computacional, o tempo de simulação e o problema com a potência reduzida, optou-se na retirada dos módulos fotovoltaicos enquanto o sistema opera com as cargas. Para efeito de simplificação, os resultados com o sistema fotovoltaico operando *on-grid* foram baseados no *layout* da figura 41, no qual se apresenta o *link* CC alimentado pelas fontes de CC (sem os módulos). Logo a partir deste item as simulações não contemplam o módulo fotovoltaico juntamente com MPPT (não utilizando o sistema PV).

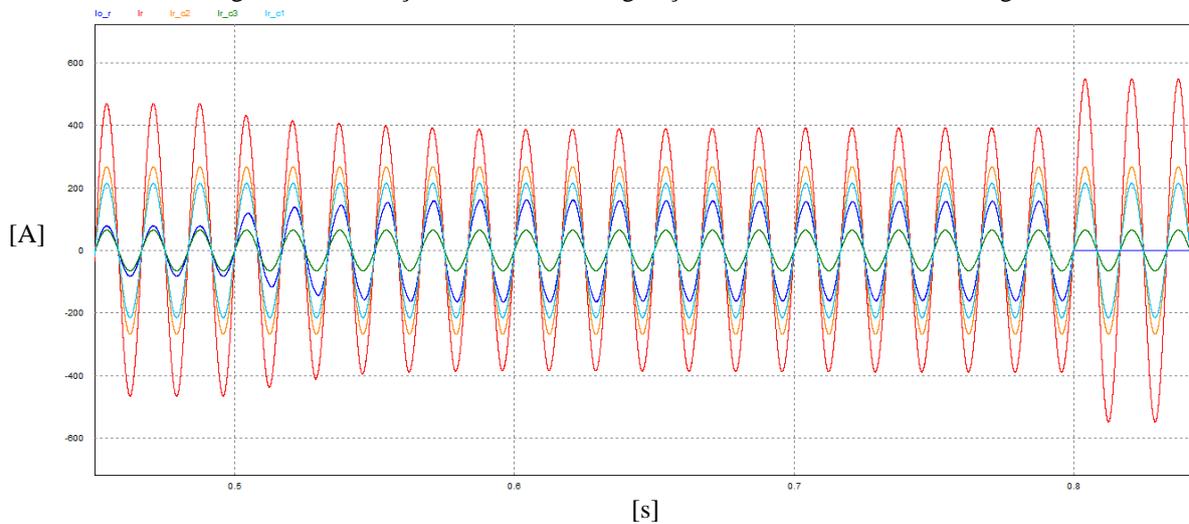
Figura 41 – Geração de energia fotovoltaica trifásica.



Fonte: autor (2022)

Os resultados ilustrados na figura 42 apresentam as correntes das cargas e as variações de corrente na geração fotovoltaica, que por consequência implicam na variação de corrente da rede. Tem-se um aumento de produção no instante 0,5 s, em que se pode observar uma pequena deformação da corrente injetada pelo sistema com inversor *on-grid* (cor azul), estabilizando em torno de seis ciclos após a variação. No instante 0,8 s tem-se o desligamento da geração, em que toda corrente drenada pelas cargas volta a ser fornecida pela rede (cor vermelha).

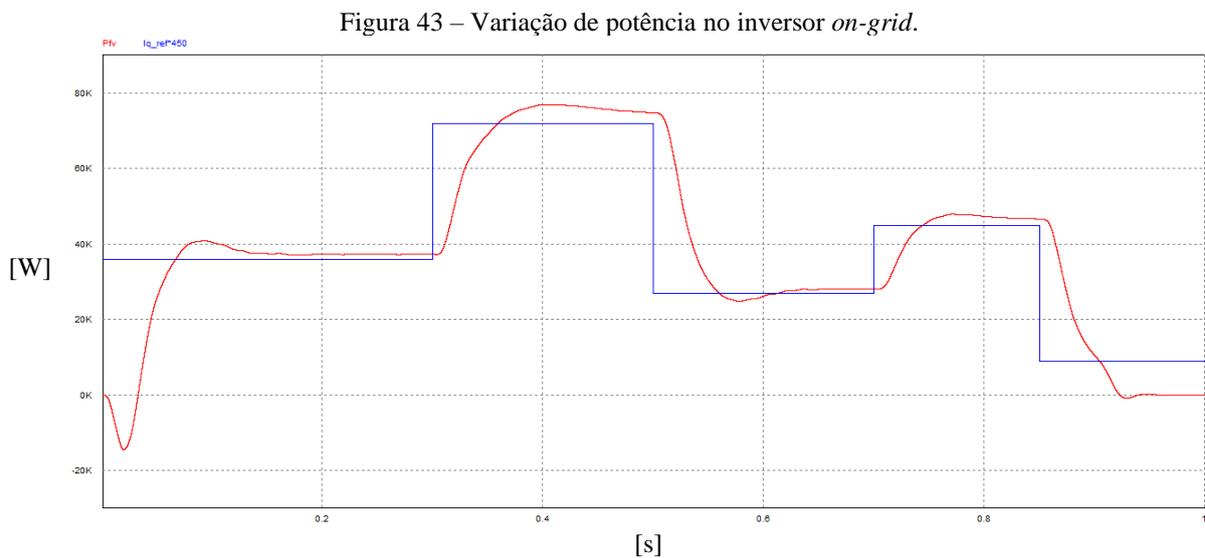
Figura 42 – Variações de correntes da geração fotovoltaica, rede e das cargas.



Fonte: autor (2022)

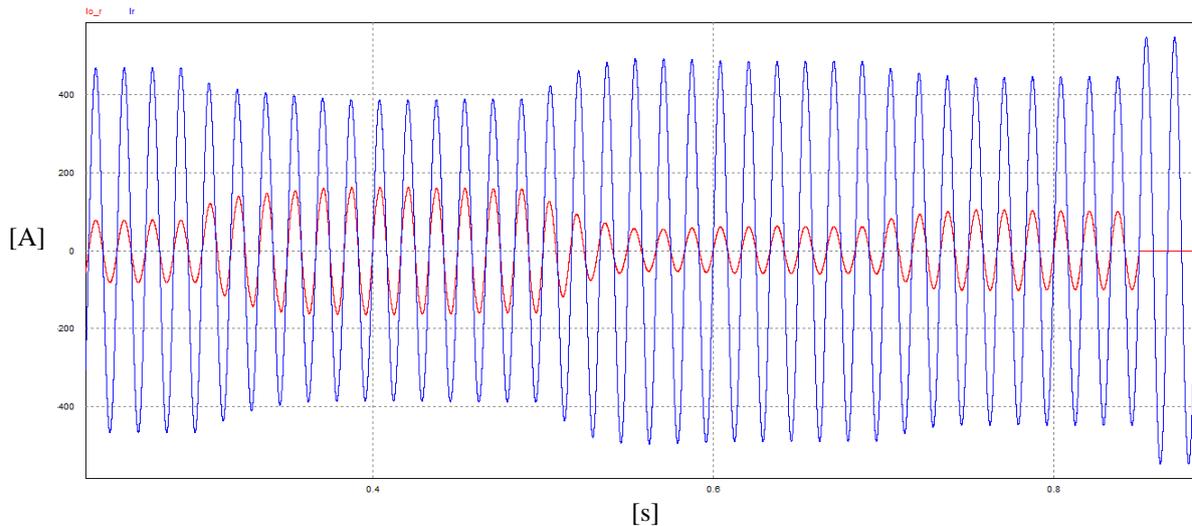
Com o objetivo de representar a variação de potência do sistema fotovoltaico durante o dia com a mudança da irradiação, utilizaram alguns degraus de corrente para representar as variações. A primeira variação ocorre em 0,3 s atingindo o pico máximo de produção do sistema (75 kW). Posteriormente, no instante 0,5 s há uma redução de 62,5% na geração, já em 0,7 s tem-se um aumento de 66,67% e em 0,85 s ocorre o desligamento total do sistema. Os degraus apresentados pela linha azul na figura 43 estão fora de escala na qual o produto da corrente pela constante é apresentado apenas para visualização dos locais do degrau.

Nota-se na curva da potência (cor vermelha) que após os degraus, tem-se um *delay* em relação à resposta do sistema, porém vale ressaltar que o tempo de estabilização está pequeno, podendo destacar que foram realizadas cinco variações num período de um segundo.



A figura 44 apresenta as formas de onda da corrente da rede (cor azul) e da geração solar fotovoltaica (cor vermelha). Considerando os mesmos degraus de carga anteriores. Na imagem, é possível observar por meio do comportamento das correntes que a rede compensa as oscilações da geração solar fotovoltaica.

Figura 44 – Considerando os degraus de carga em 0,3 s; em 0,5 s e em 0,85 s com o desligamento do sistema fotovoltaico.



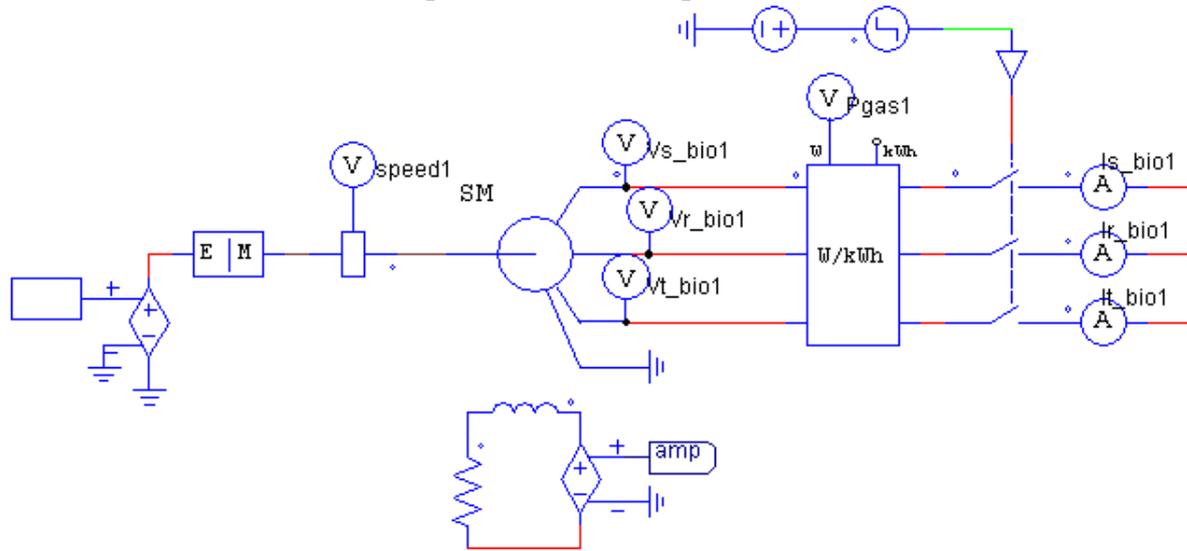
Fonte: autor (2022)

## 5.2 BIOGÁS

Como destacado anteriormente, quando conectado um gerador na barra infinita, a tensão de armadura e frequência do gerador são fixados pela própria barra. Logo para o desenvolvimento da simulação, considerou-se a máquina primária como uma fonte de tensão controlada em série com um bloco de interface mecânica/elétrica, obtendo um valor no eixo constante de 1800 rpm, atingindo a frequência de 60 Hz desejada. Por tanto, a alimentação da fonte foi simulada por meio de um bloco de valor constante de 188,5 V (valor obtido da transformação de rpm em rad/s).

A excitação externa da máquina síncrona do bloco Máquina Síncrona (SM) do PSIM, foi alimentada com uma fonte de tensão controlada sem série com uma resistência. O valor da tensão da fonte de alimentação é a própria amplitude da rede obtida por meio do PLL. A potência de geração da máquina foi determinada ajustando-se o valor da resistência. O *layout* inserido no PSIM do circuito representando o gerador a biogás pode ser observado na figura 45.

Figura 45 – Gerador a biogás PSIM.

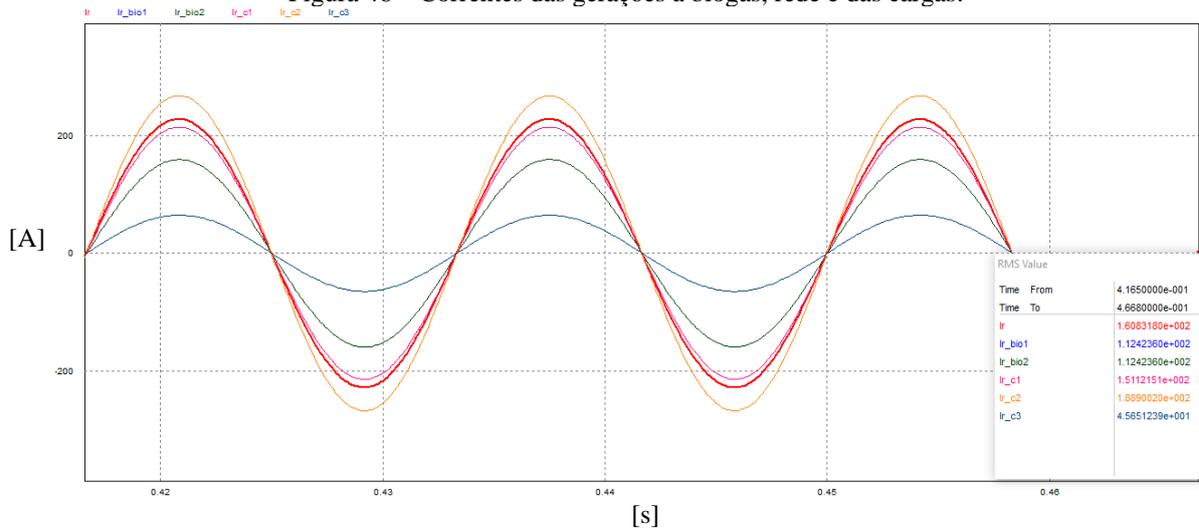


Fonte: autor (2022)

Os parâmetros como fator de potência e ângulo da fase de referência (ângulo 0) foram ajustados a partir dos parâmetros da máquina, com isso, observou-se a dificuldade de trabalhar dinamicamente com este bloco. Logo, para o desenvolvimento do trabalho, considerou-se que a máquina síncrona iniciaria a geração junto com o início da simulação (não sendo possível realizar a entrada do gerador em rampa, devido ao transitório do PLL).

Pelo fato de os valores de tensão e frequência do gerador serem iguais ao da barra infinita, foram analisadas apenas as correntes do sistema. Na figura 46 estão apresentadas todas as correntes presentes no sistema, contendo os valores que representam cada carga (cores rosa, laranja e azul escuro), as gerações (cores verde e azul) e a rede (vermelho). Ao realizar o somatório das correntes de cargas chegou-se ao valor eficaz de 385,67 A, coincidindo com o somatório das correntes dos dois geradores com a rede.

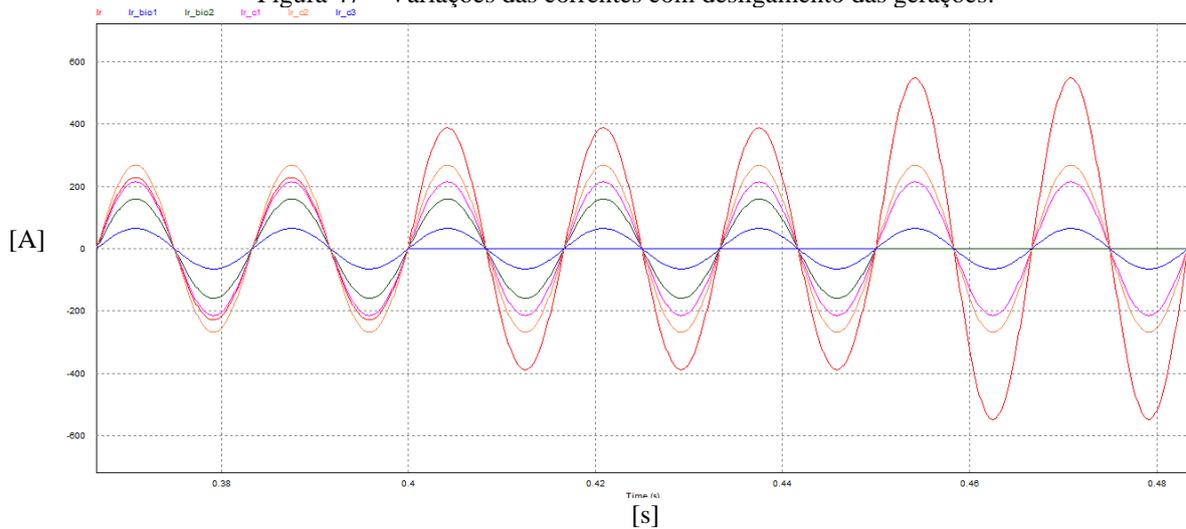
Figura 46 – Correntes das gerações a biogás, rede e das cargas.



Fonte: autor (2022)

Na figura 47 apresentam as variações das correntes quando desligados os sistemas de gerações a biogás. No instante 0,4 s ocorre o desligamento do primeiro grupo gerador, no qual a rede assume o fornecimento de corrente aumentando respectivamente sua amplitude. No instante 0,45 s ocorre o desligamento do segundo grupo gerador e novamente tem-se a alteração de amplitude da rede, a qual assume toda a corrente solicitada pelas cargas, fornecendo uma corrente eficaz de 385,67 A. Nota-se ainda que a transição é suave e não apresenta deformação na senoide.

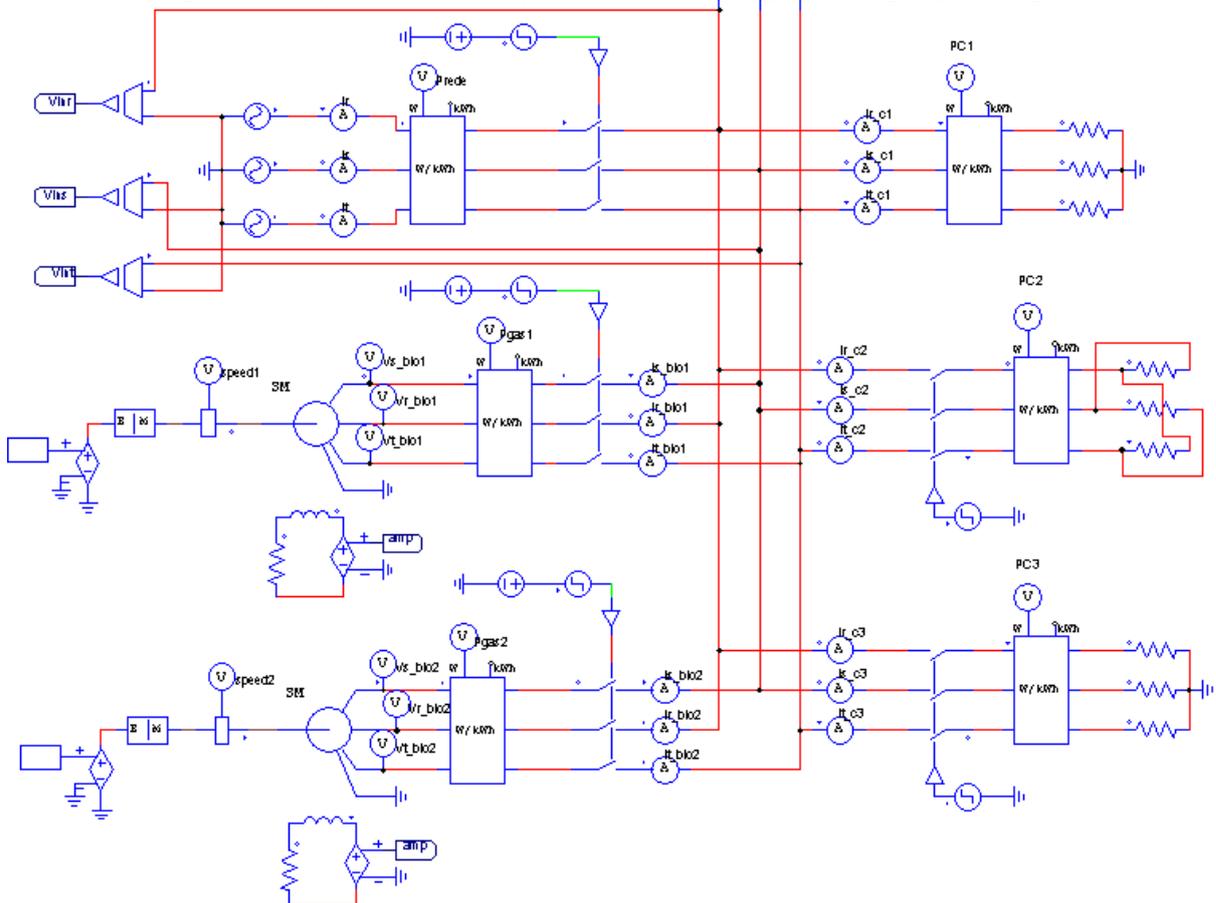
Figura 47 – Variações das correntes com desligamento das gerações.



Fonte: autor (2022)

O *layout* final implementado no PSIM das três cargas, a rede e os dois geradores síncronos estão representados na figura 48.

Figura 48 – Layout do sistema implementado no PSIM apenas com geração a biogás.



Fonte: autor (2022)

### 5.3 BALANÇO DE POTÊNCIA

Na equação (4.1 página 45) tem-se apenas a carga total e a geração de biogás total, no entanto a carga da unidade está distribuída em três principais grupos, como indicado na equação 5.1. Já a geração do biogás é o conjunto de dois geradores operando em paralelo, exemplificado pela equação 5.2, logo realizando as substituições foi possível chegar ao novo equacionamento 5.3.

$$P_{CT} = P_{C1} + P_{C2} + P_{C3} \quad (5.1)$$

$$P_{BGT} = P_{BG1} + P_{BG2} \quad (5.2)$$

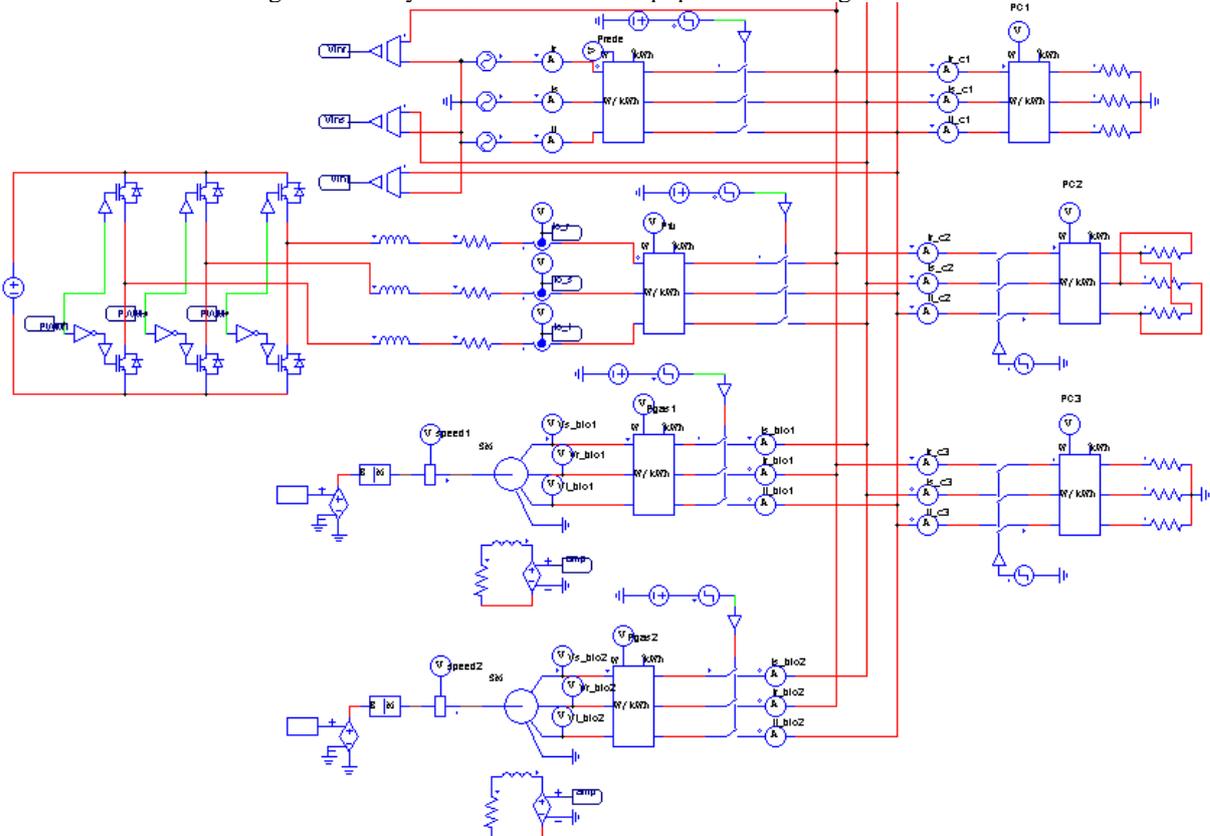
$$P_{FV} + P_{BG1} + P_{BG2} + P_{C1} + P_{C2} + P_{C3} + P_R = 0 \quad (5.3)$$

A carga 1 representa a carga crítica, ou seja, a que está sempre em funcionamento, contemplando os refrigeradores de conservação do sêmen suíno, a ventilação mínima das granjas e as bombas que agitam a lagoa de sólidos. A carga 2 representa o restante da ventilação das granjas e os comedouros. A carga 3 é composta pelos poços que bombeiam água para o reservatório. A potência das gerações e as potências das cargas estão indicadas na equação 5.4.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{FV} = P_{BG1} = P_{BG2} = 75 \text{ kVA} \\ P_{C1} = 100 \text{ kVA} \\ P_{C2} = 125 \text{ kVA} \\ P_{C3} = 30 \text{ kVA} \end{array} \right. \quad (5.4)$$

O fluxograma que representa o sistema em estudo pode ser observado na figura 49. Do lado esquerdo da figura estão representadas as três gerações juntamente com a rede elétrica; no centro, tem-se a barra infinita do sistema; do lado direito, tem-se as cargas. Segue-se a simulação com o inversor alimentado por uma fonte CC, conforme anteriormente mencionado no item 5.1.5 página 60.

Figura 49 – Layout de conexão dos equipamentos e carga no PSIM.



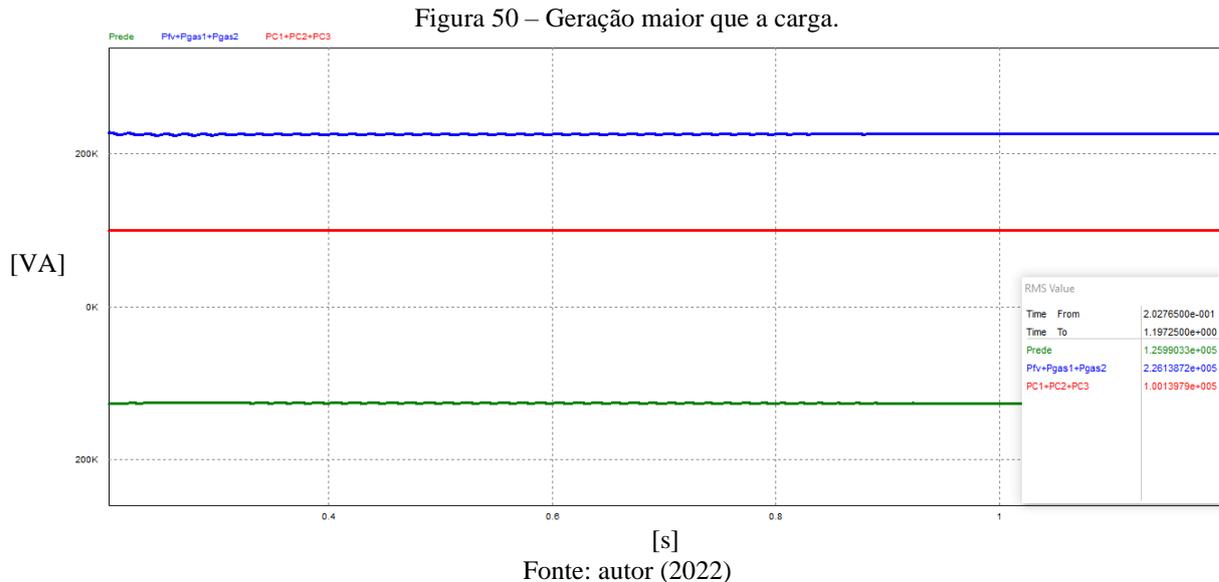
Fonte: autor (2022)

Para exemplificar os cenários enunciados nas seções 5.3.1 até 5.3.4, foram considerados todos os sistemas operando em carga máxima e as tensões foram medidas diretamente na barra infinita da unidade.

### 5.3.1 Geração renovável maior do que a carga

As potências que expressam o cenário na qual a geração renovável é maior que a carga estão apresentadas no equacionamento 5.5. Na figura 50 estão apresentados os valores e a forma de onda da potência. Em azul tem-se a potência das gerações; em vermelho, a potência das cargas em funcionamento, e por último, em verde, a potência da rede. Esse mesmo padrão de cores foi usado para as demais figuras (50 até 57). Pode observar-se ainda que o excedente da produção está sendo injetado na rede elétrica, visto que o valor da rede atingiu valores negativos.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{FV} + P_{BG1} + P_{BG2} = 225 \text{ kVA} \\ P_{C1} = 100 \text{ kVA} \\ P_{C2} = 0 \\ P_{C3} = 0 \\ P_R = -125 \text{ kVA} \end{array} \right. \quad (5.5)$$

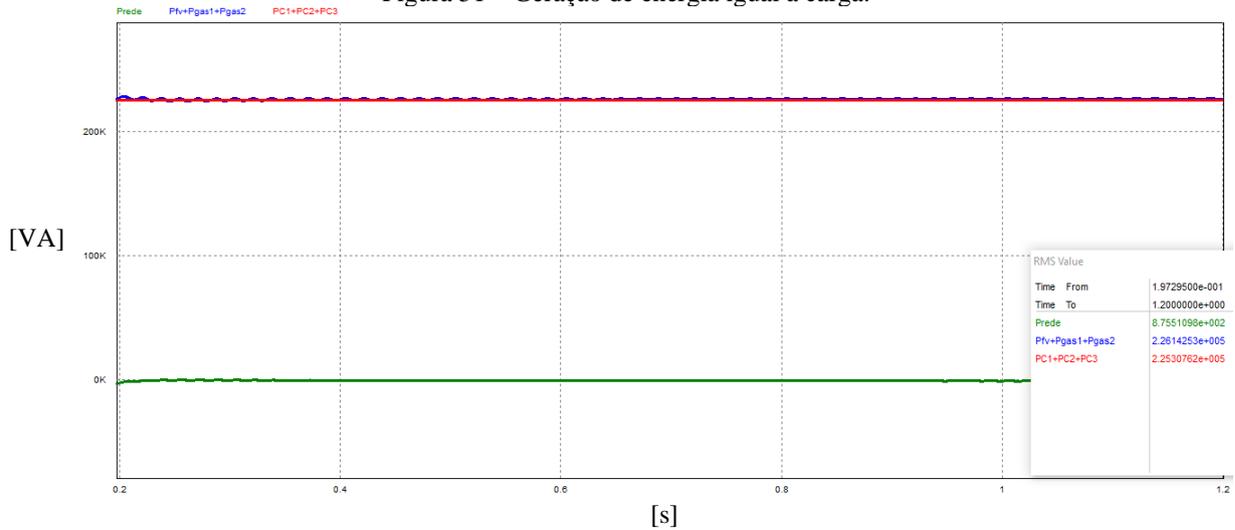


### 5.3.2 Geração renovável igual a carga

Nesse novo evento estão sendo consideradas as potências conforme a equação 5.6. Nota-se na figura 51 que realmente toda potência consumida está sendo fornecida pelas gerações, já que a potência fornecida pela rede elétrica é aproximadamente nula.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{FV} + P_{BG1} + P_{BG2} = 225 \text{ kVA} \\ P_{C1} = 100 \text{ kVA} \\ P_{C2} = 125 \text{ kVA} \\ P_{C3} = 0 \\ P_R \cong 0 \end{array} \right. \quad (5.6)$$

Figura 51 – Geração de energia igual a carga.

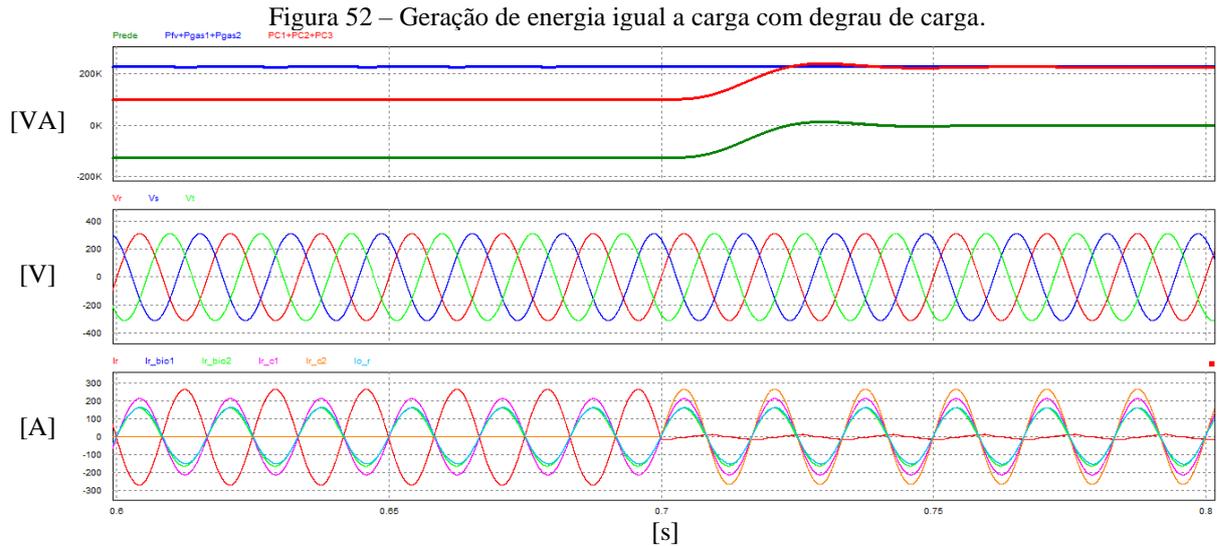


Fonte: autor (2022)

Para ilustrar a variação de carga na unidade, pode-se considerar que após o almoço (período mais quente) entra em funcionamento a carga 2 com um degrau de carga no instante 0,7 s, como indicado na equação 5.7. Pode-se notar na figura 52 que no primeiro instante o excedente está sendo injetado na rede e após o degrau de carga, toda a potência consumida está sendo fornecida pelas gerações e que a potência fornecida pela rede elétrica é aproximadamente nula. Pode-se destacar que a transição de potência está sendo suave, em que as amplitudes de tensão na barra infinita não apresentam modificação. Para analisar as correntes serão divididas em antes do degrau de carga e após o degrau de carga, sendo que as correntes antes do degrau mostram uma defasagem de  $180^\circ$  da rede (cor vermelha) em relação as gerações (cores azul e verde claro) e dessa forma conclui-se que a rede está absorvendo o excedente da corrente das gerações, pois após o degrau a corrente da rede é praticamente zero.

As correntes foram analisadas apenas na fase “r” pois as demais fases estão apenas defasadas de  $120^\circ$ , as correntes das gerações biogás 1, 2 e solar apresentam a mesma amplitude, logo estão sobrepostas na figura 52.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{FV} + P_{BG1} + P_{BG2} = 225 \text{ kVA} \\ P_{C1} = 100 \text{ kVA} \quad 0 \leq t < 0,7 \\ P_{C2} = 125 \text{ kVA} \quad t \geq 0,7 \\ P_{C3} = 0 \\ P_R = -125 \text{ kVA} \quad 0 \leq t < 0,7 \\ P_R \cong 0 \quad t \geq 0,7 \end{array} \right. \quad (5.7)$$

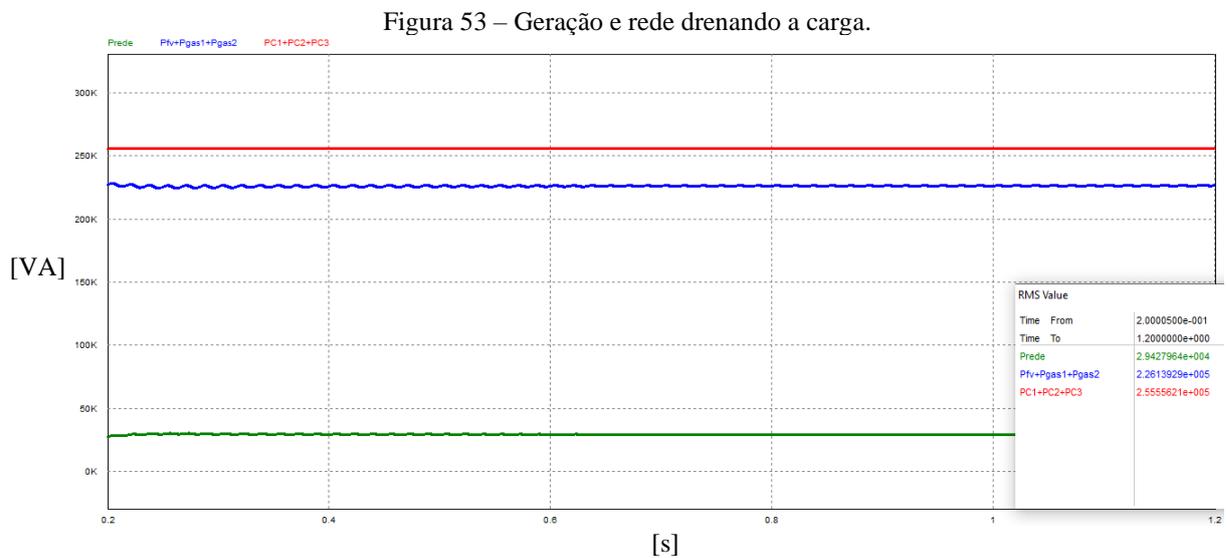


Fonte: autor (2022)

### 5.3.3 Geração renovável inferior a carga

Na suposta condição em que a potência gerada é inferior a consumida, encontra-se uma parcela da potência fornecida pela rede conforme a equação 5.8. A representação do fornecimento contínuo de potência pode ser observada na figura 53.

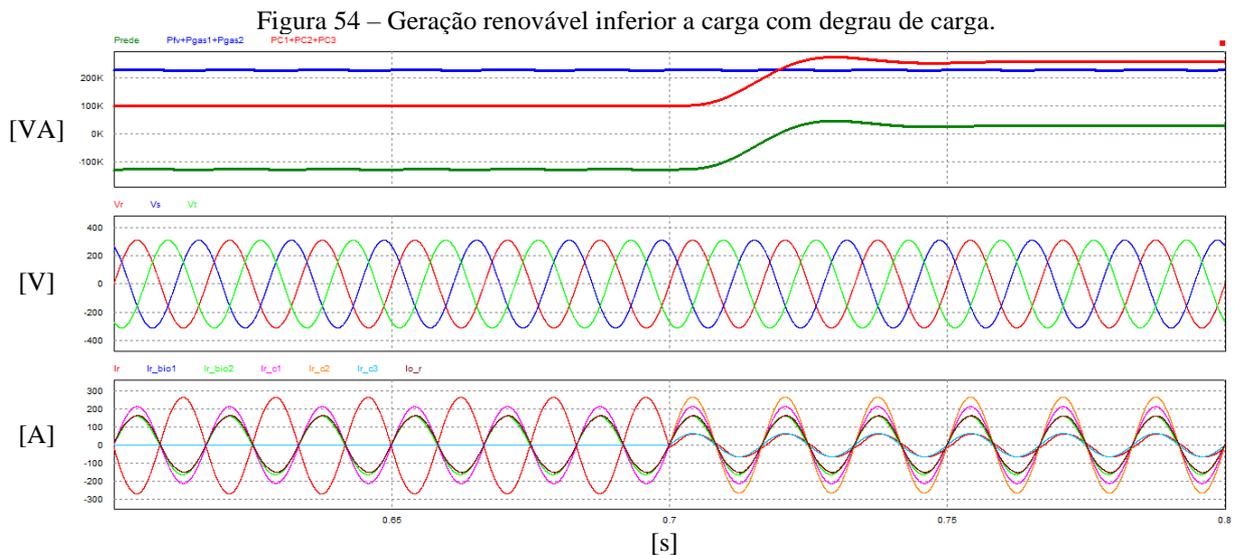
$$\left\{ \begin{array}{l} P_{FV} + P_{BG1} + P_{BG2} = 225 \text{ kVA} \\ P_{C1} = 100 \text{ kVA} \\ P_{C2} = 125 \text{ kVA} \\ P_{C3} = 30 \text{ kVA} \\ P_R = 30 \text{ kVA} \end{array} \right. \quad (5.8)$$



Fonte: autor (2022)

Considerando uma variação de carga na unidade, em que a carga 2 e 3 entrem em funcionamento simultaneamente com um degrau de carga no instante 0,7 s, como indicado em 5.9, obtém-se o comportamento ilustrado na figura 54, na qual se pode observar que a rede elétrica começa a fornecer potência após o degrau de carga. A transição de potência é suave, a amplitude de tensão permanece constante na barra e novamente a rede está absorvendo corrente dos equipamentos de geração num primeiro instante e após o degrau de carga a rede começa a fornecer a corrente para carga.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{FV} + P_{BG1} + P_{BG2} = 225 \text{ kVA} \\ P_{C1} = 100 \text{ kVA} \quad 0 \leq t < 0,7 \\ P_{C2} = 125 \text{ kVA} \quad t \geq 0,7 \\ P_{C3} = 30 \text{ kVA} \quad t \geq 0,7 \\ P_R = -125 \text{ kVA} \quad 0 \leq t < 0,7 \\ P_R = 30 \text{ kVA} \quad t \geq 0,7 \end{array} \right. \quad (5.9)$$



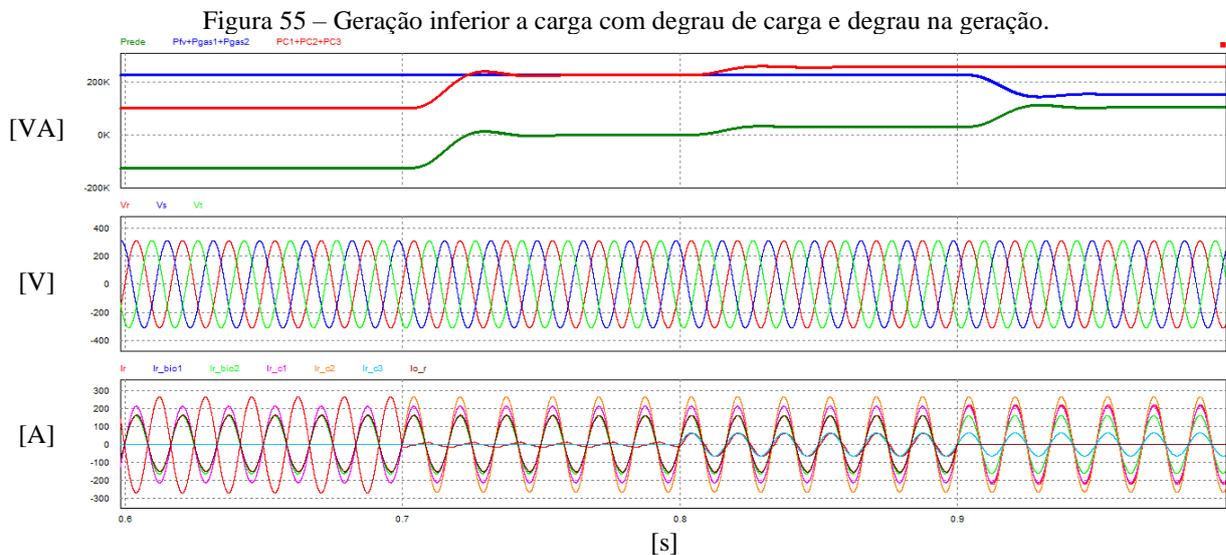
Fonte: autor (2022)

Analisou-se mais uma possibilidade de variação da carga na unidade, a carga 2 entra em operação no instante 0,7 s (período quente) e, dessa forma, o consumo de água aumenta, forçando que a carga 3 entre em operação aos 0,8 s. Devido ao problema em um dos sistemas de geração, fez-se necessário desligá-lo no instante 0,9 s. Todo esse balanço das cargas está representado pela equação 5.10.

Na figura 55, em um primeiro momento o excedente está sendo injetado na rede, com a inserção de mais carga (primeiro degrau), a potência fornecida pela rede elétrica é

aproximadamente nula, após o outro degrau de carga a rede começa a fornecer uma parcela da potência. No último degrau representado pela retirada de um dos equipamentos de geração, a rede supre o restante da corrente aumentando sua amplitude. Novamente, observa-se que a transição ocorre de forma suave em ambos os degraus, na amplitude de tensão da barra não se encontram alterações e a corrente vai ajustando o valor das amplitudes conforme os degraus de carga.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{FV} + P_{BG1} + P_{BG2} = 225 \text{ kVA} \quad 0 \leq t < 0,9 \\ P_{FV} + P_{BG1} + P_{BG2} = 150 \text{ kVA} \quad t \geq 0,9 \\ P_{C1} = 100 \text{ kVA} \quad 0 \leq t < 0,7 \\ P_{C2} = 125 \text{ kVA} \quad t \geq 0,7 \\ P_{C3} = 30 \text{ kVA} \quad t \geq 0,8 \\ P_R = -125 \text{ kVA} \quad 0 \leq t < 0,7 \\ P_R = 0 \quad 0,7 \leq t < 0,8 \\ P_R = 30 \text{ kVA} \quad 0,8 \leq t < 0,9 \\ P_R = 105 \text{ kVA} \quad t \geq 0,9 \end{array} \right. \quad (5.10)$$



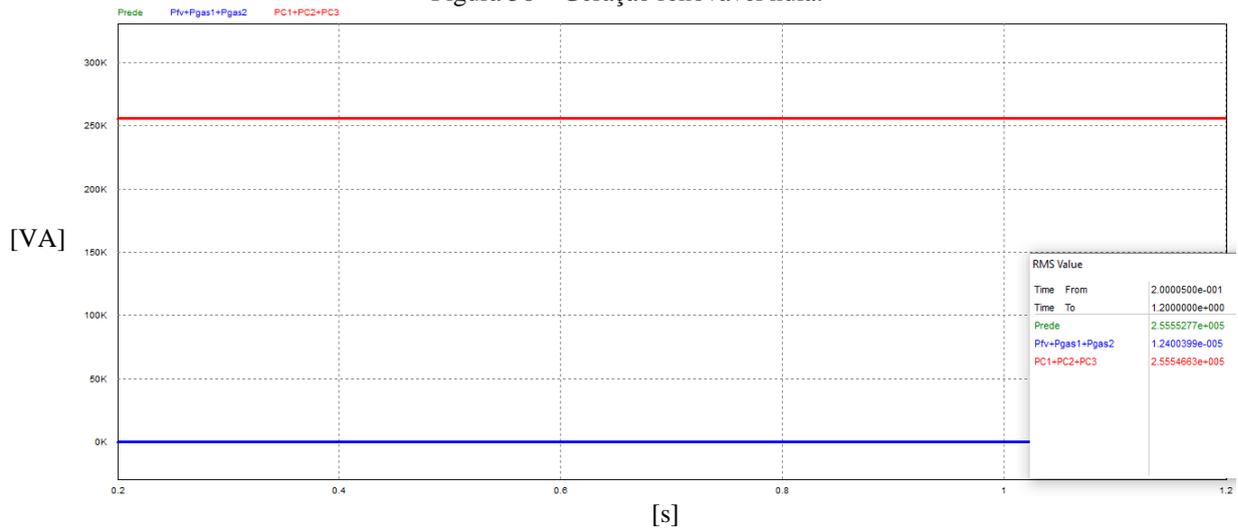
Fonte: autor (2022)

### 5.3.4 Geração renovável nula

No cenário hipotético em que todas as fontes de gerações sejam interrompidas devido a algum defeito ou manutenção, todo o consumo da carga será consequentemente drenado da rede elétrica, como representado pela equação 5.11 e ilustrado pela figura 56.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{FV} + P_{BG1} + P_{BG2} = 0 \text{ kVA} \\ P_{C1} = 100 \text{ kVA} \\ P_{C2} = 125 \text{ kVA} \\ P_{C3} = 30 \text{ kVA} \\ P_R = 255 \text{ kVA} \end{array} \right. \quad (5.11)$$

Figura 56 – Geração renovável nula.

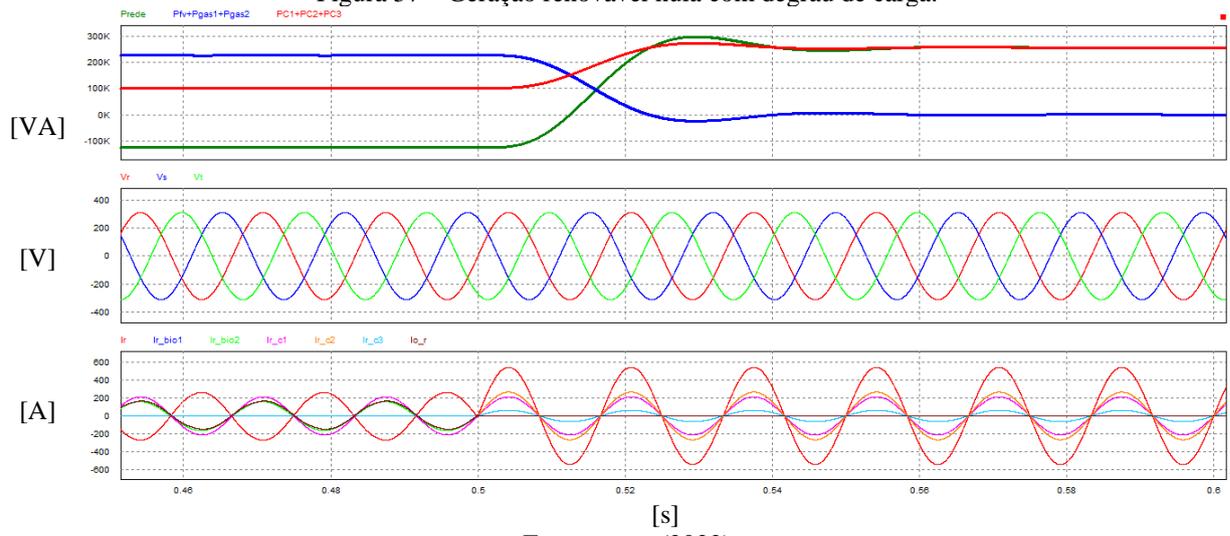


Fonte: autor (2022)

Considerando que as gerações estão em funcionamento até 0,5 s, e após esse determinado instante, apresenta a interrupção do fornecimento pelas gerações. Pode se observar a rede assumindo a potência total, onde a equação 5.12 satisfaz esse fenômeno. Por meio da figura 57 é possível observar essa transição que ocorre de forma suave e a tensão novamente não apresenta mudança de amplitude. Após 0,5 s tem se a alteração da amplitude da corrente da rede, que por sua vez indica a rede fornecendo toda a potência as cargas.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{FV} + P_{BG1} + P_{BG2} = 225 \text{ kVA} \quad 0 \leq t < 0,5 \\ P_{FV} + P_{BG1} + P_{BG2} = 0 \quad t \geq 0,5 \\ P_{C1} = 100 \text{ kVA} \quad 0 \leq t < 0,5 \\ P_{C2} = 125 \text{ kVA} \quad t \geq 0,5 \\ P_{C3} = 30 \text{ kVA} \quad t \geq 0,5 \\ \left\{ \begin{array}{l} P_R = 100 \text{ kVA} \quad 0 \leq t < 0,5 \\ P_R = 255 \text{ kVA} \quad t \geq 0,5 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (5.12)$$

Figura 57 – Geração renovável nula com degrau de carga.



## 6 CONCLUSÃO

O trabalho apresentou uma prévia do cenário atual de gerações renováveis e destacou a importância de continuar os investimentos neste setor. Evidenciou também o potencial da geração energética a partir do biogás, podendo até suprir 35% de toda a demanda brasileira. Realizou-se uma breve comparação entre as eficiências energéticas dos sistemas considerados, na qual o solar atualmente apresenta módulos em torno de 22,6% e o biogás entre 30 – 40%.

Analisando os sistemas existentes, conseguiu-se por meio do fator de capacidade fornecer um indicativo real do quanto o sistema de geração produziu, quando comparado pela sua capacidade máxima de geração, ambas calculadas num período anual. Chegou-se ao indicativo de que a solar apresentou um FC inferior ao biogás, como conclusão pode-se salientar que o período de funcionamento do solar é apenas durante o dia, considerando todas as condições ideais.

Por outro lado, o biogás consegue operar próximo a sua capacidade máxima, desde que o nível do gás não varie. Um ponto que o FC não considera é a falta de energia, como o presente trabalho trata de unidades diferentes e distantes entre elas, pode ocorrer a falta de energia em apenas uma unidade e naquele período não se teria a geração. Vale ressaltar que a geração solar está instalada em um distrito na qual a energia é mais estável, já a de biogás está localizada na zona rural, apresentando uma maior instabilidade no fornecimento de energia.

As simulações foram realizadas em etapas, e foram iniciadas com o PLL apresentando um transitório no seu início, o qual se estabilizava com poucos ciclos. Abordando o sistema solar fotovoltaico, os dois principais blocos: MPPT e controle do inversor, foram os mais trabalhosos durante a execução do trabalho, mas ainda assim atenderam às expectativas. Após os blocos terem sido testados, realizou-se a integração de todo o sistema, notando-se que a simulação contendo as placas solares, os inversores e a rede estavam demorando consideravelmente.

Também houve significativa dificuldade em obter a potência total do sistema (75 kVA) a partir dos módulos solares. Por isso, para a simulação do sistema com a carga, utilizou-se uma estratégia de alimentar o inversor por uma fonte CC, ficando com um tempo de simulação menor. Para a simulação do biogás utilizou-se a simplificação da máquina primária operando com frequência constante, posto que a tensão na armadura e frequência são

diretamente definidas pela barra infinita. Novamente, ambos sistemas se apresentaram de forma satisfatória.

Quando foi considerado todo o sistema para realizar o balanço de potência, tinha-se quatro possíveis cenários: geração maior que a carga, geração igual a carga, geração inferior a carga e geração nula. As simulações variavam conforme os degraus de carga, apresentando formas de onda da tensão sem variações, uma estabilização da potência em poucos ciclos e a forma de onda da corrente acompanhando os degraus de carga, sendo que em algumas situações injetavam corrente na rede (excedente da geração). Já em outras situações, a rede injetava corrente (gerações não suficientes ou nula). O balanço de potência foi significativamente satisfatório atendendo todos os cenários mencionados.

Tratando de possíveis melhorias para o trabalho, pode-se destacar que algumas considerações simplificaram os resultados, ou seja, trabalhou-se com o sistema equilibrado e com cargas totalmente resistivas, entretanto sabe-se que no mundo real esse cenário é quase impossível. Logo, uma sugestão de melhoria é inserir indutores e capacitores nas cargas, realizar a adição de algumas cargas monofásicas, desequilibrando o sistema. Dessa forma, seria simulado um sistema mais próximo da realidade.

Outra proposta de aprimoramento para trabalhos futuros, seria realizar o estudo de um sistema operando como microrrede. A microrrede é um sistema que em uma eventual falta de energia da rede de alimentação, as gerações assumem o fornecimento de energia, operando com o sistema isolado apenas na unidade. Considerando o mesmo sistema, seria necessário o controle das cargas, posto que a demanda total da unidade em algumas situações poderia ser maior que as gerações. Dessa forma, o sistema se torna muito atrativo, pois durante o dia a fotovoltaica auxiliaria na demanda, diminuindo assim a demanda da geração do biogás e consequentemente pouparia gás para operar no período noturno.

## REFERÊNCIAS

ANEEL. **ANEEL reforça protagonismo do Brasil em fontes renováveis no Energyyear 2022.** Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/aneel-reforca-protagonismo-do-brasil-em-fontes-renovaveis-no-energyyear-2022>. Acesso em 06 mar. 2022.

BARRERA, Paulo. **Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural.** Editora Ícone, São Paulo, 2ª Ed., 2003.

BRITO, A. G. M. **Inversores Integrados Monofásicos e Trifásicos para Aplicações Fotovoltaicas: Técnicas para obtenção de MPPT, detecção e proteção de ilhamento, sincronização e paralelismo com a rede de distribuição de energia elétrica.** Tese submetida à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – FEIS/UNESP, 2013.

CENBIO. **Instalação e Testes de uma Unidade de Demonstração de Geração de Energia Elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto.** Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/wp-content/uploads/sites/3/2014/01/osvaldo.pdf>. Acesso em 20 fev. 2022.

COELHO, F. R. **CONCEPÇÃO, ANÁLISE E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA MICRORREDE INTERLIGADA À REDE ELÉTRICA PARA ALIMENTAÇÃO ININTERRUPTA DE CARGAS CC A PARTIR DE FONTES RENOVÁVEIS.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Instituto de Eletrônica de Potência – (INEP). Florianópolis. 2013.

CONTEUDISTA. **ENTENDA TUDO SOBRE O FATOR DE CAPACIDADE.** Disponível em: <https://energes.com.br/fator-de-capacidade/>. Acesso em 19 fev. 2022.

COPEL. **TARIFAS APLICADAS À ALTA TENSÃO.** 2021. Disponível em: [https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/tabela\\_tarifas/\\$FILE/Tabela%20tarifas.pdf](https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/tabela_tarifas/$FILE/Tabela%20tarifas.pdf). Acesso em 02 jan. 2022.

COSTA, D. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto.** Dissertação (Mestrado em Energia), Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia – PIPGE (EP/FEA/IEE/IF). Universidade de São Paulo – USP, São Paulo. 2006.

ECYCLE. **Biogás: o que é, tipos e vantagens do uso.** Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/biogas/>. Acesso em 15 jan. 2022.

ELIAS, J. **Como falta de chuva recorde está fazendo a sua conta de luz ficar mais cara.** Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/como-a-falta-de-chuva-recorde-esta-fazendo-sua-conta-de-luz-ficar-mais-cara/>. Acesso em 10 jan. 2022.

FITZGERALD, A. E.; UMANS, Stephen D.; KINGSLEY JUNIOR, Charles. **Máquinas Elétricas: Com Introdução à Eletrônica de Potência.** 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

IMHOFF, Johninon. **Desenvolvimento de conversores estáticos para sistemas fotovoltaicos autônomos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2007.

LEÃO, Fabio. **Máquinas Síncronas**. Disponível em: [https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/slides-2016-cap5\\_eletrotecnica\\_fabioleao.pdf](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/slides-2016-cap5_eletrotecnica_fabioleao.pdf). Acesso em 14 fev. 2022.

LUNA, Denise. **ABiogás: Biogás vai crescer 30% este ano e tem potencial de dobrar produção**. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/abiogas-biogas-vai-crescer-30-este-ano-e-tem-potencial-de-dobrar-producao/>. Acesso em 16 jan. 2022.

LUNA, Denise. **Geração solar distribuída atinge 9 GW espalhados em 5.541 municípios**. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/geracao-solar-distribuida-atinge-9-gw-espalhados-em-5-541-municipios/>. Acesso em 12 fev. 2022.

MARTINS, C. D.; BARBI. I. **Eletrônica de Potência conversores CC-CC básicos não isolados**. 2. ed. Florianópolis: Ed. dos autores 2006.

POMILIO, A. J. **Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Universidade estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas. 2013.

RENOVIGI. **Características RENO-75k-NG**. Disponível em: [https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/reno-attachments/938bfa60-f2cc-4620-886d-cbea94aa36fb/e215d287-aa13-4af5-98c4-7623eac4ad55/798550c5-d975-497a-8b56-1efbdf06d901/Cat%C3%A1logo\\_Reno-75K-NG.pdf?1607694893](https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/reno-attachments/938bfa60-f2cc-4620-886d-cbea94aa36fb/e215d287-aa13-4af5-98c4-7623eac4ad55/798550c5-d975-497a-8b56-1efbdf06d901/Cat%C3%A1logo_Reno-75K-NG.pdf?1607694893). Acesso em 09 jan. 2022.

RESIN. **Datasheet Painéis Solares RSM156-6-440M**. Disponível em: [https://helte.com.br/17\\_risen](https://helte.com.br/17_risen). Acesso em 08 jan. 2022.

SANTOS H. G. C.; FERREIRA V. R.; SILVA M. S., FILHO J. C. B. **Fourier-Based PLL Applied for Selective Harmonic Estimation in Electric Power Systems**. Journal of Power Electronics, Vol. 13, No. 5, 2013.

SANTOS, A. M. **Preparação da Mistura Ar-Combustível**. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/13183026/EstequiometriaPreparacao-Da-Mistura-ArCombustivel>. Acesso em 21 fev. 2022.

SICES. **Manual do usuário GC315xx – GC400xx**. Rev. 03, 2017.

SOUZA, R. P. **ANÁLISE DA OPERAÇÃO E CONTROLE DE UM CONVERSOR MODULAR PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS A PARTIR DOS CONVERSORES BOOST E MEIA-PONTE**. Universidade federal do Pampa, Alegrete, 2018.

SVARC, Jason. **Most Efficient Solar Panels 2022**. Disponível em: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/most-efficient-solar-panels>. Acesso em 24 fev. 2022.

SVARC, Jason. **MPPT Solar Charge Controllers Explained**. Disponível em: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/mppt-solar-charge-controllers>. Acesso em 24 fev. 2022.

TAVARES, N. **MODELAGEM E ANÁLISE DE CONVERSORES TRIFÁSICOS CC/CA SUBMETIDOS A DESEQUILÍBRIO DA REDE ELÉTRICA**. Trabalho de Conclusão de Curso - Politécnica UFRJ. Rio de Janeiro. 2018.

WEG. **DT-5 CARACTERÍSTICAS E ESPECIFICAÇÕES DE GERADORES**. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h68/h68/WEG-curso-dt5-caracter-sticas-e-especifica-o-de-geradores-artigo-tecnico-portugues.pdf>. Acesso em 15 jan. 2022.