



Renata Oliveira Vieira

**Estudo experimental e numérico de um sistema integrado
híbrido solar fotovoltaico com célula a combustível
usando etanol e baterias**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Sergio Leal Braga
Co-orientador: Dr. Epifanio Mamani Ticona

Rio de Janeiro
Outubro de 2021



Renata Oliveira Vieira

Estudo experimental e numérico de um sistema integrado híbrido solar fotovoltaico com célula a combustível usando etanol e baterias

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Sergio Leal Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Epifanio Mamani Ticona

Coorientador

Instituto de Energia - PUC-Rio

Prof. Florian Alain Yannick Pradelle

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Eduardo Torres Serra

ES+PS Consultoria

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Renata Oliveira Vieira

Graduou-se em Engenharia Mecânica na UFES (Universidade Federal do Espírito Santo) em 2015. Durante a graduação mostrou seu interesse pela energia limpa e sustentabilidade, apresentando um projeto de graduação utilizando a tecnologia Stirling e energia solar. Fez MBA em Gestão da Qualidade e Processos e pós-graduação em Engenharia e Segurança do Trabalho. Desenvolveu, para obtenção de seu grau de Mestre em Engenharia Mecânica, uma bancada experimental e um simulador para um sistema de geração de energia elétrica, utilizando fontes limpas de energia no Laboratório de Engenharia Veicular (LEV) da PUC-Rio.

Ficha Catalográfica

Vieira, Renata Oliveira

Estudo experimental e numérico de um sistema integrado híbrido solar fotovoltaico com célula a combustível usando etanol e baterias / Renata Oliveira Vieira; orientador: Sergio Leal Braga; coorientador: Epifanio Mamani Ticona. – 2021.

111 f.; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2021.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Célula a combustível. 3. LTPEM. 4. Reforma do etanol. 5. Sistema isolado. 6. Simulação. I. Braga, Sergio Leal. II. Ticona, Epifanio Mamani. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

A Deus, pela oportunidade e por nunca ter desistido de mim, que a meio uma tragédia o Senhor me trouxe luz e força para conseguir continuar lutando.

Ao meu orientador Prof. Dr. Sergio Leal Braga e ao meu coorientador Dr. Epifanio Mamani Ticona por toda dedicação, orientação e apoio durante toda a concepção deste trabalho.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos integrantes da banca, Dr. Eduardo Torres Serra e o Dr. Florian Alain Yannick Pradelle.

Gostaria de agradecer ao coordenador Dr. Florian Alain Yannick Pradelle durante essa jornada e todo apoio dado a mim, onde foi de suma importância. Gostaria de agradecer a Carina Beline por toda dedicação junto a coordenação para que este trabalho se concretizasse.

Aos Mestres Adriano da Costa Rodrigues e Anna Camila Sousa e Silva, por se dispuserem a ajudar, transmitir seus conhecimentos e por poder dar continuidade aos projetos iniciados por eles.

À equipe técnica do Laboratório, Senhores Eng^o. MSc. Nestor Correa Cotelo e Eng^o. Severino Antônio de Souza Wanderley, pela dedicação e comprometimento por montar os equipamentos necessário para os testes, assim como o auxílio e na realização dos testes.

Aos meus pais Gilda Maria e Raimundo Luiz, por todo amor e dedicação, por sempre acreditarem e apoiarem os meus sonhos. As minhas irmãs Marcela (In

memoriam) e Giselle, que mesmo longe, uma sempre torceu pela outra. As minhas lindas sobrinhas, tão amadas, Júlia e Letícia.

Ao SESI, empresa que trabalho atualmente, pelo incentivo e apoio durante a longa jornada do mestrado.

À empresa Guascor por todo incentivo, tanto pessoal quanto financeiro. Uma empresa que acredita e incentiva a pesquisa, e que se preocupa com o meio ambiente e o futuro.

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

Resumo

Vieira, Renata Oliveira; Braga, Sergio Leal; Ticona, Epifanio Mamani. **Estudo experimental e numérico de um sistema integrado híbrido solar fotovoltaico com célula a combustível usando etanol e baterias.** Rio de Janeiro, 2021.111p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho consiste no estudo de um sistema isolado de geração de energia elétrica, ou seja, não está ligado à rede. Seus objetivos consistem na montagem de uma banca experimental, na construção de um simulador e na realização de testes experimentais. O sistema físico possui como componentes: painéis fotovoltaicos, grupo de baterias, inversor de corrente e um sistema integrado de geração de energia elétrica (reformador + célula combustível). O reformador utiliza o etanol como combustível para geração de gás reformado que abastece uma célula a combustível do tipo Membrana de Troca de Prótons de Baixa Temperatura (LTPEM). O gás reformado é composto, principalmente, por hidrogênio e óxidos de carbono, além do metano em baixas porcentagens. Para análise do sistema, foi feito um volume de controle em cada componente, e retirados dados como potência, vazão, consumo elétrico, entre outros dados, assim como foi realizado diversos experimentos no Laboratório com os equipamentos separados e em conjunto. Com estes dados, foi possível o desenvolvimento de um simulador em Excel e Visual Basic for Applications (VBA), utilizando equações fenomenológicas. Após a caracterização dos equipamentos foi possível a validação do simulador. Com este validado, foi possível simular alguns cenários pré-estabelecidos, com objetivo de comprovar ou não a viabilidade técnica do sistema de geração isolada de energia elétrica.

Palavras-chave

Célula a combustível; LTPEM; reforma do etanol; sistema isolado; simulação.

Abstract

Vieira, Renata Oliveira; Braga, Sergio Leal (Advisor); Ticona, Epifanio Mamani. **Experimental and numerical study of a integrated solar photovoltaic hybrid system with a fuel cell using ethanol and batteries.** Rio de Janeiro, 2021. 111p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work consists of the study of an isolated system of electricity generation, that is, it is not connected to the grid. Its objectives are to set up an experimental bench, build a simulator and carry out experimental tests. The physical system has as components: photovoltaic panels, battery pack, current inverter, and an integrated electric power generation system (reformer + fuel cell). The reformer uses ethanol as fuel to generate reformed gas that supplies a Low Temperature Proton Exchange Membrane (LTPEM) fuel cell. The reformed gas is mainly composed of hydrogen and carbon oxides, in addition to methane in low percentages. For system analysis, a control volume was made in each component, and data such as power, flow, electrical consumption, among other data, was taken, as well as several experiments were carried out in the Laboratory with the separate equipment and together. With these data, it was possible to develop a simulator in Excel and Visual Basic for Applications (VBA), using phenomenological equations. After the characterization of the equipment, it was possible to validate the simulator. With this validated, it was possible to simulate some pre-established scenarios, with the objective of proving or not the technical feasibility of the isolated electric energy generation system.

Keywords

Fuel Cell; LTPEM; Ethanol Reform; Isolated System; Simulation.

Sumário

1. Introdução	14
1.1. Motivação	17
1.2. Objetivos do trabalho	20
1.3. Organização do trabalho	21
2. Revisão bibliográfica	22
2.1. Sistemas de armazenamento de energia	22
2.1.1. Ar comprimido (CAES)	22
2.1.2. Capacitores eletroquímicos	23
2.1.3. Volante de Inércia	24
2.1.4. Armazenamento de energia em forma química	25
2.2. Energia Solar Fotovoltaica	28
2.3. Inversor	31
2.4. Células a combustível (CaC)	31
2.5. O Etanol como fonte de Hidrogênio	38
2.6. Energia em comunidades isoladas	41
2.7. SHGD aplicado a comunidades isoladas	42
3. Metodologia	46
3.1. Objeto de estudo	46
3.1.1. Reformador de Etanol	50
3.1.2. Célula a combustível	51
3.1.3. Inversor	52
3.1.4. Banco de baterias	54
3.1.5. Painéis fotovoltaicos	55
3.2. Abordagem experimental	55
3.2.1. Célula a combustível LTPEM	56
3.2.2. Reformador de Etanol	67
3.2.3. Sistema Integrado = Reformador de Etanol + CaC	72
3.2.4. Inversor	73

3.2.5. Baterias	74
3.2.6. Painéis Fotovoltaicos	77
3.3. Simulação numérica	78
4. Resultados e discussões	81
4.1. Validação do simulador	81
4.1.1. Caso Valid1	83
4.1.2. Caso Valid2	84
4.1.3. Conclusões parciais	86
4.2. Comportamento do sistema a partir de casos simulados	86
4.2.1. Autonomia do banco de baterias	87
4.2.2. SIGFI45 com sistema integrado	88
4.2.3. Determinação do máximo número de usuários SIGFI45	89
4.3. Determinação do mínimo número de bancos de baterias	90
4.4. Sistema final	92
4.5. Análise básica de custos	94
5. Conclusões	98
6. Referências bibliográficas	100
ANEXO I Catálogo da Célula a Combustível	108
ANEXO II Catálogo do Inversor Sunny Island 3.0M	109
ANEXO III Controlador de Carga	111

Lista de Figuras

Figura 1 - Perfil de carga SIGFI 45 (Guascor, 2017)	16
Figura 2 - Consumo mundial de energia por fonte (International Energy Outlook 2019, EIA)	18
Figura 3 - Mariz elétrica brasileira (EPE, 2021)	19
Figura 4 - Tecnologias de armazenamento de energia (Camargo, 2016).....	22
Figura 5 - Sistema CAES. (Díaz-González <i>et al.</i> , 2012).....	23
Figura 6 - Sistema FES. (DÍAZ-GONZÁLEZ <i>et al.</i> , 2012).....	24
Figura 7 - Mapa de radiação solar no Brasil (Copetti & Macagnan, 2007)	28
Figura 8 - Estruturas moleculares de semicondutores P e N. (Villalva & Gazoli, 2012).....	29
Figura 9 - Processo de conversão fotovoltaica (Zilles <i>et al.</i> , 2012)	30
Figura 10 - Esquema básico de funcionamento de uma CaC (Kirubakaran <i>et al.</i> , 2009).....	32
Figura 11 - Algumas das diversas tecnologias de obtenção de hidrogênio (Holladay <i>et al.</i> , 2009; Tanksale, 2010)	38
Figura 12 - Modelo de SHGD (Barbosa <i>et al.</i> , 2005)	43
Figura 13 - Diagrama de blocos com ligações entre os equipamentos (Elaboração própria, 2021)	49
Figura 14 - Reformador de Etanol (Elaboração própria, 2021).....	51
Figura 15 - Unidade da Célula a Combustível inserida no laboratório da PUC-Rio (Elaboração própria, 2021).....	52
Figura 16 - Curva característica da eficiência do Inversor Sunny Island 3.0 (Silva, 2017).....	53
Figura 17 - Vista do inversor e ao lado o BatFuse; sistema com lâmpadas (Elaboração própria, 2021).....	53
Figura 18 - Medição indireta do estado de carga das baterias por meio do dispositivo Sunny Remote Control do inversor SMA. (Elaboração própria, 2021)	54
Figura 19 - Vista do banco de baterias empregado no sistema de geração (Elaboração própria, 2021).....	54
Figura 20 - Painéis fotovoltaicos (Silva,2017)	55

Figura 21 - Análise energética da Célula a Combustível (Elaboração própria, 20	56
Figura 22 - Caracterização da CaC utilizando H ₂ puro (Elaboração própria, 2021)	58
Figura 23 - Potência consumida pela CaC (W) (Elaboração própria, 2021)	60
Figura 24 - Curva de polarização da CaC (40 células) (Elaboração própria, 2021)	61
Figura 25 - Controlador de carga (Elaboração própria, 2021)	62
Figura 26 – Consumo específico em L/Wh da CaC - Teste 5 (Elaboração própria, 2021)	63
Figura 27 - Comparação entre valores medidos e valores fornecidos pelo fabricante Helbio (Elaboração própria, 2021)	64
Figura 28 - Curva de eficiência do conversor CC/CC (Elaboração própria, 2021)	64
Figura 29 - Análise energética do reformador a vapor de etanol (Elaboração própria, 2021)	68
Figura 30 – Curva de consumo do reformador (Elaboração própria, 2021)	69
Figura 31 - Energia acumulada consumida no Reformador (Elaboração própria, 2021)	70
Figura 32 - Volume de controle no Reformador (Autor, 2021)	71
Figura 33 - Curva de consumo do Sistema Integrado (W) (Elaboração própria, 2021)	72
Figura 34 - Consumo elétrico do Sistema Integrado (Wh) (Elaboração própria, 2021)	72
Figura 35 - Eficiência do Inversor (Silva, 2017)	74
Figura 36 - Modelagem da bateria (Silva, 2017)	75
Figura 37 - Potência fornecida pelos painéis fotovoltaicos (Silva, 2017)	78
Figura 38 - Circuito elétrico equivalente do sistema híbrido de geração de energia elétrica (Silva, 2017)	79
Figura 39 - Dados de entrada (Elaboração própria, 2021)	82
Figura 40 - Comparação entre o SOC experimental e o simulado para o Caso/Validação 1 (Elaboração própria, 2021)	84
Figura 41 - Comparação entre o SOC experimental e o simulado para o Caso Valid2 (Elaboração própria, 2021)	85

Figura 42 - Variação do SOC (Elaboração própria, 2021)	87
Figura 43 - Variação do SOC em 15 dias (Elaboração própria, 2021).....	88
Figura 44 – Caso II - Variação do SOC (Elaboração própria, 2021)	88
Figura 45 - Caso III (Elaboração própria, 2021)	89
Figura 46 - Armazenamento no banco de baterias (Elaboração própria, 2021)....	91
Figura 47 - Sistema GUASCOR Final (Elaboração própria, 2021)	92
Figura 48 - SOC (Elaboração própria, 2021)	93
Figura 49 - Potência fornecida pela CaC no padrão de variação da capacidade do SI (Elaboração própria, 2021)	
Figura 50 - Variação do SOC (Elaboração própria, 2021)	94
Figura 51 - Potência do Inversor (Elaboração própria, 2021)	94

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Classificação e disponibilidade de energia conforme Resolução nº. 439/2012 (ANEEL, 2012)	15
Tabela 2 - Detalhamento da demanda de energia elétrica dos componentes de uma unidade consumidora SIGFI 45 (Guascor, 2017)	16
Tabela 3 - Quadro comparativo entre baterias de Chumbo-ácido x NiCd x Li-íon (Furlan, 2008)	27
Tabela 4 – Tipos de células de combustível testadas e em execução que fornecem serviços de energia on-grid, off-grid e potência automotiva (Cerri <i>et al.</i> , 2012) ..	33
Tabela 5 - Valores da vazão de acordo com cada capacidade (Elaboração própria, 2021).....	61
Tabela 6 - Resultados dos ensaios da Célula a combustível (CaC) (Elaboração própria, 2021)	63
Tabela 7 - Rendimentos da CaC, Elaboração própria (2021).....	66
Tabela 8 - Dados de entrada e saída do Caso Valid 1 (Elaboração própria, 2021)83	
Tabela 9 - Dados de entrada e saída do Caso Valid2	85
Tabela 10 - Especificações para SIGFI com controlador MPPT (ANEEL, 2012) 90	
Tabela 11 - Custos dos equipamentos (Elaboração própria, 2021)	95
Tabela 12 - Custos dos equipamentos do trabalho base (Silva, 2017; Rodrigues, 2018).....	95
Tabela 13 - Custo total dos equipamentos para o Caso 1 (Elaboração própria, 2021)	96
Tabela 14 - Custo total dos equipamentos para o CASO 1. (Silva, 2017; Rodrigues, 2018).....	96
Tabela 15 - Custo total dos equipamentos para o Caso 2 (Elaboração própria, 2021)	97

1. Introdução

Em 2003, o Governo Federal, através do Ministério de Minas e Energia (MME), criou o “Programa Luz para Todos”. O objetivo deste programa era levar energia elétrica às regiões rurais e/ou casas (comunidades) que ainda não possuía acesso a esse serviço público. O programa abrange o atendimento das necessidades desses consumidores de três formas: Extensão da rede elétrica convencional, Sistemas de Geração Descentralizada com redes isoladas e Sistemas de Geração individuais (Brasil, 2015).

O maior desafio deste programa era levar energia elétrica a Amazônia, principalmente em comunidades isoladas, de difícil acesso. Para atender essa demanda os sistemas de geração isoladas seriam uma opção a ser considerada, mas que ainda não estão sendo implementados (Pereira *et al.*, 2010).

Hosoi (2011, p. 4) entende comunidades isoladas como “(...) aglomerados de moradias ou núcleos habitacionais localizados em periferias de cidades, ou comunidades de difícil acesso, cuja interligação aos sistemas municipais demonstra-se inviável, exigindo soluções independentes”.

De acordo com Zukowski Jr. (2010), ao citar o termo comunidades isoladas, considera-se o conceito de isolamento não apenas como isolamento físico por falta de acesso por estradas pavimentadas ou por pistas convencionais de pouso. Mas, também, como a falta de acesso à possibilidade de crescimento econômico, social e político, além de acesso físico a outras localidades. Além do que, acrescenta-se, ainda, a falta de acesso à educação formal e aos sistemas integrados de distribuição de energia elétrica. Sob este ponto de vista, Zukowski Jr. (2010), considera que o Brasil possui muitas localidades isoladas, principalmente, na região norte do país. Logo, considera a disponibilidade de energia elétrica como um dos critérios para avaliar o grau de isolamento.

A partir deste programa, foram determinadas especificações técnicas para atender as áreas remotas com sistemas isolados. Onde esse atendimento poderia ser feito de duas formas: Microsistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia

Elétrica (MIGDI) ou Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente (SIGFI). Sendo que, os métodos e os requisitos foram estabelecidos pela Resolução Normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nº 439/2012, onde, fonte intermitente é todo tipo de “recurso energético renovável que, para fins de conversão em energia elétrica pelo sistema de geração, não pode ser armazenado em sua forma original” (Eletrobras, 2017).

De acordo com o artigo 5º da Resolução Normativa Nº 493 de 05 de junho de 2017 da ANEEL, os sistemas MIGDI são microssistemas isolados de geração e distribuição de energia elétrica com uma potência de até 100 kW. E os sistemas SIGFI são sistemas que atendem apenas a uma unidade consumidora, cujo fornecimento se dê, exclusivamente, por uma fonte intermitente.

Segundo o artigo 5º da Resolução Normativa Nº 493 de 05 de junho de 2012 da ANEEL, as unidades consumidoras atendidas por meio de MIGDI ou SIGFI devem ser enquadradas conforme as disponibilidades mensais de energia explicitadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação e disponibilidade de energia conforme Resolução nº. 439/2012 (ANEEL, 2012)

Classes de atendimento	Disponibilidade mensal garantida (kWh)	Consumo diário de referência (Wh/dia)	Autonomia mínima (horas)	Potência mínima disponibilizada (W)
SIGFI 13	13	435	48	250
SIGFI 20	20	670	48	250
SIGFI 30	30	1000	48	500
SIGFI 45	45	1500	48	700
SIGFI 60	60	2000	48	1000
SIGFI 80	80	2650	48	1250

A Figura 1 traz o perfil de carga SIGFI 45, fornecido pela empresa Guascor, em parceria com a PUC-Rio, e inserido no Simulador. E, para realização dos testes experimentais, foi construído no LEV um sistema para simular esta carga, através de um banco de resistores.

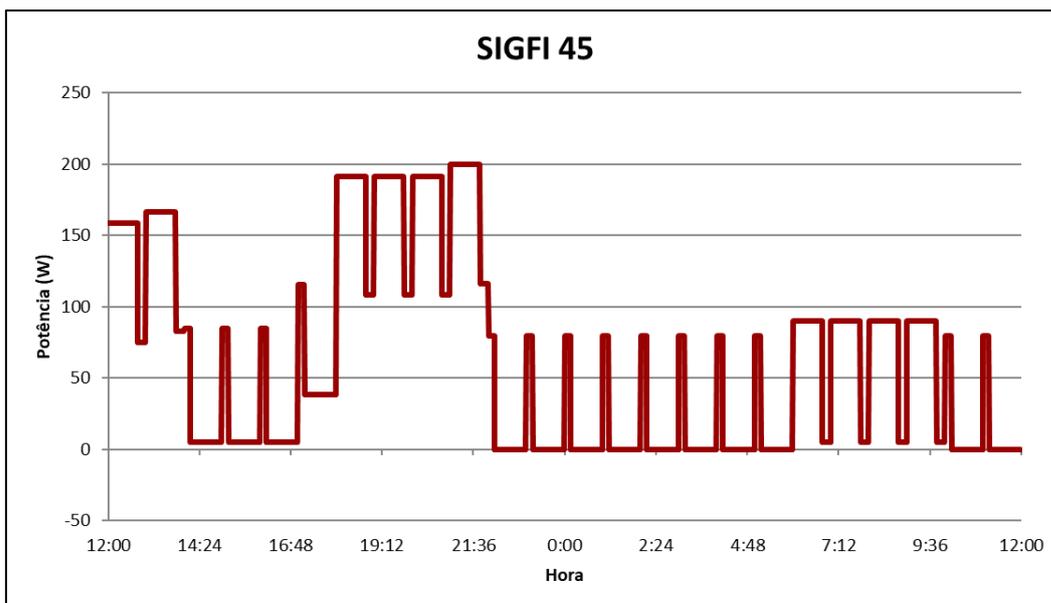


Figura 1 - Perfil de carga SIGFI 45 (Guascor, 2017)

O consumidor, com este perfil de consumo de energia, possui em sua casa: dois quartos e uma cozinha. Os componentes utilizados para determinar o perfil de consumo diário do SIGFI 45 está listado na Tabela 2.

Tabela 2 - Detalhamento da demanda de energia elétrica dos componentes de uma unidade consumidora SIGFI 45 (Guascor, 2017)

Casa	Lâmpadas	
Repartições	Quantidade	Potência instalada (W)
Quarto 1	1	11
Quarto 2	1	11
Cozinha	1	11
Equipamentos	Quantidade	Potência instalada (W)
Geladeira – 120 litros	1	85
Aparelhos de Som	1	5
Televisão de 14"	1	64
Antena parabólica de 17"	1	10
DVD	1	8
Consumo elétrico estimado diário (kWh/dia)		1,52
Consumo elétrico estimado mensal (kWh/mês)		45,45
Consumo elétrico estimado anual (kWh/ano)		545,4
Demanda média (W)		63
Demanda máxima (W)		200

Por se tratar de uma unidade protótipo, o sistema de geração de energia elétrica foi dimensionado para atender a demanda típica de uma residência com cinco habitantes e com um consumo mínimo de 500 kWh/ano.

1.1. Motivação

O constante aumento da demanda por energia elétrica no mundo, vem sendo um dos assuntos mais discutidos pelos representantes das Nações. Da mesma forma, está na pauta das discussões o aquecimento global, a destruição da camada de ozônio, o desmatamento de florestas, a poluição de rios, do mar e do solo, entre outros. Uma forma de contribuir ao mitigar estes efeitos no meio ambiente, é o investimento em fontes renováveis de energia (EPE, 2021).

O *U.S. Energy Information Administration (EIA)*, no *International Energy Outlook 2019*, apresentou a projeção do consumo mundial de energia primária até 2050, conforme mostra a Figura 2. Onde, ele indica que a energia renovável se tornará a principal fonte de consumo de energia primária até 2050. As energias renováveis (incluindo energia hidrelétrica) são a fonte de geração de eletricidade que mais cresce no período de 2018 a 2050, aumentando em média 3,6% ao ano. Em 2025, no caso de Referência, as energias renováveis superam o carvão como fonte primária de geração de eletricidade e, em 2050, as energias renováveis representam quase metade da produção total de eletricidade no mundo. Até 2050, a energia eólica e solar representará mais de 70% da geração total de fontes renováveis.

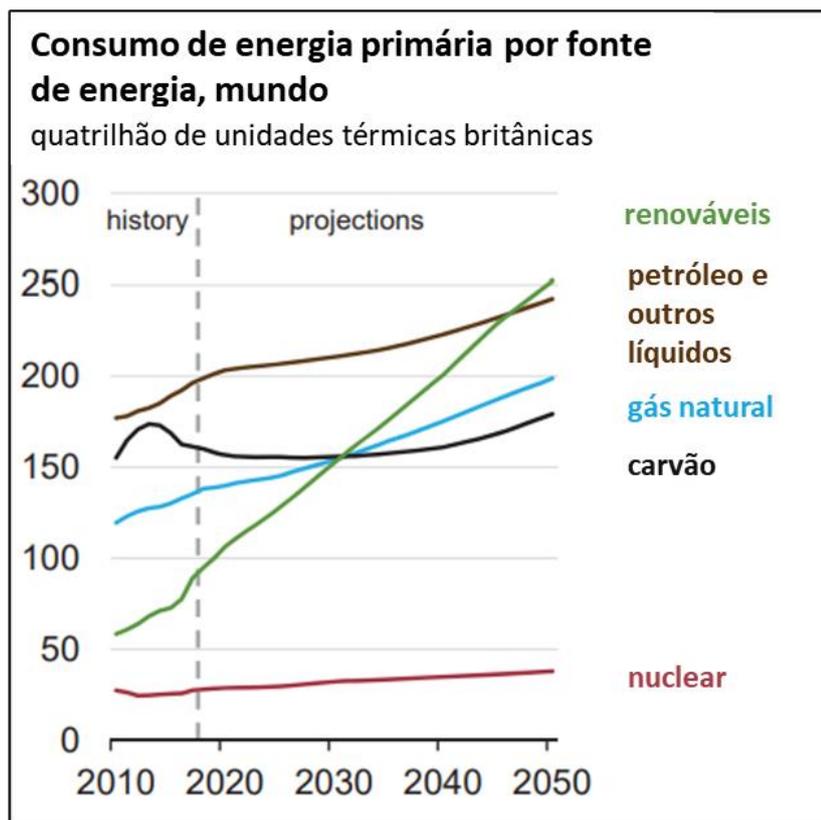


Figura 2 - Consumo mundial de energia por fonte (International Energy Outlook 2019, EIA)

O Brasil possui uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, como pode ser visto na Figura 3, com destaque para a geração hidráulica, que contribui com 65,2% da oferta interna. As fontes renováveis representam 84,8% da oferta interna de eletricidade no Brasil, um monte das somas da produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável. Em contrapartida a geração elétrica a partir de fontes não renováveis representam 15,8% do total nacional, contra 17,7% em 2019, um valor considerável (EPE, 2021).

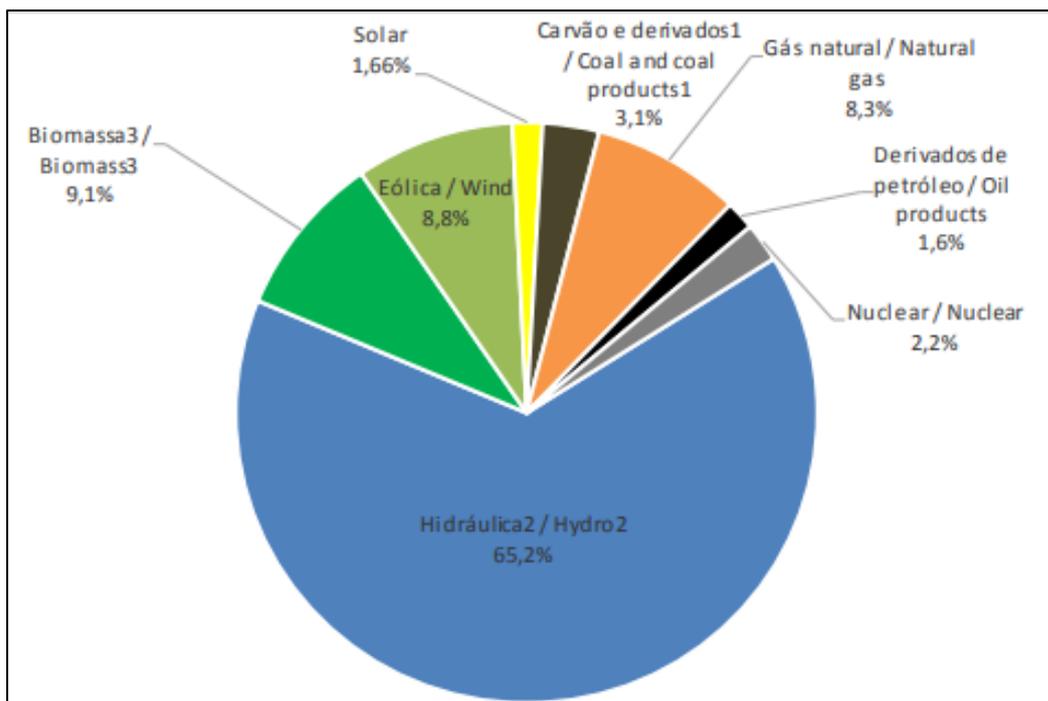


Figura 3 - Matriz elétrica brasileira (EPE, 2021)

Pensando no aumento do uso de fontes limpas, o governo brasileiro implementou algumas políticas de incentivo, como exemplos, o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) e mais recentemente o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (Proinfa).

O Proálcool, foi criado em 14 de novembro de 1975. Foi uma iniciativa que visava o desenvolvimento das técnicas e aperfeiçoamento dos insumos para a produção de álcool etílico. Primeiro foi feita a produção de álcool etílico anidro para ser adicionado à gasolina, nos anos 1975 a 1979. Logo, em 1978, começaram a surgir os primeiros carros movidos apenas com álcool etílico hidratado, após algumas modificações nos motores (Barros, 2007).

O objetivo do Proálcool era aumentar as vendas de veículos a álcool. Sendo assim, o governo facilitou aos compradores, oferecendo maiores prazos de financiamento e taxas mais baixas (Andrade *et al.*, 2009).

Já o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (Proinfa) teve como objetivo aumentar a participação de fontes alternativas renováveis na produção de energia elétrica, o qual privilegia empreendedores que não possuam vínculos societários com concessionárias de geração, transmissão ou distribuição (ANEEL, 2012).

Têm-se grandes expectativas que a energia do futuro seja limpa e renovável, uma vez que os países estão se importando cada vez mais com o meio ambiente, sustentabilidade e principalmente com o Futuro.

1.2. Objetivos do trabalho

O objetivo deste trabalho foi realizar a simulação de um sistema híbrido de geração de energia elétrica para atender comunidades isoladas, utilizando energia renovável. Com base em um sistema já existente, mas com modificações, foi possível analisar os componentes separadamente e em conjunto com o intuito de verificar a viabilidade técnica do sistema.

Após aquisição das informações necessárias foi possível a construção de um simulador do sistema em Excel e VBA, onde foi possível estudar diferentes casos pré-estabelecidos, fazendo-se o aumento do número de unidades consumidoras, aumento do número de componentes, gerando novas configurações do sistema para atender à demanda de energia de uma pequena comunidade isolada. Por fim, foi possível avaliar os custos dos equipamentos do sistema e a diluição do custo de instalação por kWh com o aumento do número de usuários, ou unidades consumidoras, conforme a resolução Nº 493/2012 da ANEEL.

Vale ressaltar que este trabalho é o aprimoramento de duas dissertações de mestrado: “Simulação numérico-experimental de um sistema híbrido solar/etanol/hidrogênio de geração de energia elétrica”, de Anna Camila Sousa e Silva (Silva, 2017) e “Simulação de um sistema híbrido de geração de energia para pequenas comunidades baseado em energia solar, reforma de etanol e armazenamento de hidrogênio”, de Adriano da Costa Rodrigues (Rodrigues, 2018).

Os diferenciais deste trabalho foram:

- Retirada do compressor e do sistema de armazenamento, a fim de se reduzir o consumo de energia. Uma vez que a Anna Camila provou que o compressor era um consumidor voraz, inviabilizando o seu sistema; (Silva, 2017)
- Realização de testes com etanol PA (padrão) e com etanol hidratado (grau 96);

- Uso de um sistema integrado (reformador + célula combustível);
- As CaCs convencionais requerem hidrogênio de elevada pureza, o que significa etapas adicionais no processo de reforma, com o emprego de materiais como, paládio, que acrescenta notavelmente os custos. Neste projeto utilizou-se de uma inovação, uma CaC que aceita uma mistura rica em hidrogênio e que tolera a presença de CO₂ e CO;
- Realização de testes na célula combustível com hidrogênio puro e com gás reformado;
- Análise de viabilidade técnica, ou seja, não foi feita análises de custos e de emissões.

1.3. Organização do trabalho

Este trabalho encontra-se dividido em seis capítulos.

O primeiro capítulo: introdução, motivação, objetivos e organização do trabalho.

O segundo capítulo é a revisão bibliográfica, abordando sistemas de armazenamento de energia, energia solar fotovoltaica, inversor, célula a combustível, etanol, energia e sistemas híbridos em comunidades isoladas

O terceiro capítulo traz a metodologia, com o objeto de estudo, abordagem experimental e simulação numérica.

No quarto capítulo traz-se os resultados e discussões.

O capítulo cinco traz as conclusões do trabalho.

E o capítulo seis as referências bibliográficas.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Sistemas de armazenamento de energia

Existem diversas tecnologias de armazenamento de energia, Figura 4, as quais se diferem em termos de característica operacional, desempenho, ciclo de operação e durabilidade (Camargo, 2016).

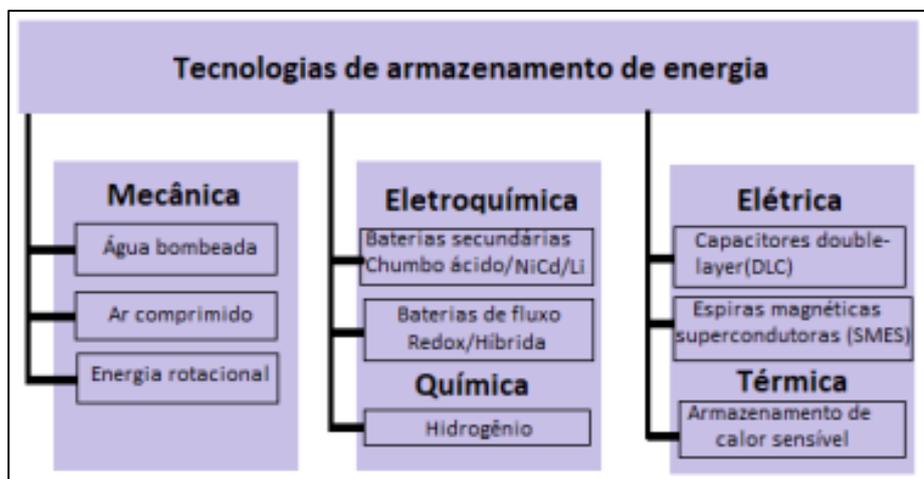


Figura 4 - Tecnologias de armazenamento de energia (Camargo, 2016)

2.1.1. Ar comprimido (CAES)

O sistema de armazenamento a ar comprimido faz utilização de algum tipo de estrutura – geralmente subterrâneas, essas sendo preferencialmente cavernas de sal – que possibilita o armazenamento de ar a uma determinada pressão e utilizá-lo para converter energia mecânica em elétrica. A Figura 5 ilustra um típico CAES (Díaz-González *et al.*, 2012).

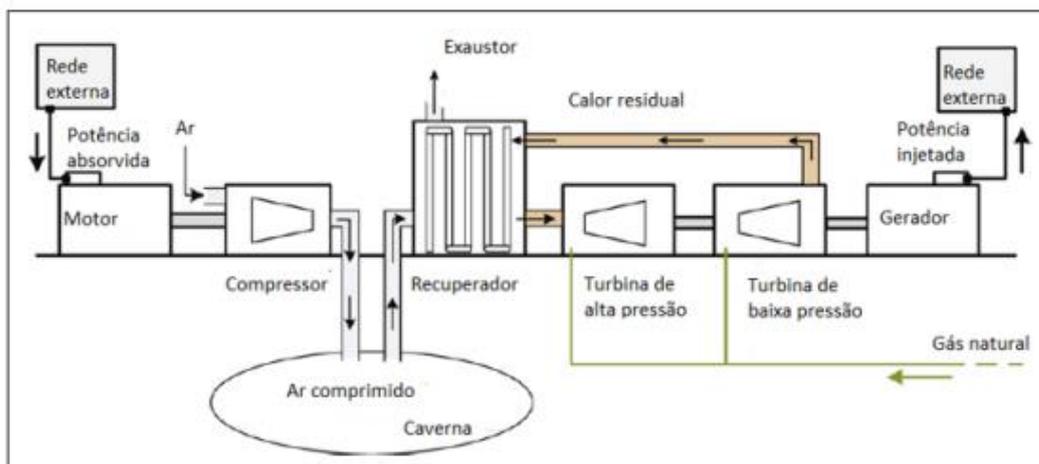


Figura 5 - Sistema CAES (Díaz-González *et al.*, 2012)

O sistema CAES funciona em três etapas diferentes: compressão, armazenamento e expansão. As etapas de compressão e armazenamento condiz ao ciclo de carga, onde o ar é extraído do meio ambiente e comprimido sob determinadas pressões através do compressor, para, em seguida, ser armazenado no reservatório. A fase da expansão é referente ao ciclo de descarga, onde o ar comprimido é recuperado e logo, em seguida, misturado a gás natural e finalmente expandido dentro de turbinas de alta pressão, onde a energia da explosão é transformada em energia elétrica através de um gerador (Díaz-González *et al.*, 2012; Sabihuddin *et al.*, 2014).

2.1.2. Capacitores eletroquímicos

Armazenam a energia em forma de campo elétrico, onde, portanto, são indispensáveis em equipamentos elétricos. Onde também são utilizadas em instalações elétricas para partida de motores e regulação do fator de potência. Nesta classe pode-se encontrar também os supercapacitores e ultracapacitores. Estes capacitores usam um eletrólito carregando íons entre dois eletrodos de forma semelhante às baterias. Entretanto, devido a sua baixa capacidade de energia, seu uso se restringe a intervalos de curto período (Parfomak, 2012).

2.1.3. Volante de Inércia

A tecnologia de volante de inércia (FES) armazena energia elétrica convertendo-a em energia cinética e armazenando-a no momento angular de uma massa girante (Chen *et al.*, 2009). Na Figura 6, é ilustrado a topologia básica de um FES (Díaz-González *et al.*, 2012).

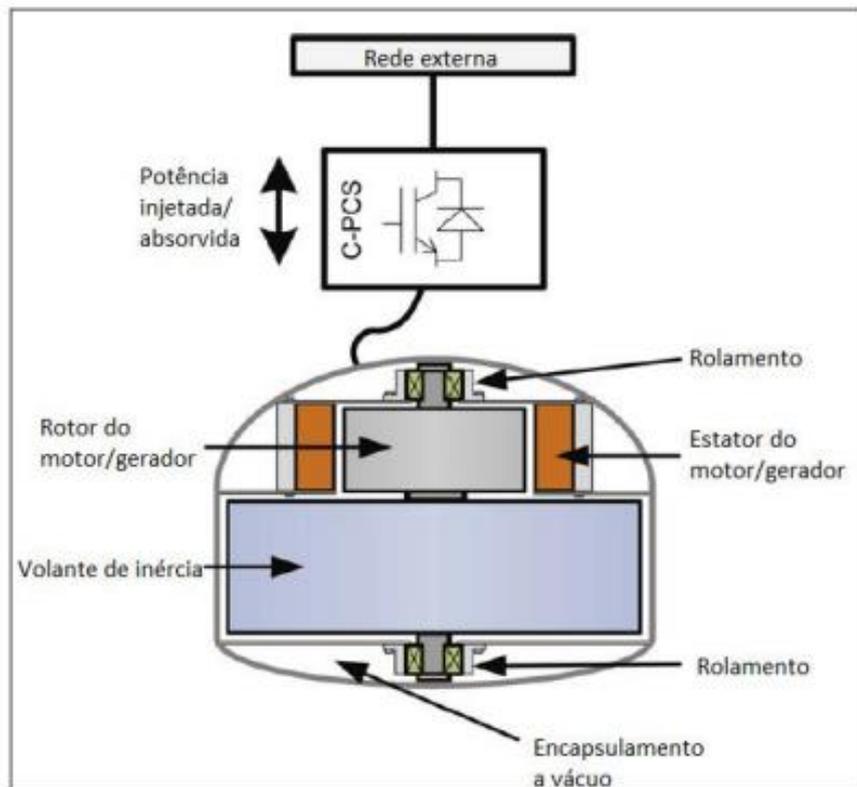


Figura 6 - Sistema FES (DÍAZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2012)

A Figura 6 ilustra os cinco elementos principais de um FES: volante de inércia, conjunto de rolamento, máquina elétrica (capaz de funcionar tanto como motor e gerador), conversor de potência e câmara a vácuo. Tal sistema de armazenamento mostra seu potencial em aplicações como regulação de tensão e frequência, suporte a tensão, qualidade de energia, controle de demanda e confiabilidade (Rastler, 2010).

2.1.4. Armazenamento de energia em forma química

Esse formato de armazenamento é o que possui maior variedade de tecnologias, isso se dá devido à variedade de materiais existente que são empregados na estruturação do acumulador que possui três elementos básicos: cátodos, ânodo e eletrólito (o eletrólito pode ser sólido, pastoso ou líquido) cada um empregando um material diferente na sua constituição (Chen *et al.*, 2009; Luo *et al.*, 2015).

A forma mais conhecida de armazenamento de energia elétrica é através de baterias. Quando uma bateria é conectada a uma fonte de alimentação, ela converte essa energia elétrica em energia química, armazenando para um futuro fornecimento de energia elétrica, visto que, as baterias não produzem energia, elas apenas a armazenam.

De acordo com a Resolução Conama nº 257, de 30 de junho de 1999, para os fins do disposto nesta Resolução, considera-se (CONAMA, 1999):

- I - Bateria: conjunto de pilhas ou acumuladores recarregáveis interligados convenientemente. (NBR-7039/87);
- II - Pilha: gerador eletroquímico de energia elétrica, mediante conversão geralmente irreversível de energia química. (NBR-7039/87);
- III - acumulador chumbo-ácido: acumulador no qual o material ativo das placas positivas é constituído por compostos de chumbo, e os das placas negativas essencialmente por chumbo, sendo o eletrólito uma solução de ácido sulfúrico. (NBR-7039/87);

As baterias possuem diversas aplicações, como: fonte portátil de energia elétrica, alimentação de sistemas automotivos, supridora de sistemas com curtos períodos de demanda, armazenadora de energia elétrica gerada por fontes renováveis e intermitentes (exemplo: solar e eólica).

Segundo Sausen (2008) e Lahiri *et al.* (2002), a capacidade de uma bateria pode ser expressa de três formas: primeira, como capacidade teórica: consiste na quantidade de energia armazenada, sendo o limite máximo de energia que pode ser retirada da bateria na prática; segunda, como capacidade padrão: é a energia que pode ser retirada sob condições especificadas pelo fabricante; terceira, capacidade atual, é aquela que pode exceder a capacidade padrão, mas não pode exceder a capacidade teórica de uma bateria.

Esta capacidade é medida em ampère-hora (Ah), o que indica o número de horas que a bateria pode fornecer uma determinada corrente elétrica antes de sua descarga total.

De acordo com Bolacell (2010), as baterias mais utilizadas em sistemas isolados são as de chumbo-ácido, devido ao seu baixo custo e características aceitáveis para tais aplicações. Apesar disso, possuem a desvantagem de que estas desgastam rapidamente, com uma vida útil em torno de três anos. Se analisar a vida útil de um sistema fotovoltaico, de em torno de 25 anos, o curto período de vida das baterias são as responsáveis por grande parte dos custos de manutenção do sistema.

Apesar de existirem tecnologias em desenvolvimento e algumas se mostram muito promissoras, ainda possuem um alto valor. São muito caras para a quantidade de energia acumulada requerida em sistemas de energia renováveis. Como exemplo, têm-se as baterias de níquel, de lítio e de vanádio (Rydh, 1999).

As baterias de Chumbo ácido é a mais madura em termos de tecnologia, pois é composta por células empilhadas, imersas em uma solução diluída de ácido sulfúrico (H_2SO_4) com o cátodo composto por dióxido de chumbo (PbO_2) e ânodo feito basicamente de chumbo (Pb). Como característica técnica, a bateria de chumbo ácido possui alta eficiência de energia (em torno de 63-90%) e baixa taxa de auto descarrega (0,1-0,3 %/dia), entretanto apresenta baixo ciclo (250-1500 ciclos) e baixa densidade de energia (50-80 Wh/L), além de apresentar performance ruim em ambientes de baixa temperaturas, ser tóxicas, possuir carregamento lento e não ter uma boa taxa de profundidade de descarregamento (Chen *et al.*, 2009; Hu *et al.*, 2017; Sabihuddin *et al.*, 2014).

As baterias de Li-íon são utilizadas mais especificamente em eletrônicos portáteis, mas, com o avanço da tecnologia e a eventual redução de preço na sua produção, aplicações em diversas escalas de potência estão se tornando possíveis. O ânodo desse tipo de bateria é feito de carbono grafite, enquanto o eletrólito é composto por sais de lítio dissolvidos em carbonatos orgânicos ao mesmo tempo em que o cátodo é um metal folheado com lítio, que pode ser $LiCoO_2$, $LiMO_2$ e $LiNiO_2$. Como característica técnica, tal bateria apresenta ótima densidade de energia (200-500 Wh/L), alta eficiência (70- 100%), um bom ciclo (2500+ ciclos) e a capacidade de carregar e descarregar de forma rápida (Chen *et al.*, 2009; Hu *et al.*, 2017; Sabihuddin *et al.*, 2014).

A Tabela 3 traz um quadro comparativo entre as principais características das baterias de chumbo-ácido, níquel-cádmio (NiCd) e íons de lítio (Li-íon).

Tabela 3 - Quadro comparativo entre baterias de Chumbo-ácido x NiCd x Li-íon (Furlan, 2008)

Dado	Chumbo-ácido	NiCd	Li-íon
Densidade energética	Baixa	Baixa	Alta
Características de estocagem	Precisam ser recarregadas	Boas	Boas
Vida útil	Baixa	Longa	Média/Longa
Velocidade de carga	Lenta	Lenta ou rápida	Lenta
Restrições ambientais	Sim	Sim	Não
Custo	Baixo	Médio	Alto
Tolerância de sobrecarga	Alta	Média	Baixa

A partir da Tabela 3, pode-se concluir que, as baterias de chumbo-ácido, quando comparadas com outros tipos, possuem uma baixa densidade energética, o que caracteriza a grandes espaços de armazenamento. Olhando em relação a estocagem, precisam ser recarregadas periodicamente para evitar a sulfatação, o que diminui sua vida útil (Furlan, 2008).

A sulfatação ocorre em baterias descarregadas durante períodos prolongados ou submetidas a recargas insuficientes, apresentando perda irreversível de matéria ativa produzida pela recristalização dos cristais de $PbSO_4$ formados durante a descarga, que se convertem em cristais maiores, que dificilmente são revertidos na carga posterior, resultando aumento de resistência interna, maior geração de calor e diminuição de capacidade (Copetti & Macagnan, 2007).

Olhando na Tabela 3 o requisito custo, as baterias de chumbo-ácido possuem valor baixo. Fez-se a escolha por este tipo de bateria, além de ser de fácil requisição. Onde no Brasil, existem diversos fabricantes, como Moura, Unipower, Intelbras, Freedom, entre outros.

2.2. Energia Solar Fotovoltaica

O Sol é uma fonte inesgotável de energia. O aproveitamento energético solar é, com certeza, uma das alternativas de geração de energia limpa mais viáveis para a humanidade (Pinho & Galdino, 2014).

A Figura 7 mostra o mapa de radiação solar no território brasileiro. É através desses mapas que se é possível ter uma primeira “radiografia” do recurso solar para um futuro projeto fotovoltaico. As cores do mapa definem a radiação solar média diária mensal. Por exemplo, uma tonalidade de amarelo, Rio de Janeiro, a radiação média diária mensal será de 4,838 kWh/m², ou em um ano (365 dias) cerca de 1766 kWh/m² (Copetti & Macagnan, 2007).

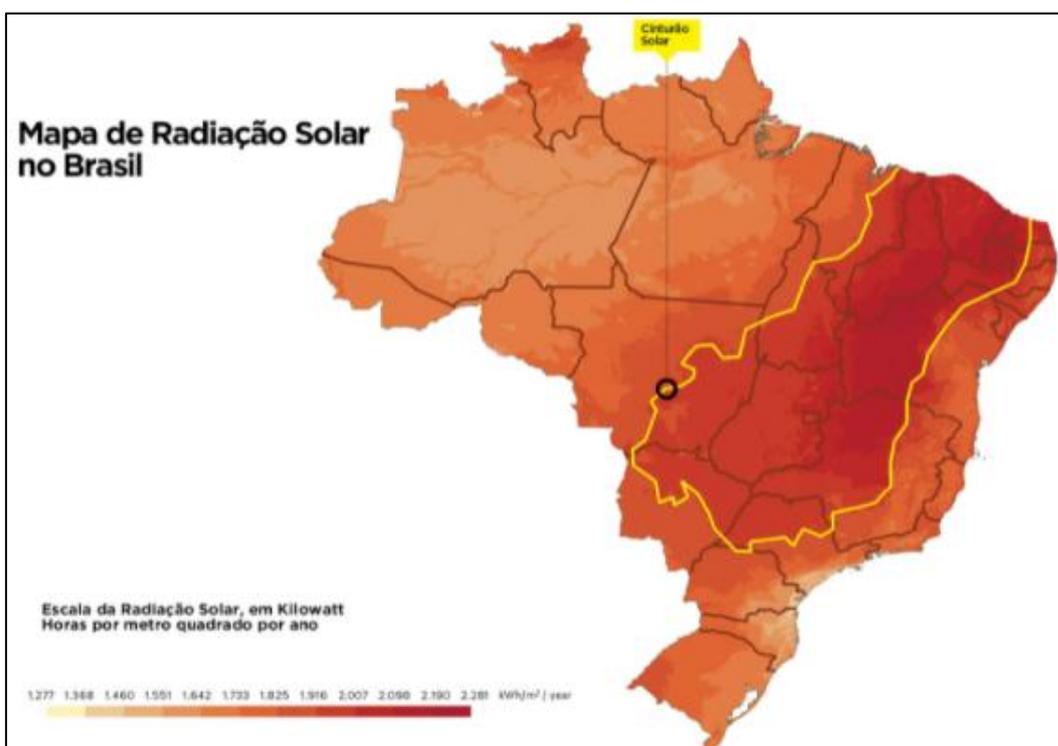


Figura 7 - Mapa de radiação solar no Brasil (Copetti & Macagnan, 2007)

A energia solar fotovoltaica é a energia produzida através da conversão direta da radiação solar em eletricidade. Isso ocorre através de um dispositivo chamado de célula fotovoltaica (Imhoff, 2007).

As células solares são dispositivos que transformam, de forma direta, a energia luminosa em energia elétrica, onde estes são compostos por materiais semicondutores. O princípio de funcionamento é chamado de efeito fotovoltaico. Este efeito foi descoberto em 1839 por Henry Becquerel, o qual demonstrou a

possibilidade de conversão da radiação luminosa em energia elétrica a partir da incidência de luz em um eletrodo mergulhado numa solução de eletrólito. Só em 1945 foi desenvolvido a primeira fotocélula de silício com as características encontradas atualmente, cuja eficiência era de 6%. E em 1954 foi desenvolvido o processo de purificação de monocristais de silício, conhecido como processo *Czochralski* (Lasnier & Ang, 1990).

O material, em geral, semicondutor utilizado nas células solares é o silício, dopados com boro e fósforo. Basicamente uma célula solar é a junção p-n, onde a face dopada do silício, tipo n, está separada da face do tipo p. As duas partes colocadas em contato é esperado que os elétrons migrem de regiões de baixa concentração eletrônica para as regiões de alta concentração. Logo, ocorre um acúmulo de carga positiva no lado n e um acúmulo de carga negativa no lado p. O desequilíbrio formado será responsável pelo surgimento de um campo elétrico que irá se opor à tendência natural da difusão de elétrons e buracos, e desse modo uma situação de equilíbrio será atingida (Lasnier & Ang, 1990).

A Figura 8 ilustra a estrutura molecular de um material semicondutores dopados com impurezas “p”, “n”, provocando o aparecimento de elétrons e lacunas (Zilles *et al.*, 2012).

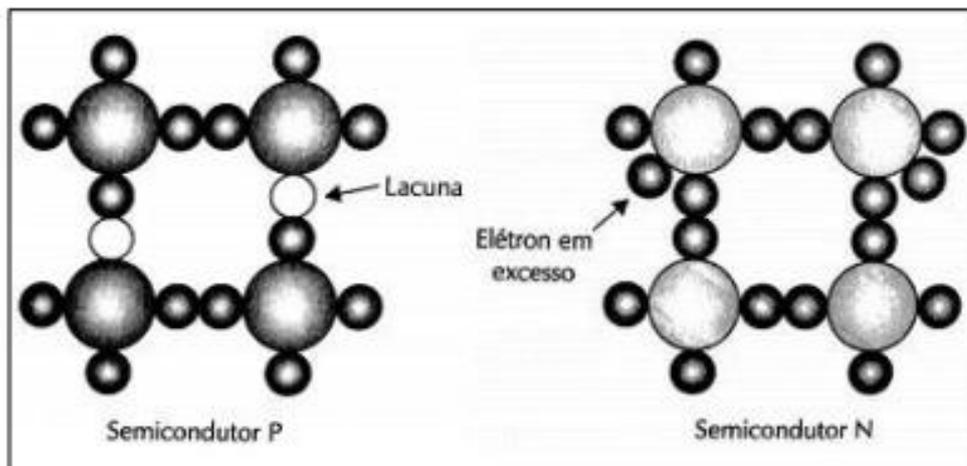


Figura 8 - Estruturas moleculares de semicondutores “P” e “N” (Villalva & Gazoli, 2012)

A energia necessária para fazer com que os elétrons mudem de uma banda para outra e denominada de energia de gap (EG), que é dada em elétron-volt (eV). Quando um semicondutor é exposto a incidência de luz, seu estado de equilíbrio é

desfeito, fazendo com que o elétron da banda de valência absorva a energia do fóton, se essa energia conhecida como (E_G) , for suficiente para libertá-lo de sua ligação química ele passa para a banda de condução, criando um par de elétron-lacuna, sendo o campo elétrico responsável por atrair o elétron para a região “n” ao mesmo tempo que a lacuna é atraída para a região “p” (Zilles *et al.*, 2012).

Quanto maior a incidência de fótons sobre o semiconductor mais pares de elétrons-lacunas são formados e separados pelo campo, estabelecendo um desequilíbrio nas correntes da junção e estabelecimento de uma diferença de potencial, resultante do acúmulo de portadores de cargas em cada lado da junção. Se em cada um dos lados da junção for conectado terminais metálicos, sendo interligados por um condutor elétrico, resultará em uma corrente elétrica, a qual estará presente enquanto houver incidência solar sobre o semiconductor. A Figura 9 ilustra o processo de conversão fotovoltaica (Zilles *et al.*, 2012).

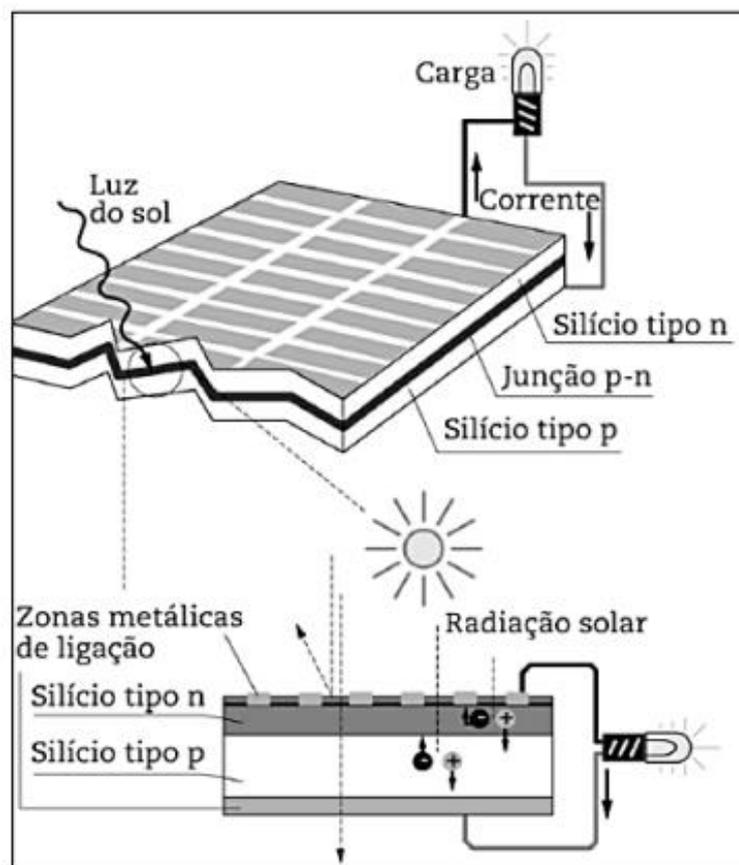


Figura 9 - Processo de conversão fotovoltaica (Zilles *et al.*, 2012)

2.3. Inversor

O inversor é um componente fundamental do sistema. Sua função é transformar corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). O inversor pode ser definido como:

Dispositivo eletrônico que fornece energia elétrica em corrente alternada (C.A) a partir de uma fonte de energia elétrica de corrente contínua (C.C). A energia C.C pode ser proveniente, por exemplo, de baterias, células combustíveis ou módulo fotovoltaico. A tensão C.A de saída deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequado às cargas a serem alimentadas (Pinho; Galdino, 2014, p. 216).

Esses equipamentos podem ser utilizados em sistemas ligados à rede (*on-grid*) ou em sistemas desligados da rede com baterias recarregáveis (*off-grid*). Como foco desse trabalho, ou seja, em sistema isolados, vamos frisar sobre os inversores para sistemas *off-grid*, chamados de inversor autônomo. Onde estes devem ser capazes de alimentar muitos equipamentos elétricos, e sua eficiência deve ser em torno de 90%. A qualidade do inversor autônomo depende de diversos fatores, como exemplo: proteção contra sobre intensidades; baixa flutuação da tensão e frequência de saída; alta eficiência; baixo consumo em *stand-by*; capacidade de suportar curtos-circuitos; e, alta tolerância às correntes de arranque (Luque & Hegedus, 2003).

2.4. Células a combustível (CaC)

As células a combustível (CaC) são sistemas eletroquímicos que convertem a energia química de um combustível diretamente em energia elétrica e calor. Resultando de uma geração de energia com maior eficiência e menor impacto ambiental, se comparadas com os sistemas convencionais de combustão interna. Uma vez que as etapas intermediárias de produção de calor e de trabalho mecânico destes últimos são evitadas (DOE, 2000).

A Figura 10 apresenta um esquema básico de como funciona uma célula a combustível, mostrando os sentidos de fluxo dos gases reagente e produto (combustível e oxidante), assim como dos íons de condução.

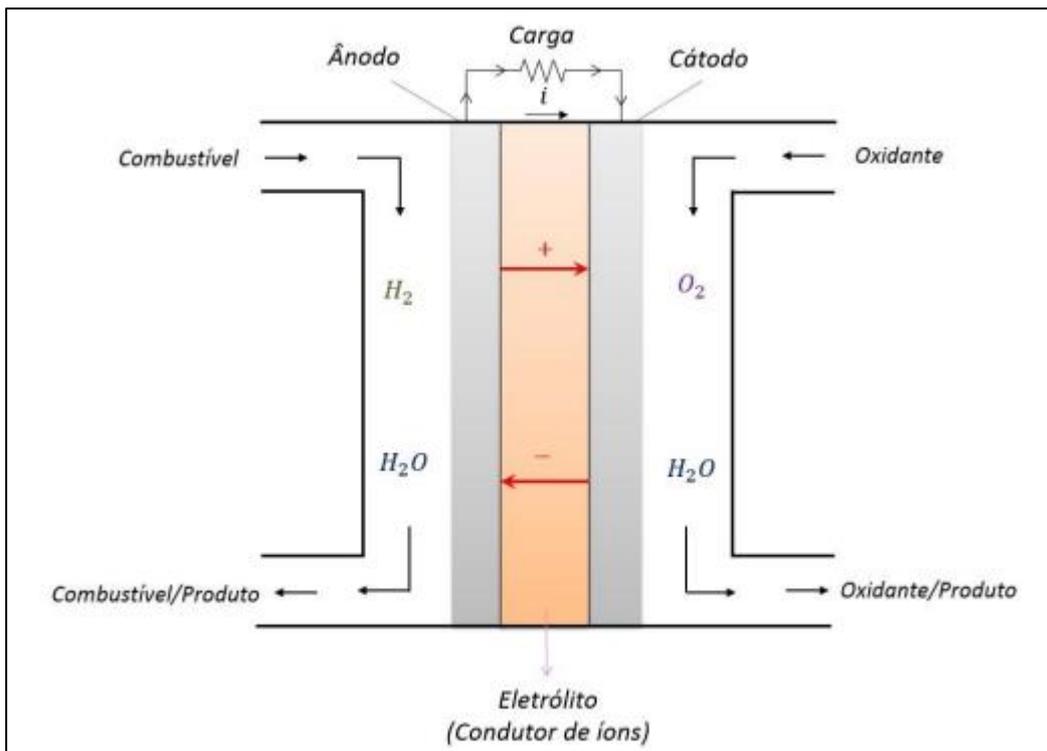
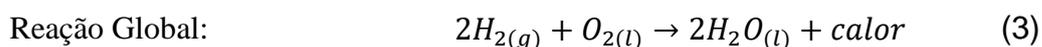
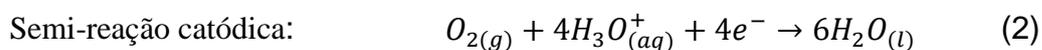
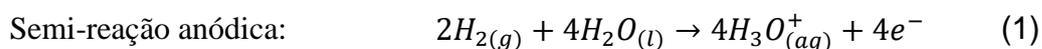


Figura 10 - Esquema básico de funcionamento de uma CaC (Kirubakaran *et al.*, 2009)

Elas são alimentadas, continuamente, por combustíveis gasosos para o ânodo (eletrodo negativo) e o oxidante para o cátodo (eletrodo positivo). O hidrogênio é utilizado como combustível e o oxigênio como oxidante. As reações eletroquímicas acontecem nos eletrodos para produzir uma corrente elétrica, devido aos elétrons serem liberados nas semi-reações anódica, eq. (1) e catódica, eq. (2), podendo assim gerar trabalho elétrico. Possui como subproduto: a água e a liberação de calor, como visto na eq. (3), a Reação global.



Segundo Appleby (1993) de uma forma geral, as células a combustíveis possuem como vantagens:

- Uma conversão direta da energia (energia química diretamente em energia elétrica);
- Não possuem partes móveis, reduzindo a manutenção;

- Flexibilidade para obtenção do hidrogênio, e
- Instalações em módulos.

A Tabela 4 apresenta a classificação das células a combustível em função: eletrolítico, temperatura de operação, tolerância a impurezas, combustível, eficiência e densidade de potência volumétrica.

Tabela 4 – Tipos de células de combustível testadas e em execução que fornecem serviços de energia on-grid, off-grid e potência automotiva (Cerri *et al.*, 2012)

	PEM	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Operating Temperature	50–100 °C	50–200 °C	150–220 °C	600–700 °C	650–1000 °C
Electrolyte	Organic polymer membrane	Alkaline aqueous solution	Liquid phosphoric acid	Molten carbonate in ceramic matrix	Yttria stabilized Zirconia
Charge carrier	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Cathode catalyst	Platinum	Platinum	Platinum	Nickel	Perovskites
Primary Fuel	H ₂	H ₂	H ₂	H ₂ , CO, CH ₄	H ₂ , CO, CH ₄
Start-up time	minute	minute	hour	hour	hour
Durability hour	5000–10,000	5000–8,000	15,000–20,000	20,000–30,000	45,000
Power density kW/m ³	≈5	≈1	≈1	≈2	≈1
Electric efficiency	40%–60%	45%–65%	35%–50%	45%–60%	40%–60%
Combined heat & power Eff.	55%–90%	55%–80%	55%–90%	60%–90%	60%–90%
Primary applications	Backup power & Distributed generation & Automotive	Space & Automotive	Distributed generation, Automotive	Distributed generation	Distributed generation & Automotive

Segundo Cerri *et al.* (2012), as células a combustível podem ser classificadas de acordo com o tipo de eletrólito (membrana) utilizado e da temperatura de operação. Cada elemento de uma célula a combustível apresenta diferentes aplicações, e a seleção da mesma dependerá do fim a que se destina. Os principais tipos de células utilizadas e em desenvolvimento são:

- AFC – Célula a combustível alcalina (*Alkaline Fuel Cell*);
- MCFC – Célula a combustível de carbonato fundido (*Molten Carbonate Fuel Cell*);
- PAFC – Célula a combustível de ácido fosfórico (*Phosphoric Acid Fuel Cell*);
- PEM – Célula a combustível de membrana de troca de prótons (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*). Também chamada de SPFC – Célula a combustível de polímero sólido (*Solid Polymer Fuel Cell*);
- SOFC – Célula a combustível de óxido sólido (*Solid Oxid Fuel Cell*); e

Como objeto de estudo deste trabalho, as Células a Combustível de Membrana Polimérica (PEMFC), possuem em seu eletrólito uma membrana sólida entre dois eletrodos porosos de carbono. Como combustíveis utilizam o hidrogênio

ou oxigênio e sua principal característica é a sua baixa temperatura de operação. Como vantagem, seu funcionamento é simples, exibindo uma alta densidade de potência e uma iniciação consideravelmente rápido (Cook, 2001).

Como desvantagem, não admite o uso de monóxido de carbono (CO), precisando de um catalisador ativo em baixas temperaturas, aumentando seu custo. Este tipo de célula também possui aplicação em missões espaciais, sendo a PEMFC a primeira membrana desenvolvida pela *General Electric* (GE) para o projeto Gemini da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) (Perles, 2008).

As relações químicas e termodinâmicas que governam as células e como as condições de operação afetam o seu desempenho. Primeiro, para entender a operação de uma célula é necessário definir desempenho ideal, e posteriormente descrever a operação real.

O máximo trabalho elétrico obtido (\dot{W}_{el}), eq. (4), de uma célula, operando com uma temperatura e pressão constante é obtido através da variação da energia livre de Gibbs (ΔG) da reação eletroquímica.

$$\dot{W}_{el} = \Delta G = -nF\dot{E} \quad (4)$$

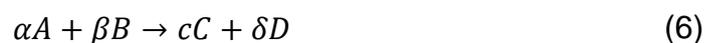
Onde n é o número de elétrons participando da reação e F é a constante de Faraday ($F = 96485,33289(59) \text{ C mol}^{-1}$) e \dot{E} é a potência ideal da célula.

A variação da energia livre de Gibbs também pode ser representada pela eq. (5):

$$\Delta G = \Delta h - T\Delta s \quad (5)$$

Onde Δh é a variação de entalpia e Δs é a variação de entropia. A quantidade de calor que é produzido pela célula operando reversivelmente é $T\Delta s$.

A eq. (6) traz a reação geral da célula:



O estado padrão da variação da energia livre de Gibbs é dado pela eq. (7):

$$\Delta G^\circ = cG_c^\circ + \delta G_d^\circ - \alpha G_a^\circ - \beta G_b^\circ \quad (7)$$

Onde G_i é a quantidade molar parcial da energia livre de Gibbs para o componente i à temperatura T .

Fazendo um balanço de massa e energia em torno de uma célula combustível é possível descrever o seu desempenho elétrico. O balanço energético em torno da célula é baseado na absorção de energia/processo de liberação (eletricidade produzida, reações, perda de calor) que ocorre na célula.

Em geral, o balanço energético da célula mostra que a variação da entalpia dos reagentes que entram na célula será igual a variação de entalpia dos produtos que saem da célula mais a soma dos termos livres. Os termos livres são: calor gerado pelos processos físicos e químicos da célula, a corrente contínua (CC) que sai da célula e a perda de calor da célula para o meio (Lama, 2006).

A eficiência térmica, eq. (8), de um aparelho de conversão de combustível é dada pela razão entre a quantidade de energia produzida relativa (Energia) e a variação de entalpia (Δh), entre os produtos e os reagentes.

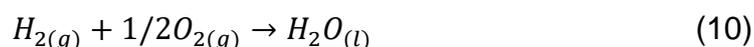
$$\eta = \frac{\text{Energia}}{\Delta h} \quad (8)$$

As células a combustível (CaC) convertem diretamente energia química em energia elétrica. No caso ideal de um conversor eletroquímico, como as CaC, a variação da energia livre de Gibbs (ΔG) da reação é disponível na energia elétrica na temperatura de conversão (Lama, 2006).

A eficiência ideal da célula, operando reversivelmente, é dada pela eq. (9).

$$\eta_{ideal} = \frac{\Delta G}{\Delta h} \quad (9)$$

A eficiência da célula é baseada na variação da energia livre para a reação descrita na eq. (10) (Orlando et al, 2003).



Dado pela eq. (11):

$$\Delta G_r^\circ = G_{H_2O(l)}^\circ - G_{H_2(g)}^\circ - 1/2G_{O_2(g)}^\circ \quad (11)$$

Onde a água sai na forma líquida. Nas condições padrões de 25 °C (298 K) e 1 atm, a energia térmica liberada (Δh) na reação hidrogênio/oxigênio é 285,8 kJ/mol e a energia livre disponível para o trabalho é 237,1 kJ/mol (Lama, 2006).

Assim, a eficiência térmica de uma célula ideal operando reversivelmente como hidrogênio e oxigênio puro nas condições padrões é dada pela eq. (12).

$$\eta_{ideal} = \frac{237,1}{285,8} = 0,83 \quad (12)$$

De acordo com a segunda lei da termodinâmica, o trabalho reversível entre os dois estados na eq. (10), desprezando a variação de energia cinética e potencial, pode ser escrita na eq. (13).

$$\dot{W}_{rev} = \Delta G = \Delta h - T\Delta s \quad (13)$$

A eficiência teórica da célula PEM (η_{TH}), eq. (14), pode ser definida como a razão entre o trabalho reversível e a variação de entalpia (Orlando *et al.*, 2003).

$$\eta_{TH} = \frac{\Delta G}{\Delta h} \quad (14)$$

Como visto anteriormente, na eq. (12), foi calculada uma eficiência térmica nas condições de referência de 83% (Orlando *et al.*, 2003).

A eficiência térmica da pilha (η_T) está relacionada com a entrada de hidrogênio, ou seja, pode ser calculada pela razão entre a energia elétrica que sai e a energia do hidrogênio que entra, conforme a eq. (15) (Orlando *et al.*, 2003).

$$\eta_T = \frac{(2FV_{sai})}{PCS_{H_2}} \quad (15)$$

Onde F é a constante de Faraday e PCS_{H_2} é o Poder Calorífico Superior do Hidrogênio e V_{sai} é a tensão de saída da célula (tensão média). De acordo com Lama

(2006), $F = 96,487$ coulomb/g-mol de elétron e $PCS_{H_2} = 28530$ kJ/kmol de H_2 . Substituindo os valores, tem-se a eq. (16).

$$\eta_T = \frac{V_{sai}}{1,481} \quad (16)$$

A energia química do hidrogênio (E_{H_2}) é dada pela eq. (17) (Orlando *et al.*, 2003).

$$E_{H_2} = \dot{m}_{H_2,u} \cdot PCS_{H_2} \quad (17)$$

Onde $\dot{m}_{H_2,u}$ é o hidrogênio que entra na pilha e PCS_{H_2} é o Poder Calorífico Superior do Hidrogênio.

Para a produção do Hidrogênio através do Etanol, para alimentar a célula, utiliza-se um Reformador. A eficiência do Reformador (η_R), eq. (18), é definida pela razão entre a energia química do hidrogênio produzido e a energia química do etanol, consumido no reformador.

$$\eta_R = \frac{\dot{m}_{H_2,R} \cdot PCI_{H_2}}{\dot{m}_{etanol} \cdot PCI_{etanol}} \quad (18)$$

Onde $\dot{m}_{H_2,R}$ é a quantidade de hidrogênio gerada no processo de reforma, PCI_{H_2} é o Poder Calorífico Inferior do Hidrogênio, PCI_{etanol} é o Poder Calorífico Inferior do Etanol e \dot{m}_{etanol} é a quantidade de etanol que entra no reformador.

A eficiência global da célula (η_G), utilizando o PCI do gás, pode ser calculada pela eq. (19):

$$\eta_{G,cac} = \frac{E_{sai}}{\dot{m}_{comb.} \cdot PCI_{comb.}} \quad (19)$$

Onde, E_{sai} é a energia elétrica gerada, $\dot{m}_{comb.}$ é a quantidade de combustível que entra na célula e $PCI_{comb.}$ é o Poder Calorífico Inferior do combustível.

A eficiência térmica global da célula (η_G), também pode ser calculada pela razão entre a energia elétrica gerada (E_{sai}) e a energia de combustível fornecida ($E_{comb.}$), conforme a eq. (20).

$$\eta_G = \frac{E_{sai}}{E_{comb.}} \quad (20)$$

2.5. O Etanol como fonte de Hidrogênio

Dentre as diversas alternativas de produção de hidrogênio para as células a combustível, o uso do etanol da cana-de-açúcar constitui em uma opção muito interessante para o Brasil. Levando-se em conta as quantidades deste produto anualmente disponível e o potencial de ampliação desta produção. Assim, a utilização do etanol para a produção de hidrogênio, tem um papel importante, não só para o meio ambiente, como também para economia do país.

Logo, como visto, o hidrogênio é o combustível utilizado nas células a combustível. Sendo o principal fator para aumentar os estudos sobre as mesmas. Para o hidrogênio se tornar o combustível do futuro é necessário tomar algumas medidas como: a redução dos custos de produção; desenvolvimento de sistemas de transporte seguros; armazenamento e o abastecimento, minimizando gastos energéticos (Martins *et al.*, 2009).

Embora encontrado de forma abundante, a maior parte do hidrogênio presente na Terra encontra-se na forma de compostos. Dessa forma, diversas tecnologias de obtenção do hidrogênio foram ou estão sendo desenvolvidas. A Figura 11 traz as principais tecnologias para produção de hidrogênio (Holladay *et al.*, 2009; Tanksale, 2010).

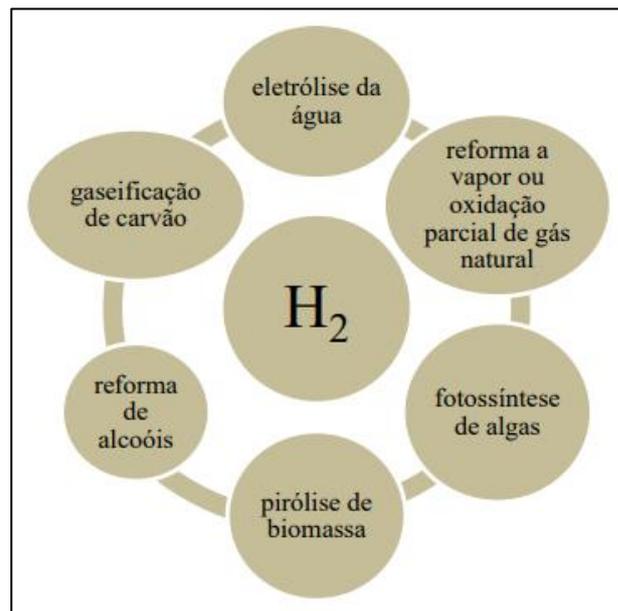


Figura 11 - Algumas das diversas tecnologias de obtenção de hidrogênio (Holladay *et al.*, 2009; Tanksale, 2010)

As metodologias mais usuais para a produção de hidrogênio até o momento são a eletrólise da água, gaseificação, reações de oxidação parcial de óleos pesados e reações de reforma a vapor o gás natural e do carvão (Sun *et al.*, 2004).

A produção de combustíveis a partir do hidrogênio possui uma certa vantagem, uma vez que este é o elemento mais abundante no universo, carregador renovável (em alguns casos) e inesgotável. É um combustível limpo, não poluente, pois libera apenas água em sua combustão, simplicidade na conversão para energia elétrica, além de ser inofensivo aos seres humanos e ao meio ambiente (Das & Veziroglu, 2001; Tamagnini *et al.*, 2003; Jorquera *et al.*, 2007).

De acordo com Dantas (2011), devido a necessidade do desenvolvimento de rotas alternativas utilizando fontes renováveis na produção de hidrogênio, o etanol é uma boa opção. Pois é menos tóxico se comparado com os outros combustíveis líquidos, além de ser muito abundante no Brasil, principalmente advindo da cana-de-açúcar. E no processo de produção de hidrogênio, destaca-se as reações de reforma. O etanol, ou bio-etanol, é um combustível renovável, produzido através da fermentação da biomassa (açúcar, amido e celulose) (Velu *et al.*, 2005).

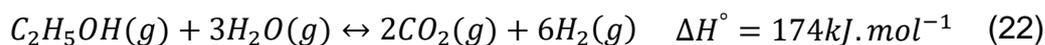
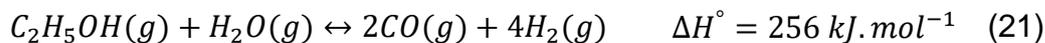
O etanol advindo da cana-de-açúcar é uma fonte renovável, possui baixa toxicidade e pouco poluente. Mostrando-se uma fonte promissora de obtenção de hidrogênio. O dióxido de carbono liberado na combustão é compensando durante o processo de fotossíntese da cana-de-açúcar. Se comprado com os combustíveis fósseis, o etanol não emite gases tóxicos como óxidos de nitrogênio e de enxofre, responsáveis por diversos danos ao meio ambiente. O uso de etanol também beneficia a economia brasileira, visto que o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar (Garcia & Laborde, 1991; Oakley & Hoadley, 2010).

Segundo Andrade *et al.* (2009), as características básicas do etanol como combustível podem ser: anidro ou hidratado. O etanol anidro é utilizado como aditivo na gasolina, melhorando seus índices de octanagem. O etanol hidratado, possui apenas 5% de água, e só pode ser utilizado como combustível puro.

Segundo a Agência Nacional de Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis (ANP), no ano de 2019, o Brasil produziu 35.306.997 m³ de Etanol, o maior recorde desde 2012. Sendo a região sudeste a maior produtora, em torno de 58% da produção (ANP, 2019).

O processo de geração de hidrogênio através da reforma a vapor de álcoois é conhecido há bastante tempo, sendo grande o número de trabalhos realizados nessa área (Camargo, 2004).

O processo de reforma a vapor, consiste em uma reação entre o etanol e vapor d'água, tendo como produtos o hidrogênio e o dióxido de carbono, visto nas eq. (21) e (22). A reação é favorecida, termodinamicamente, em altas temperaturas e acompanhada por diversas outras reações. São propostos diversos mecanismos para explicar como é produzido os produtos finais. As reações e os mecanismos, dependem, principalmente, da temperatura e do catalisador (Akande, 2005a; Busca *et al.*, 2010).



A reforma a vapor de etanol, geralmente, é acompanhada pela reação de deslocamento de monóxido de carbono por vapor d'água, eq. (23), chamada de WGSR (*Water Gas Shift Reaction*). Ao contrário da reforma a vapor, a reação de deslocamento é favorecida, termodinamicamente, em baixas temperaturas. Essa reação contribui para aumentar o rendimento de hidrogênio e para o consumo de monóxido de carbono. O monóxido de carbono (CO) é um elemento indesejável na carga de hidrogênio destinadas às células combustíveis de membrana trocadora de prótons (PEMFC), pois “envenena” o ânodo de platina (Akande *et al.*, 2005b; Busca *et al.*, 2010).



De acordo com Camargo (2004), a respeito aos processos de purificação do hidrogênio produzido pela reforma do etanol, tem-se uma maior atenção voltada para a remoção do CO. Esta remoção se dá através da redução do CO a níveis de partes por milhão ($\mu\text{mol/mol}$) quanto o tipo de célula a combustível utilizada assim requerer (como é o caso das células do tipo PEM, objeto de estudo deste trabalho). Além da remoção do Dióxido de carbono (CO_2), que apesar de não contaminar os

componentes das células afetam o seu desempenho, reduzindo a área de contato dos eletrodos com o hidrogênio.

As eq. (21) e (23) representam as etapas intermediárias principais do processo de reforma, pois as reações que ocorrem no reformador são complexas (Fishtik *et al.*, 2000). A mistura água/etanol no reformador deve ser aquecida a temperaturas maiores que 550 K. Após 650 K a produção de hidrogênio cresce rapidamente (García & Laborde, 1991). A proporção água/etanol de acordo com a eq. (21), tem sido abordada por alguns autores (García & Laborde, 1991; Vasudeva *et al.*, 1996; Ioannides & Neophytides, 2000). Os quais trazem que quanto maior a relação molar água/etanol, maior será a produção de hidrogênio e menos será a incidência de compostos como CH_3CHO , CH_4 , C_2H_4 e carbono no produto da reação. Onde uma relação ótima foi encontrada por Ioannides e Neophytides (2000), no valor de 2,8, quando o reformador queima uma parte do hidrogênio não aproveitado na célula a combustível para gerar a energia necessária para a reforma. Sendo que, em um reformador que queima uma parte do próprio etanol, a proporção água/etanol situa-se entre 0 e 1, isso porque a própria reação de queima do etanol produz água adicional.

2.6. Energia em comunidades isoladas

A questão energética nas comunidades isoladas está relacionada ao suprimento de eletricidade e ao fornecimento de combustíveis, onde a disponibilidade do recurso e a viabilidade técnica são itens importantes para determinar as opções tecnológicas adequadas e eficientes. Sabe-se que o uso de grupo-geradores movidos a óleo diesel é uma tecnologia muito utilizada nestas regiões, como por exemplo na Amazônia. Porém, sua sustentabilidade econômica é difícil, se não impossível. O que torna necessário o desenvolvimento de alternativas energéticas tecnicamente e economicamente viáveis para estas situações (Rendeiro *et al.*, 2011).

Na Amazônia, são raros o uso de fontes renováveis, em exceção de alguns pequenos aproveitamentos hidráulicos e de sistemas fotovoltaicos comunitários advindos de projetos de pesquisas. Isso ocorre não apenas devido ao alto custo de implantação dessas energias ecológicas (quando comparada aos motores a diesel ou

a gasolina), mas principalmente devido a tecnologia ser mais complexa e geralmente desconhecida na região (Rendeiro *et al.*, 2011).

Atualmente, as principais formas de energia disponíveis para os moradores das comunidades isoladas são: o diesel, o querosene para lamparinas, velas, gás e baterias. Essas fontes, além da sua baixa eficiência energética, ainda sofre um aumento dos preços, se comparados ao dos grandes centros urbanos, devidos aos “marreteiros”. Pessoas que levam esses insumos e acrescentam seu lucro aos mesmos até o consumidor final (Schmid & Hoffmann, 2004).

Uma solução para comunidade isoladas vem sendo, cada vez mais, estudada para suprir essa demanda de energia. Onde a solução corresponde na combinação de uma ou mais fontes de energia, renováveis ou não. Além de garantir a confiabilidade e uma maior disponibilidade de energia no local. Essa solução é conhecida como Sistema Híbrido de Geração Distribuída (SHGD), a qual pode, um dia, substituir ou diminuir o uso de combustíveis fósseis (Silva, 2010).

Assim, por exemplo, estudos demonstraram, que na região amazônica, há um alto índice de radiação solar, com pouca variação sazonal ao longo do ano, tornando a energia solar com uso de painéis fotovoltaicos um atrativo (Martins *et al.*, 2008). Logo, combinar o potencial solar com a abundância de água na região, de forma a reduzir os impactos ambientais decorrentes da produção de energia elétrica com fontes não-renováveis, tornam a temática e um grande desafio para o Brasil (Silva, 2010).

2.7. SHGD aplicado a comunidades isoladas

Os Sistema Híbrido de Geração Distribuída (SHGD) são sistemas que utilizam mais de uma fonte de energia. Assim, quando uma fonte de energia não está disponível, a outra fonte é capaz de suprir a falta temporária da outra, permitindo assim que estes operem com um mínimo de interrupções (Mcgowan & Manwell, 1999).

A Figura 12 apresenta um tipo de SHGD, o qual possui tecnologias renováveis, como a solar fotovoltaica, eólica e uma pequena turbina hidráulica, e por não-renováveis, como o Grupo Gerador a Diesel (Baring-Gould *et al.*, 2003).

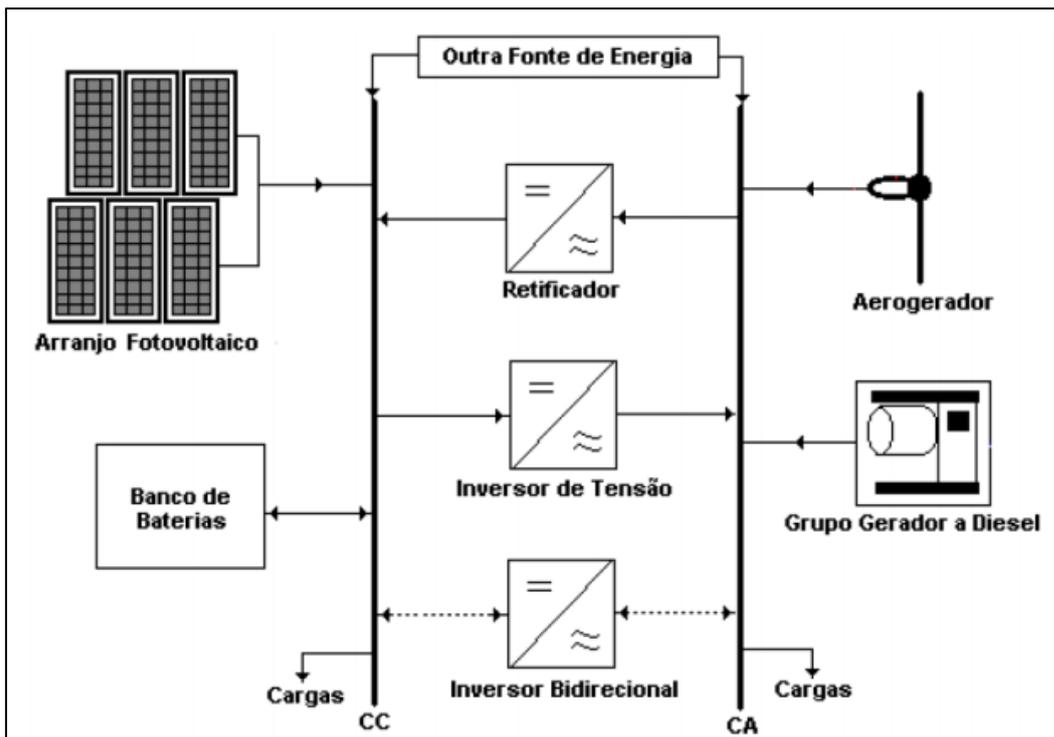


Figura 12 - Modelo de SHGD (Barbosa *et al.*, 2005)

Como pode ser observado na Figura 7, o SHGD pode fornecer energia à carga de duas formas: em corrente alternada (CA) e em corrente contínua (CC). Onde pode-se ainda, incluir sistemas de armazenamento, produção de energia com hidrogênio, Células a combustível e eletrolisadores.

Segundo Nelson *et al.* (2002) os primeiros SHGDs surgiram em 1977 nos Estados Unidos da América (EUA), o qual possuía painéis fotovoltaicos e Grupo de geradores a Diesel. Onde possuía como objetivo a redução do consumo do combustível diesel na produção de energia elétrica.

No Brasil, o primeiro sistema híbrido instalado foi em Fernando de Noronha, composto de um sistema eólico-diesel. Este sistema é composto por um sistema eólico de 75 kW e de um grupo gerador a diesel de 50 kW. Após revitalização, o atual sistema possui uma capacidade instalada de 2,1 MW, com 300 kW de potência eólica e 1,8 MW de sistema a diesel (Feitosa *et al.*, 2002).

Alguns tipos de sistemas já foram propostos e estudados, onde possuíam sistemas com fontes renováveis ou não. Os sistemas mais estudados para aplicações isoladas possuem a energia solar fotovoltaica (PV), turbinas eólicas, energia hidráulica, hidrogênio, células a combustível (CaC) e geradores a diesel, ou combinações destes.

Um dos primeiros trabalhos utilizando módulos PVs com hidrogênio para armazenamento de energia foi mostrado por Perez (1991) e Lehman (1994), no Centro de Pesquisas em Energia da *Humboldt State University*. O projeto consistia por um arranjo PV de 9,2 kWp fornecendo energia a um compressor, utilizado como carga, que possui a função de aeração de tanques de peixes. A energia excedente é utilizada por um eletrolisador bipolar do tipo alcalino de 7,2 kW para produção e posterior armazenamento do hidrogênio. Quando o PV não consegue suprir a demanda, o hidrogênio fornece combustível para a CaC de 1,5 kW que complementa a energia necessária ao compressor. O que se observa neste trabalho, é a necessidade de uma nova avaliação do sistema, onde deve se considerar o comportamento dos componentes em condições reais de trabalho.

Ghosh *et al.* (2003), avaliaram um projeto demonstrativo na Alemanha. O projeto possui 43 kWp de módulos PVs de diversos tipos em diferentes inclinações, um banco de baterias, um eletrolisador alcalino que opera na faixa de 5 a 26 kW e uma CaC de 6 kW. O rendimento global, baseado no balanço de energia anual, sem considerar a eficiência dos módulos PVs, varia de 51% a 64%. O banco de baterias fornece energia a carga por três dias, caso haja ausência de radiação solar. Aproximadamente de 50% a 52% da demanda é suprida pelas baterias. Além de que, outros 25% da demanda é suprida pela CaC, mostrando que a energia deve ser armazenada por longos períodos em reservatórios de H₂. Mas, há ainda a necessidade de uma avaliação em condições reais de operação em áreas isoladas, acrescentando diferentes curvas de cargas e radiação.

Na Espanha, Calderón *et al.* (2008), apresentaram um estudo sobre dimensionamento e construção de um banco de ensaio eólico-solar de laboratório com uso de hidrogênio. Os resultados obtidos neste estudo visava auxiliar no dimensionamento de uma sistema-piloto. Este sistema possui dois módulos PVs de 45 Wp cada, um aerogerador de 90 W, uma CaC de 50 W e um eletrolisador de 150 W. Este sistema possui a função de apoio ao dimensionamento dos componentes do sistema híbrido para atender a comunidades isoladas da rede elétrica convencional. Uma carga constante foi considerada durante diversos testes nesta pesquisa. Os resultados do projeto não levam consideração a otimização do sistema.

No Brasil, mesmo que muito recentes, existe pesquisas com aplicações para produção de hidrogênio para armazenamento de energias advindas de fontes renováveis. Na Universidade Federal do Pará (UFPA), o Grupo de Estudos e

Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE) possui um estudo de caso com uso de uma CaC em um SHGD na região Norte. Esse sistema possui 10 kW de gerador eólico, 3,2 kWp de módulo PV, e de 20 kVA de um grupo gerador a diesel. Foram feitas simulações para avaliar a participação de cada uma das fontes de energias envolvidas (Vale *et al.*, 2004). Este trabalho tem como objetivo determinar parâmetros de avaliação técnico-econômica do uso do hidrogênio como forma de armazenamento de energia em comunidades isoladas na Amazônia. No trabalho, utilizou-se a biomassa para produção de hidrogênio, através de um gaseificador. O sistema gaseificador/CaC ainda não foi implementado. Logo, ainda se faz necessário mais pesquisas quanto ao processo de dimensionamento, otimização, instalação e operação.

Na Universidade de Campinas (UNICAMP), Furlan (2008) apresentou uma análise comparativa entre as formas de armazenamento de energia por sistemas PV-Baterias e por sistemas PV-CaC. Neste trabalho conclui-se que: uma redução de 35% no custo do conjunto eletrolisador-reservatório-CaC pode tornar o sistema com armazenamento a hidrogênio atrativo e competitivo. O autor recomenda ainda o aprofundamento em pesquisas para avaliação econômica, considerando o feito custo do sistema de H₂ (CaC e eletrolisador), além da influência do preço do diesel aplicado na região amazônica.

3. Metodologia

3.1. Objeto de estudo

Este projeto teve como objetivo aprimorar um projeto pré-existente. Instalando, operando e analisando o desempenho de um sistema autônomo de geração de energia elétrica. Este sistema é composto por três subsistemas:

- Um subsistema de painéis fotovoltaicos (PV), transformando energia solar em energia elétrica;
- Um subsistema de produção de gás reformado a partir da reforma do etanol. O gás reformado é composto, principalmente, por hidrogênio e óxidos de carbono, além do metano em baixas porcentagens.;
- E, um subsistema de conversão do gás reformado em energia elétrica, transformação da energia química diretamente em energia elétrica, através da Célula a Combustível (CaC).

Lembrando que, o Reformador e CaC formam um Sistema Integrado, onde primeiro liga-se o reformador e logo em seguida a CaC.

Estes três subsistemas estão associados a um subsistema de monitoramento, gerenciamento e controle (SMGC). O sistema completo foi concebido para funcionar de forma confiável e segura, tecnicamente viável, sustentável e destinado à alimentação de comunidades isoladas com o perfil de carga de baixa e média potência.

Como descrito anteriormente, nas comunidades isoladas, geralmente, se utilizam um grupo de gerados a diesel para produção de energia elétrica, devido ao perfil de carga. Mas estes operam com baixas eficiências, advém de fontes não-renováveis e podem trazer malefícios ao meio ambiente, além da dificuldade de suprimento. No presente projeto protótipo buscou-se utilizar uma fonte de combustível renovável (etanol), o qual é encontrado de forma abundante,

principalmente no Brasil, devido a produção de cana-de-açúcar, além de ser um atrativo para a economia. Com isso é de fácil suprimento e ecologicamente viável.

Este projeto trouxe como inovações:

- Não há compressor e nem armazenamento de hidrogênio. Tudo que é produzido no reformador é consumido na mesma hora pela célula a combustível, por isso a denominação de Sistema Integrado;
- O uso de uma unidade protótipo que produz um gás reformado através da reforma a vapor do Etanol (C_2H_5OH);
- O uso inovador de uma célula a combustível (CaC) que aceita o gás reformado produzido através da reforma a vapor do etanol.

O projeto foi construído para que um consumidor fosse atendido por um SIGFI (Sistemas de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes – SIGFI) com fim de estudos de viabilidade técnica. Onde o mesmo poderá ser ampliado para condições reais de operação em uma comunidade isolada.

As principais etapas e atividades desenvolvidas durante esse trabalho foram:

- Revisão bibliográfica sobre energia elétrica;
- Revisão bibliográfica sobre sistemas híbridos de geração de energia utilizando célula combustível e hidrogênio;
- Projeto conceitual do sistema completo;
- Aprimoramento do sistema anterior;
- Obrigatoriedade do uso do banco de baterias;
- Aquisição da nova célula a combustível do tipo LTPEM;
- Modificação e melhoramento do reformador de etanol, para comunicação com a nova célula a combustível;
- Integração da célula a combustível ao reformador de etanol;
- Aquisição dos componentes de interligação dos subsistemas;
- Instalação de um sistema de fornecimento de hidrogênio puro a célula a combustível;
- Instalação de softwares;
- Montagem e testes com o subsistema célula a combustível, utilizando hidrogênio puro;
- Montagem e testes com o subsistema reformador, utilizando etanol PA e etanol hidratado (grau 96);

- Testes com o sistema completo alimentando um perfil de carga SIGFI 45;
- Análises operacionais, atualização do software e avaliação do sistema;
- Aquisição e análise dos dados experimentais;
- Desenvolvimento do simulador em Excel e VBA;
- Comparação dos dados reais com os simulados para validação do simulador;
- Simulação de alguns cenários no simulador a fim de otimização do sistema completo.

Com o objetivo de aumentar a eficiência do sistema de geração isolada de energia elétrica, retirou-se um grande consumidor do sistema base deste projeto, o compressor. E, além disso, para reduzir custos e torná-lo mais seguro, retirou-se o armazenamento de hidrogênio.

A célula a combustível (CaC) antiga, modelo E-2200x do fornecedor Reli-ON (Plug Power), exigia níveis de pureza muito altos de hidrogênio (99,95%), logo optou pela troca da célula. As CaCs convencionais requerem hidrogênio de elevada pureza, o que significa etapas adicionais no processo de reforma com o emprego de materiais como paládio que acrescenta notavelmente os custos. Neste projeto utilizou-se de uma inovação, uma CaC que aceita uma mistura rica em hidrogênio e que tolera a presença de CO₂ e CO.

Como visto no projeto base, existia um alto consumo elétrico do reformador durante a fase de produção de hidrogênio, mostrando que o sistema de geração consumia mais energia elétrica do que produzia, inviabilizando-o. Com as modificações feitas no reformador, ele deixa de ser um consumidor voraz.

As modificações no reformador foram feitas pelo próprio fornecedor, a empresa grega Helbio. Além de modificar o reformador, a Helbio, adaptou a nova célula, da empresa PowerCell, ao mesmo, tornando-os um Sistema Integrado.

O sistema de geração isolada de energia elétrica utiliza o etanol como combustível e o mesmo foi dimensionado para um consumidor com o perfil de carga SIGFI 45.

Para fins de melhor entendimento, quando for dito “Sistema Completo”, quer dizer em relação ao Sistema isolado de geração de energia elétrica utilizando reformador, CaC, PV, banco de baterias e inversor. E quando dizer, “Sistema Integrado”, estará se referindo ao sistema composto apenas pelo Reformador e CaC.

O sistema de geração isolada de energia elétrica, o Sistema Completo, foi concebido para ser autônomo, ou seja, para não depender da rede elétrica, e, que utilizasse fontes renováveis de energia.

As duas fontes renováveis de fornecimento de energia para o sistema completo são: o sol e o etanol. Para melhor entendimento o banco de baterias será chamado de baterias e os painéis fotovoltaicos de PV. O combustível para a CaC é o gás reformado, advindo do processo de reforma a vapor do etanol. Este gás reformado, segundo o fabricante, é composto por hidrogênio (~73,3 vol.%), metano (~2,6 vol.%), monóxido de carbono (< 3 ppm) e dióxido de carbono (~ 24% de base seca).

A Figura 13 apresenta o diagrama de blocos do sistema completo.

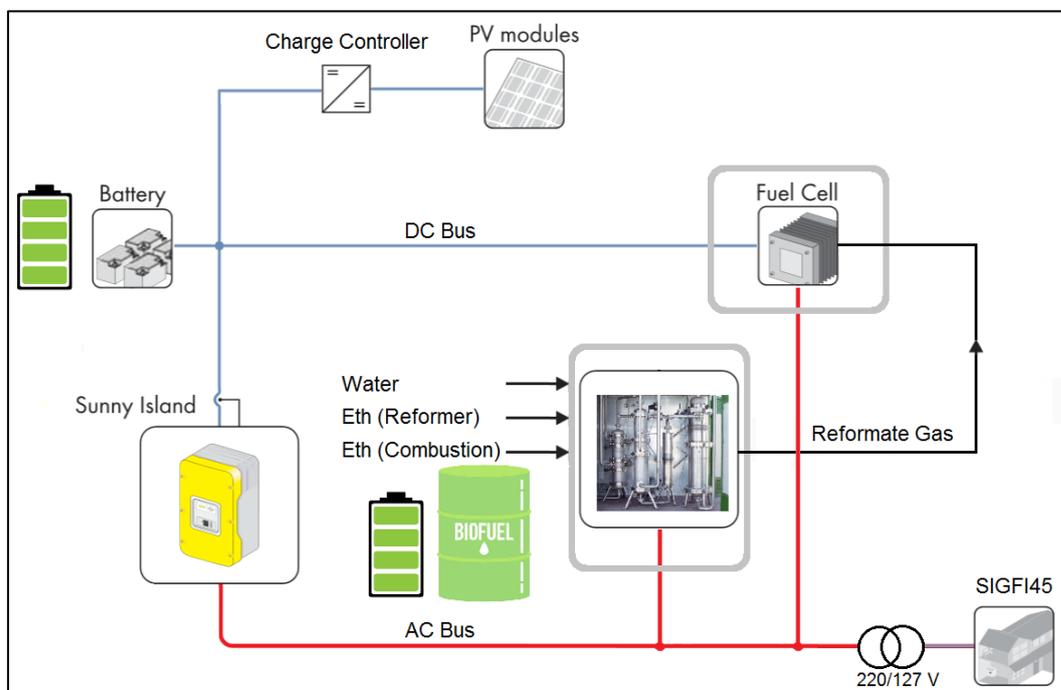


Figura 13 - Diagrama de blocos com ligações entre os equipamentos (Elaboração própria, 2021)

Olhando a Figura 13 observa-se que o sistema possui dois barramentos: um barramento em corrente contínua (CC) representado por “DC Bus” de 48 V, na cor azul; e, um barramento em corrente alternada (CA) representado por “AC Bus” de 220 V, na cor vermelha. O barramento DC pode ser alimentado tanto pelo PV (“PV modules”), quanto pela CaC (“Fuel Cell”) e quanto pela bateria (“Battery”). Quando o consumidor (“SIGFI 45”) acende uma lâmpada, ele vai buscar a corrente no barramento AC, ou seja, no inversor. O inversor puxa a energia do barramento DC, onde, quem estiver disponível no DC irá entregar energia ao AC. Se o PV,

neste momento, estiver fornecendo energia, ele alimentará o DC, mas, se a voltagem em DC for maior que 48 V a energia será mandada para a bateria, mas se a voltagem em DC for menor que 48 V, será necessário que a bateria também envie energia ao barramento DC.

Visto que a bateria é o único equipamento que possui duplo sentido, podendo enviar carga ao barramento DC e pode receber carga do mesmo. Se a bateria está com carga mais alta do que o barramento DC, se ela está com o potencial mais alto no DC, escoar energia da bateria para o barramento DC; se o DC está com a voltagem mais alta do que a bateria, escoar do barramento DC para a bateria.

A carga pode ser tanto o consumidor quanto o Sistema Integrado (Reformador e CaC), estes conectados ao barramento AC. Quando liga qualquer um desses no barramento AC, ele vai puxar carga do inversor e o inversor vai puxar da linha DC. Quem estiver disponível vai entregar, se a CaC estiver ligada ela vai alimentar o barramento DC e essa energia gerada pode ir uma parte para a bateria e uma parte para o inversor. Quem vai dizer se a bateria está sendo carregada ou descarregada é a voltagem no barramento DC.

Por exemplo, o barramento DC tem nominal de 48 V, quando der 47,5 V a CaC será ligada. Se está 47,5 V é porque a bateria está descarregada, logo a CaC é ligada para recarregar a bateria.

O PV fornece energia quando tem disponibilidade de sol. Quando ele está fornecendo energia ele vai alimentar o barramento DC, se tiver consumo, o PV fornece energia para suprir esse consumo, e, se não tiver consumo vai do PV para a bateria. Mas se a bateria estiver totalmente carregada, essa energia será desperdiçada.

3.1.1. Reformador de Etanol

O reformador GH2-BE-1000, Figura 14, é do fabricante Helbio S.A., é uma unidade protótipo, que produz gás reformado a partir da reforma a vapor do etanol (C_2H_5OH). O gás reformado é composto, principalmente, por hidrogênio (> 70% vol) e óxidos de carbono, além do metano em baixas porcentagens.



Figura 14 - Reformador de Etanol (Elaboração própria, 2021)

Segundo o fabricante, esta unidade é adequada para alimentar uma célula a combustível do tipo LTPEM (célula a combustível capaz de operar com o gás reformado).

3.1.2. Célula a combustível

Como um dos principais requisitos da seleção da CaC era a aceitação ao gás reformado, fez-se a escolha desta CaC, pois a mesma possui a flexibilidade para se usar hidrogênio puro e gás reformado, segundo o fabricante PowerCell. O manual da CaC encontra-se no Anexo I,

De acordo com a Helbio, o tipo de CaC que mais se adequa a essa condição, é a Célula a Combustível do tipo LTPEM (*Low Temperature Proton Exchange Membrane*). Ou seja, uma célula a combustível de membrana de troca de prótons a baixa temperatura.

De acordo com a Helbio, a *40-cell LT-PEM Fuel Cell Stack* é capaz de fornecer até 1 kW de energia elétrica usando gás rico em hidrogênio (H_2), como

combustível, e oxigênio do ar ambiente (O_2), como oxidante. O combustível deve possuir, para melhores resultados, uma concentração $>65\%$ de H_2 , <10 ppm de CO e a maioria do vapor de água deve ser removido (ponto de orvalho < 33 °C).

A Figura 15 apresenta a unidade da CaC instalada na PUC-Rio. Onde pode-se observar o sistema de ventilação, tão importante para exaustão dos gases ou eliminação de um possível vazamento.

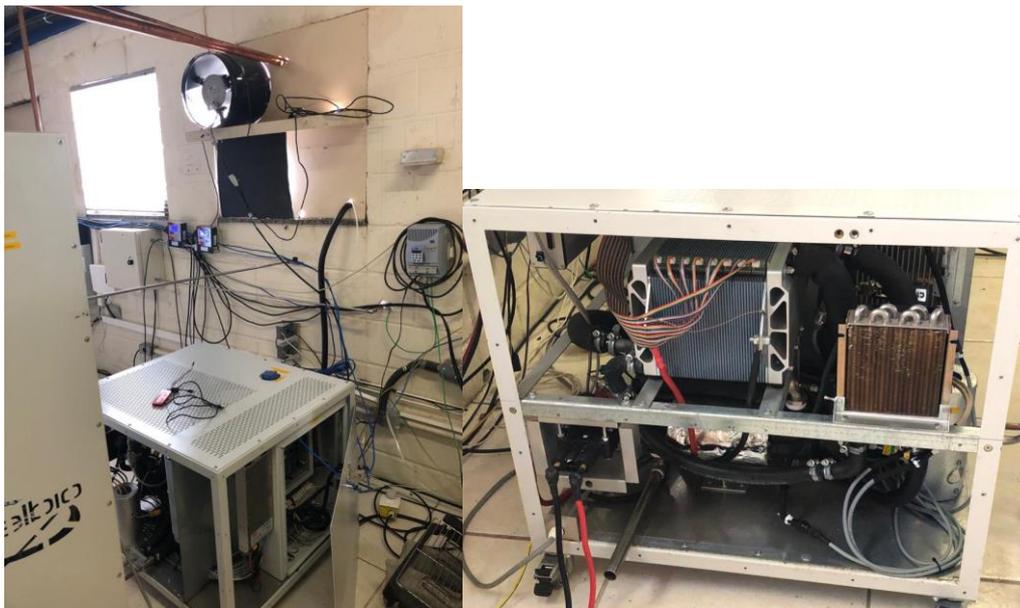


Figura 15 - Unidade da Célula a Combustível inserida no laboratório da PUC-Rio (Elaboração própria, 2021)

3.1.3. Inversor

O inversor utilizado neste projeto é do modelo Sunny Island 3.0M, o qual é indicado para sistemas *off-grid*. Para controle e operação segura do inversor foram utilizados: *Sunny Remote Control e BatFuse*. Este inversor é do fornecedor SMA Solar Technologies AG, Niestetal, Alemanha. (Silva, 2017)

Este tipo de inversor, segundo o fabricante, é indicado para baterias de chumbo-ácido do tipo VRLA (as utilizadas neste projeto), na faixa de capacidade de 100 Ah a 10000 Ah. A máxima eficiência deste inversor é de 95,3%.

A Figura 16 mostra a curva característica da eficiência do inversor Sunny Island 3.0 M.

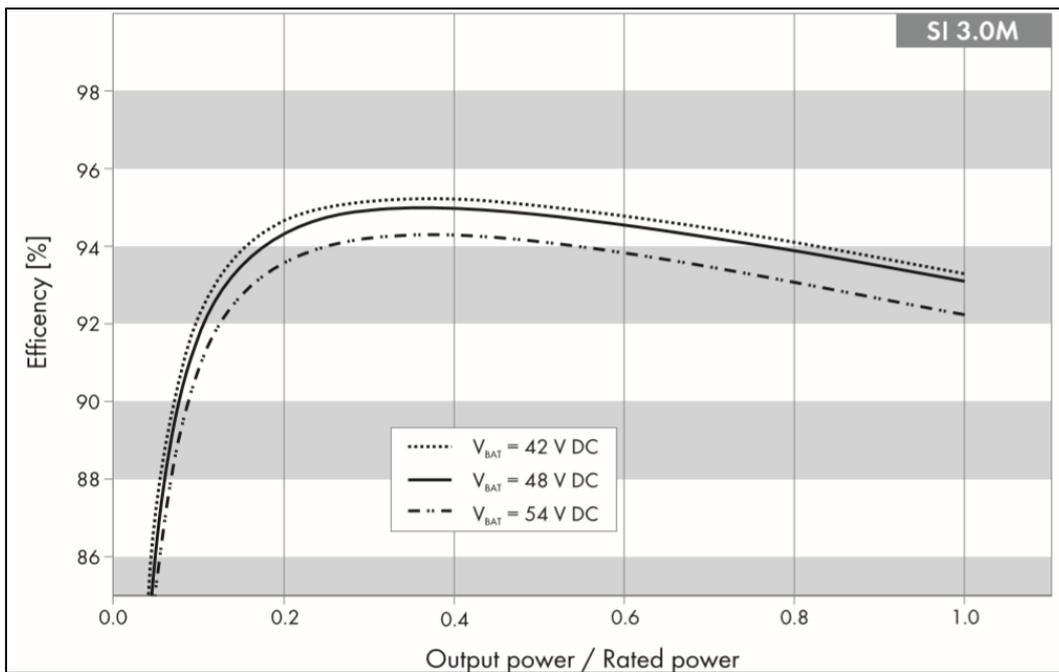


Figura 16 - Curva característica da eficiência do Inversor Sunny Island 3.0 (Silva, 2017)

A Figura 17 mostra o Inversor (em amarelo) e ao lado encontra-se o *BatFuse*. Também pode-se ver o sistema com lâmpadas, para simular o perfil de carga SIGFI 45, ou seja, através de um banco de resistores. E a Figura 18 apresenta, em detalhe, o dispositivo *Sunny Remote Control*, onde o mesmo é utilizado para aquisição de dados e operação remota. (Silva, 2017)



Figura 17 - Vista do inversor e ao lado o *BatFuse*; sistema com lâmpadas (Elaboração própria, 2021)



Figura 18 - Medição indireta do estado de carga das baterias por meio do dispositivo Sunny Remote Control do inversor SMA (Elaboração própria, 2021)

3.1.4. Banco de baterias

O banco de baterias do sistema possui quatro baterias de 12 V/100 Ah do tipo VRLA (*Valve Regulated Lead Acid*) conectadas em série. São do fabricante Moura / Brasil, possuem como especificações 12 MVA-100 de 100 Ah (C20). (Silva, 2017)

A Figura 19 apresenta o banco de baterias.



Figura 19 - Vista do banco de baterias empregado no sistema de geração (Elaboração própria, 2021)

3.1.5. Painéis fotovoltaicos

No projeto foi utilizado três painéis fotovoltaicos, Figura 20:

- Um módulo policristalino do fabricante Yingli Energia (Modelo YL245P-29b, de potência máxima de 245 W);
- E dois módulos monocristalino do fabricante Tecnometal DYA Energia Solar (Modelo SV250D20M, de potência máxima de 250 W).



Figura 20 - Painéis fotovoltaicos (Silva,2017)

Adicionalmente utilizou-se um controlador de carga MPPT, do fabricante eSMART, a qual possui a função de detecção automática da tensão 12 V/ 24 V/ 48 V de 20 A e elevada eficiência. Este sistema possui três estágios de carregamento: corrente constante, tensão constante e tensão de flutuação configuráveis no software Solar Eagle fornecido pelo fabricante (Silva, 2017).

3.2. Abordagem experimental

Para construir o simulador de operação do sistema isolado de produção de energia elétrica é necessário que cada equipamento seja caracterizado em termos energéticos. Para fazer essa caracterização foram feitos diversos testes (testes experimentais), sendo que foram caracterizados neste projeto: a célula a

combustível individualmente e o Sistema Integrado (Reformador + CaC). Os procedimentos dos testes e os métodos aplicados serão descritos a seguir.

Vale lembrar que a caracterização do inversor e dos painéis fotovoltaicos foram feitas pelo projeto CaCRefEtOH (Silva, 2017).

3.2.1. Célula a combustível LTPEM

Para a caracterização da célula a combustível (CaC) foram feitos alguns testes, sendo que estes foram feitos com H₂ puro. A CaC também opera com gás reformado, como citado anteriormente, mas a mesma utiliza apenas o H₂ do gás reformado. Analisando os dois cenários, com H₂ puro ou com gás reformado, apenas a vazão total será maior com o gás reformado, em torno de 1200 L/h. Como citado pelo fabricante o gás reformado possui 70% de hidrogênio, logo $1200 \cdot 0,7$ é aproximadamente 980 L/h de H₂, o qual foi utilizado nos ensaios com H₂ puro.

O subsistema analisado está destacado em vermelho na Figura 21.

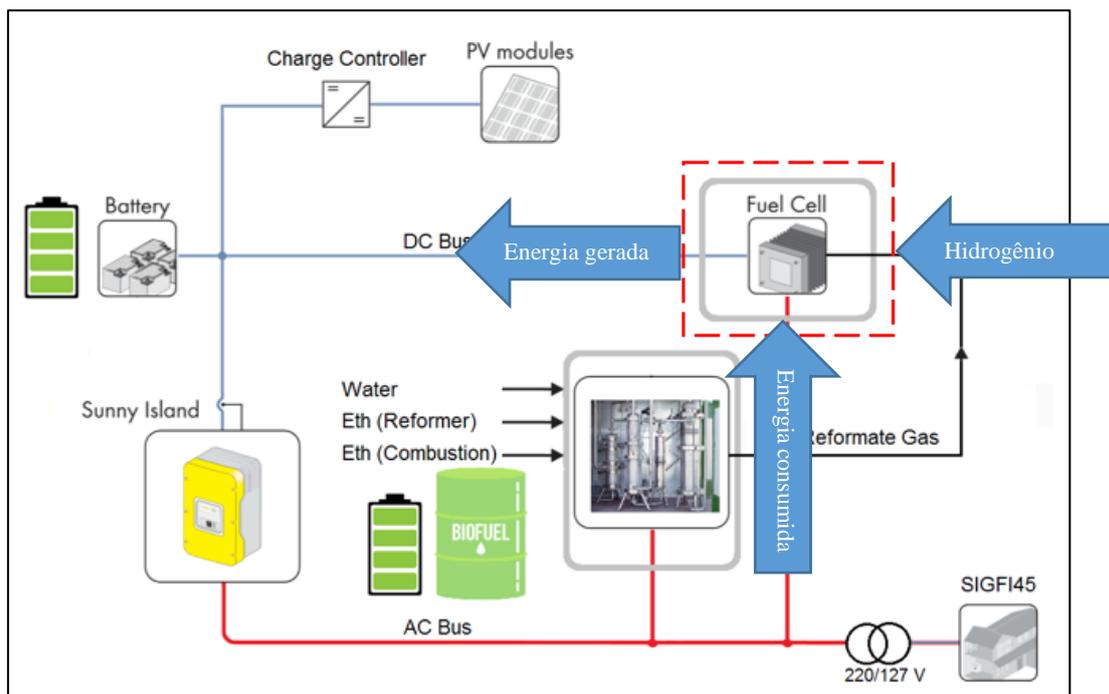


Figura 21 - Análise energética da Célula a Combustível (Elaboração própria, 2021)

De acordo com o fabricante do equipamento, a CaC LTPEM FCS opera em quatro estados: *Checkout*, *Warm-up*, *Operation* e *Shutdown*. Para acompanhar tudo

que ocorre durante o funcionamento da CaC, o usuário pode interagir com um aplicativo desenvolvido para o ambiente Windows.

Quando a CaC é ligada, o sistema de controle entra no estado de *Checkout*. Neste estado o microcontrolador verifica se todos os sensores estão funcionando corretamente. Após a finalização deste etapa, a CaC entra em modo de espera aguardando por um sinal advindo do reformador.

Após receber o sinal do reformador, a CaC entra no estado de *Warm-up*, estado de aquecimento. Neste estado as bombas de circulação estão ligadas - ON. O 48 V PS está ligado e fornece energia ao pré-aquecedor de água. O setpoint do aquecedor de água é ajustado para 60 °C e então a CaC começa a pré-aquecer. Quando a temperatura da água de resfriamento, que sai do empilhamento de célula a combustível atinge 45 °C, a CaC está pronta para receber o combustível hidrogênio (ou o gás reformado), entrando no estado *Operation*.

No estado *Operation*, estado de operação, o ventilador de ar inicia uma velocidade de rotação pré-estabelecida, com a finalidade de remover qualquer condensação de água. Quando a CaC está conectada ao Reformador, a CaC aguarda 30 segundos e então o reformador troca as válvulas de direção do combustível e direciona o combustível reformado para a CaC. O ventilador de ar ajusta o fluxo de ar a uma velocidade de rotação, também pré-estabelecida. Depois, a placa de controle envia um “sinal de pronto” para o processador de combustível. O ventilador de purga de ar inicia a uma velocidade de rotação pré-estabelecida. O subsistema PE CC/CC é ligado com uma tensão e corrente de saída pré-selecionadas. O medidor de voltagem da célula a combustível verifica a “saúde” de cada célula. Quando todas as voltagens das células (40 células) são maiores que 750 mV inicia-se o envio de energia para a carga externa, assim como, o conversor CC/CC é conectado no barramento CC do sistema. Então a rotina Iref Incr/Decr do ventilador de ar inicia, para acompanhar a demanda de saída de energia. A rotina Iref Incr/Decr é ativada para proteger a célula a combustível de problemas, como falta de combustível ou de inundação. A temperatura da água do sistema de transferência de calor do empilhamento da CaC é ajustada para operar a 72 °C com um controlador interno PID.

Após isso, a CaC entra no estado *Shut-down*, estado de desligamento. Onde, o desligamento da CaC pode ser através de um sinal externo ou por um sinal interno devido alguma falha grave do sistema.

Quando o sistema está integrado (Reformador + CaC), caso ocorra uma falha, a CaC envia um sinal de disparo ao reformador para iniciar o seu processo de desligamento. Esse processo é descrito nas seguintes etapas: a CaC envia um sinal de disparo ao reformador; o reformador troca as válvulas de direção do combustível e direciona o gás reformado para a ventilação; aquecedor de água é desligado; as células a combustível iniciam uma rotina para “consumir” o gás reformado deixado dentro da CaC; o ventilador de ar continua fluindo ar para o cátodo com a finalidade de remover o vapor de água residual; e, quando as tensões das células a combustível são < 750 mV, todo o sistema periférico é desligado.

Foram realizados 5 testes ligando os terminais CC da CaC no barramento CC do sistema, onde ocorreu a injeção de energia, pela CaC no barramento CC do sistema. Nos testes 1, 2 e 3, ocorreram alguns erros no software (*firmware*) e na interface de operação da CaC, onde o fabricante realizou algumas atualizações consertando o mesmo, logo considerou-se apenas os resultados dos testes 4 e 5. Nos testes foi ligado uma resistência de 1000 W no barramento AC.

O subsistema analisado pode ser visto, de forma simplificado, na Figura 22.

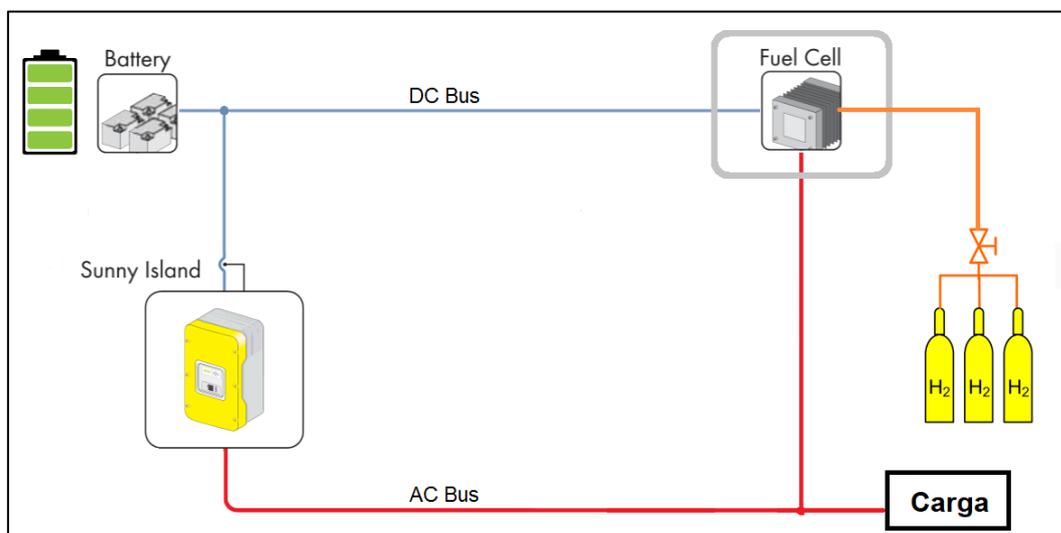


Figura 22 - Caracterização da CaC utilizando H₂ puro (Elaboração própria, 2021)

A operação da CaC segue um determinado padrão:

- Antes de iniciar o sistema deve-se verificar o nível de água desmineralizada, lembrando que a CaC precisa de água deionizada ou desmineralizada apenas para seu sistema de transferência de calor, logo, não é um insumo;

- Depois definir a capacidade desejada, visto que, como mostrado no manual deve-se primeiro atingir a capacidade de 100%, para depois modificar a mesma para as outras opções disponíveis (90, 80, 75 e 50%);
- Esperar a fase de aquecimento, em torno de 20 min, até as temperaturas T3 e T4 forem maiores que 45 °C, consumindo em torno de 600 W;
- Após aquecer, deve-se abrir a válvula de H2, com uma vazão de aproximadamente 980 L/h, na capacidade de 100%;
- Deve-se aguardar até as temperaturas T3 e T5 atingirem 60 °C, em torno de 10 min, onde a “rampa” de potência fornecida pela CaC começa a subir, já injetando potência ao barramento CC.

A CaC da Helbio injeta energia elétrica no barramento CC, onde observa-se que a potência na saída do conversor CC/CC é controlada e aumenta seguindo uma rampa linear até atingir um patamar que corresponde a uma determinada capacidade (100, 90, 80, 75 e 50%).

- Após atingir 1200 W, a 100% de capacidade, o tempo de produção é determinado pelo usuário, onde durante a produção a CaC possui um consumo constante perto de 110 W.

Onde:

T3 (*Stack Out temperature*) - Temperatura (°C) do fluido térmico quando ele sai da pilha de células de combustível.

T4 (*Heater temperature*) - Temperatura real (°C) do aquecedor de circulação, medida por um termopar inserido diretamente no tanque de buffer do aquecedor.

T5 (*Stack In temperature*) - Temperatura (°C) do fluido térmico quando ele entra na pilha de células de combustível.

Tanto nos testes 4 e 5, obteve-se curvas próximas às fornecidas pelo fabricante, como pode ser visto na Figura 23.

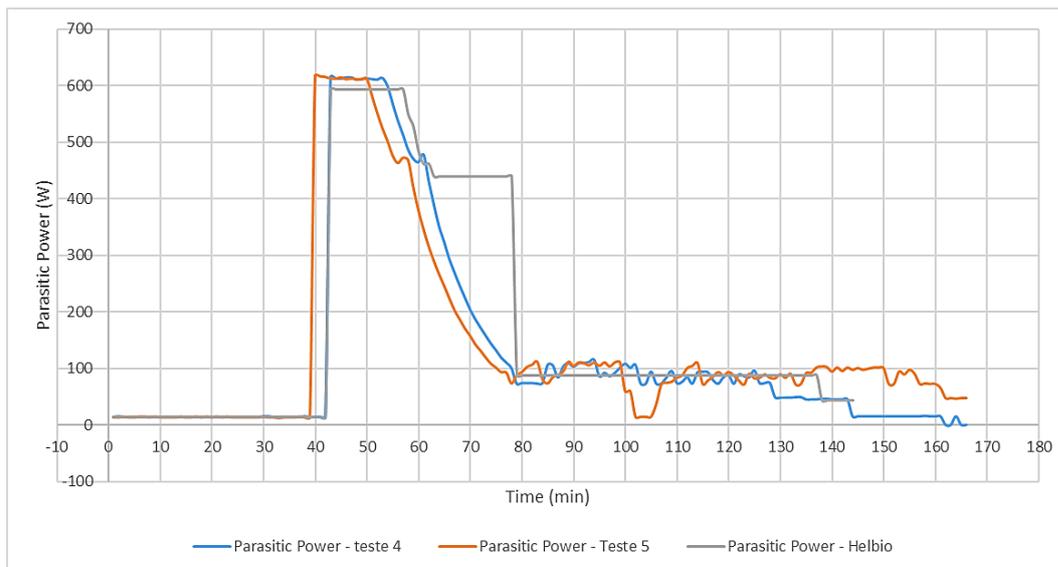


Figura 23 - Potência consumida pela CaC (W) (Elaboração própria, 2021)

A diferença da curva cinza (fornecida pelo fornecedor) das demais curvas, Figura 23, (obtidas pelos testes experimentais) é devido que, quando a CaC opera apenas com H_2 puro, ela “pula” algumas etapas. Logo, a curva cinza é o consumo da CaC com gás reformado e as demais é apenas com H_2 puro.

Em cada instante a CaC fornece uma corrente e para isso precisa de uma determinada vazão de hidrogênio. Segundo o fabricante “*Hydrogen fuel delivered to the fuel cell anode is based on the fuel cell current draw. The H_2 flow rate is determined by the following equation*”, eq. (24).

$$H_{2\text{Requirement}} = \frac{0,007\text{slm}H_2}{\text{cell} * \text{Amp}} * N * I * \lambda_{H_2} \quad (24)$$

A CaC pode operar em 5 capacidades (100, 90, 80, 75 e 50%) determinada pela corrente fornecida pelo empilhamento da CaC, I , na capacidade de 100% a corrente é de 45 A. Segundo o fabricante o fator λ_{H_2} , a razão do reagente alimentado e consumido no empilhamento da CaC, deve ser maior que 1,3. O empilhamento possui $N = 40$ células.

Utilizando a eq. (24), determinou-se a utilização do $\lambda_{H_2} = 1,3$. Os valores obtidos utilizando a equação e utilizando os dados fornecidos pelo fabricante (Amp - validados com os dados obtidos nos testes experimentais), podem ser vistos na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores da vazão de acordo com cada capacidade (Elaboração própria, 2021)

Capacidade (%)	Amp (fabricante / medido)	Vazão calculada – eq. 27 (L/h)	Vazão medida - teste 5 (L/h)
100	45	982,8	982,5
90	40-41	895,4	886,5
80	36-37	808,1	789,4
75	33-34	742,6	759,4
50	26-27	589,7	604,0

A célula a combustível possui uma Curva de polarização V-I, o qual, para cada CaC é única, Figura 24, mostra a curva de polarização e potência elétrica fornecida pelo empilhamento para a PowerCell S1 de 40 células (manual no Anexo D).

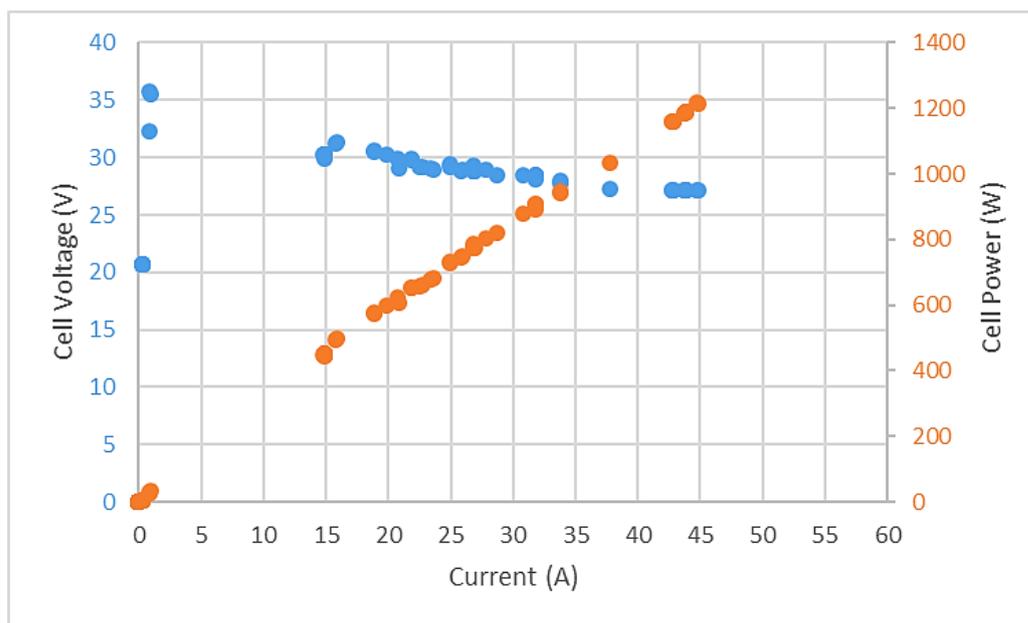


Figura 24 - Curva de polarização da CaC (40 células) (Elaboração própria, 2021)

Observa-se na Figura 24, que o empilhamento da CaC opera com uma diferença de potencial menor que 48 V que corresponde à tensão do barramento CC do sistema de geração de energia isolada. A CaC possui internamente um conversor CC/CC que opera com esta tensão no barramento CC e ajusta a corrente de saída do empilhamento da CaC (I_{REF}), apresentado na Figura 25. Como se pode notar, se a curva V-I é única e se a saída de corrente é controlada, então o empilhamento

fornece potência elétrica controlada. Independentemente do estado de carga da bateria (SOC) a CaC sempre fornecerá energia no barramento CC e é preciso a atuação de um sistema de controle para evitar danificar as baterias quando esta estiverem carregadas. Em operação automática, o sistema de controle reduz a capacidade ou desliga a CaC se for preciso.

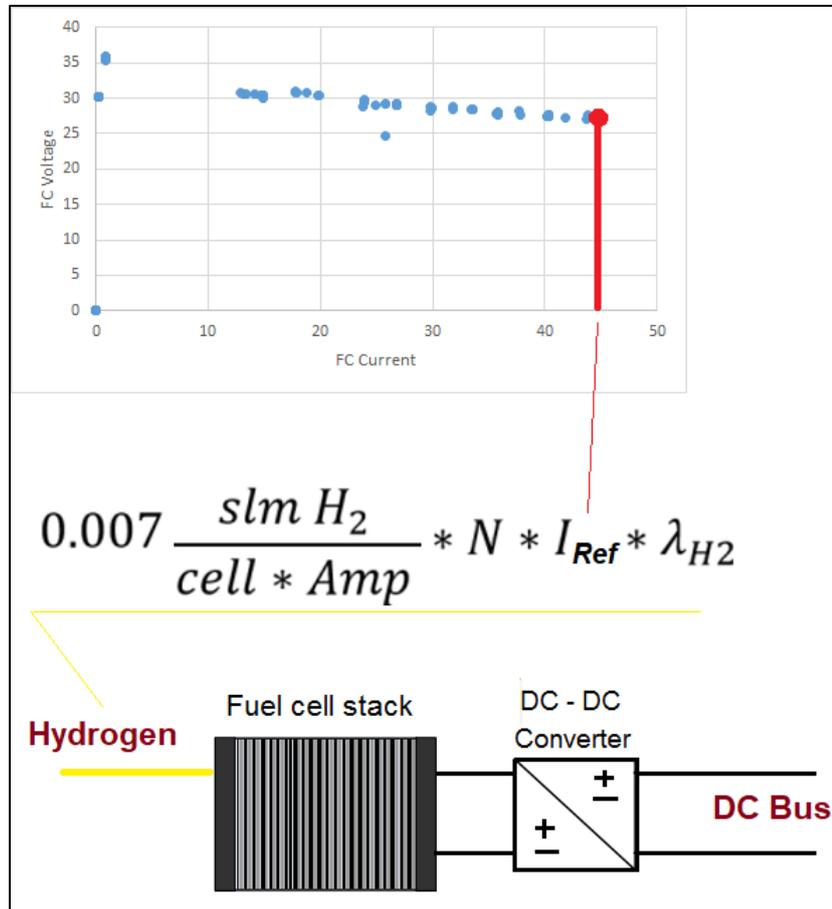


Figura 25 - Controlador de carga (Elaboração própria, 2021)

Para caracterizar a CaC alimentado com H_2 puro, obteve-se a curva de consumo específico, mostrado na Figura 26.

Para calcular a Potência (Pot_{CaC}) fornecida pela CaC, foram feitas aferições na corrente da CaC (I_{CaC}) e na tensão do barramento (V). A Potência pode ser calculada pela eq. (25).

$$Pot_{CaC} = V \cdot I_{CaC} \quad (25)$$

Na Tabela 6 encontra-se os valores das capacidades, e a potência média fornecida pela CaC e o consumo específico (L/Wh), visto que, como dito, foi usado uma carga de 1000 W no teste.

Tabela 6 - Resultados dos ensaios da Célula a combustível (CaC) (Elaboração própria, 2021)

Capacidade	Consumo específico	Potência gerada
(%)	(L/Wh)	(W)
100	0,92	1175,65
90	0,90	1085,26
80	0,89	992,46
75	0,91	926,28
50	0,88	773,40

Para obter a curva característica da CaC construiu-se um gráfico potência gerada versus Consumo específico e ajustado uma curva de tendência que melhor reproduz o comportamento com bases nos dados experimentais obtidos no teste 5. A curva e sua equação estão representadas na Figura 26.

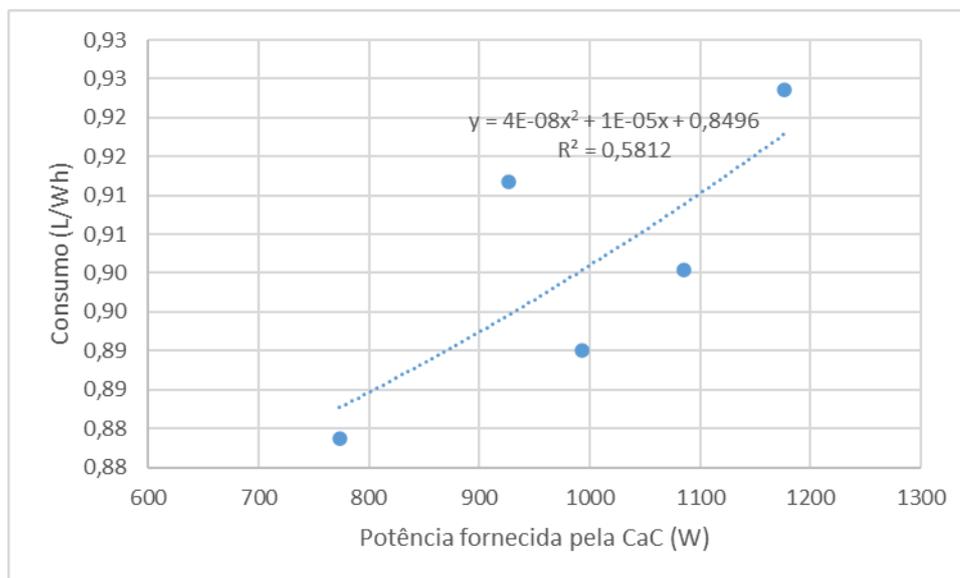


Figura 26 – Consumo específico em L/Wh da CaC - Teste 5 (Elaboração própria, 2021)

Comparando-se os valores medidos no teste 5 com os valores fornecidos pelo fabricante obteve-se o gráfico visto na Figura 27, onde observa-se que os resultados obtidos nos testes experimentais realizados no laboratório LEV da PUC-Rio foram satisfatórios.

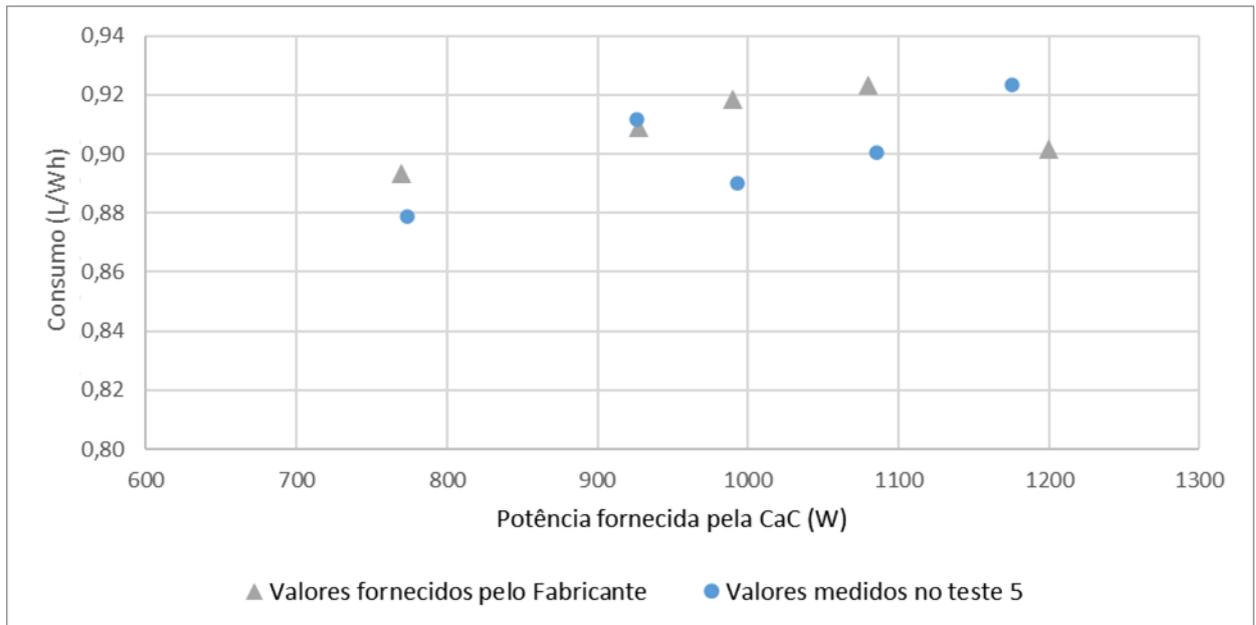


Figura 27 - Comparação entre valores medidos e valores fornecidos pelo fabricante Helbio (Elaboração própria, 2021)

Como observado na Figura 27, independente da Potência fornecida pela CaC a mesma possui um consumo praticamente constante.

Analisando o controlador de carga CC/CC (*converter DC/DC*), visto na Figura 25, onde com os dados experimentais do teste 5, foi possível obter a curva de eficiência do mesmo, Figura 28. Onde a eficiência pode ser obtida pela Potência de saída (*DC/DC power out*) dividida pela Potência de entrada (*Power FC*).

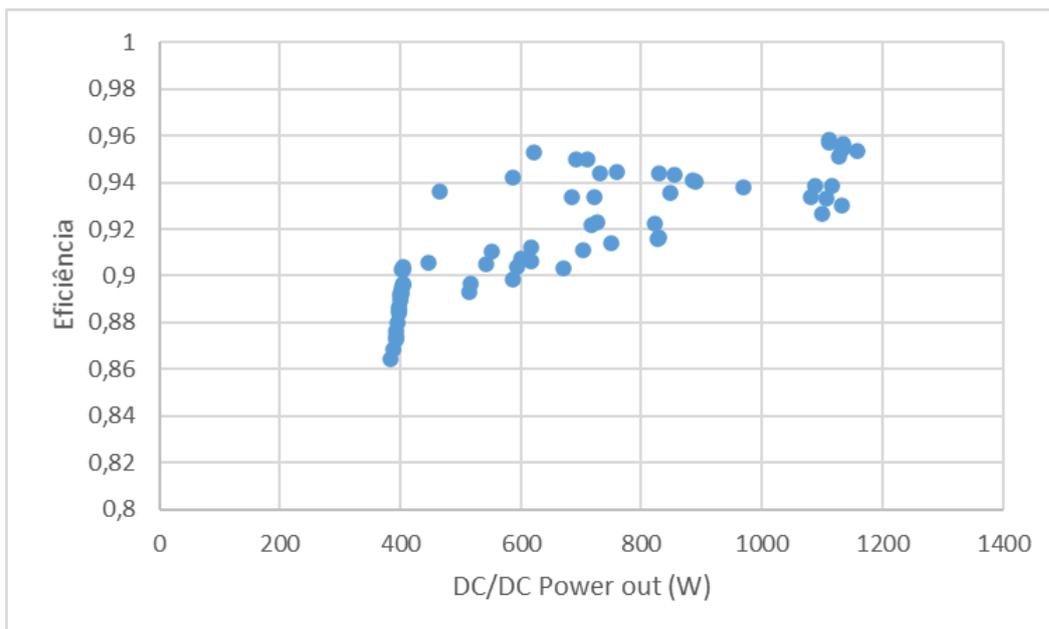


Figura 28 - Curva de eficiência do conversor CC/CC (Elaboração própria, 2021)

Como visto no manual do controlador de carga, Anexo IV, este diz que: a eficiência é $\geq 96,5\%$, $\leq 99\%$, olhando a Figura 25 com os dados obtidos no teste 5, o mesmo possui uma eficiência próxima a 100%. Os pontos fora são devidos alguns erros ocorridos durante o ensaio, os quais já foram solucionados. Onde os valores próximos de 100% são considerados.

Para calcular a eficiência do Célula Combustível, Tabela 7, fazendo um volume de controle, Figura 21.

100% da capacidade - Vazão de hidrogênio: 982,5 L/h

Dados de entrada:

- Hidrogênio:

$$v = 982,5 \text{ L/h} = \frac{982,5}{3600} = 0,27 \text{ L/s} \quad (26)$$

$$d_{H_2} = 9 \times 10^{-5} \text{ kg/L} \quad (27)$$

$$PCI_{H_2} = 120 \times 10^6 \text{ J/kg} \quad (28)$$

$$W_{q,H_2} = \dot{m}_{H_2} * PCI_{H_2} = (v * d) * PCI \quad (29)$$

$$W_{q,H_2} = (0,27 * 9 \times 10^{-5}) * 120 \times 10^6 \quad (30)$$

$$W_{q,H_2} = 2948 \text{ W} \quad (31)$$

- Potência que entra – $W_e = 110 \text{ W}$ (Em regime permanente)

Dados da saída:

- Potência que sai – $W_s = 1176 \text{ W}$

Rendimento da CaC a 100% de sua capacidade:

$$\eta_{CaC,100\%} = \frac{W_s - W_e}{W_{q,H_2}} = \frac{1176 - 110}{2948} = 36\% \quad (32)$$

90% da capacidade - Vazão de hidrogênio: 886,5 L/h

Dados de entrada:

- Hidrogênio:

$$v = 886,5 \text{ L/h} = \frac{886,5}{3600} = 0,25 \text{ L/s} \quad (33)$$

$$d_{H_2} = 9 \times 10^{-5} \text{ kg/L} \quad (34)$$

$$PCI_{H_2} = 120 \times 10^6 \text{ J/kg} \quad (35)$$

$$W_{q,H_2} = \dot{m}_{H_2} * PCI_{H_2} = (v * d) * PCI \quad (36)$$

$$W_{q,H_2} = (0,25 * 9 \times 10^{-5}) * 120 \times 10^6 \quad (37)$$

$$W_{q,H_2} = 2660 \text{ W} \quad (38)$$

- Potência que entra – $W_e = 110 \text{ W}$ (Em regime permanente)

Dados da saída:

- Potência que sai – $W_s = 1176 \text{ W}$

Rendimento da CaC a 100% de sua capacidade:

$$\eta_{CaC,100\%} = \frac{W_s - W_e}{W_{q,H_2}} = \frac{1176 - 110}{2660} = 37\% \quad (39)$$

Fazendo os mesmos cálculos para 80, 75 e 50%, obtém-se a Tabela 7.

Tabela 7 - Rendimentos da CaC (Elaboração própria, 2021)

CAPACIDADE	Ws (W)	vazão de H2 (L/h)	vazão de H2 (L/s)	We (W)	PCI H2	d H2	W H2	Rendimento
100%	1176	982,5	0,27	110	$120 \cdot 10^6$	$9 \cdot 10^{-5}$	2948	36%
90%	1085	886,5	0,25	110	$120 \cdot 10^6$	$9 \cdot 10^{-5}$	2660	37%
80%	993	789,4	0,22	110	$120 \cdot 10^6$	$9 \cdot 10^{-5}$	2368	37%
75%	926	759,4	0,21	110	$120 \cdot 10^6$	$9 \cdot 10^{-5}$	2278	36%
50%	773	604	0,17	110	$120 \cdot 10^6$	$9 \cdot 10^{-5}$	1812	37%

3.2.2. Reformador de Etanol

A caracterização do reformador foi feita pelo fabricante Helbio, utilizando Etanol 96⁰, uma vez que o mesmo fez testes utilizando o sistema integrado (Reformador + CaC). Foram utilizados os dados fornecidos pelo fabricante, uma vez que, os testes experimentais no laboratório LEV PUC-Rio com o reformador demandaram muito tempo, devido alguns erros de software e atualizações, ultrapassando o período de defesa desta dissertação. Onde, junto com o orientador e coorientador decidiu-se utilizar os dados enviados pela Helbio, uma vez que a mesma já os tinha realizados in loco. Como os dados da CaC enviados por esta foram validados nos testes experimentais, como mostrado no item acima, teve-se que os dados (CaC e reformador) enviados pelo fabricante eram confiáveis.

A GH2-BE-1000 é uma unidade protótipo utilizada para a produção de hidrogênio (> 70vol. % de pureza do hidrogênio) através da reforma a vapor de etanol (96⁰). Esta unidade é baseada sobre o processo de reforma a vapor de etanol (C₂H₅OH) para a produção de um gás mistura de hidrogênio e óxidos de carbono (CO_x).

Nos testes realizados pela Helbio, foi feito um volume de controle em volta do reformador, Figura 29, onde através de um balanço de energia obteve-se a curva de consumo. Sendo que ele possui como entradas: Etanol, água deionizada e nitrogênio, e como saída: gás reformado.

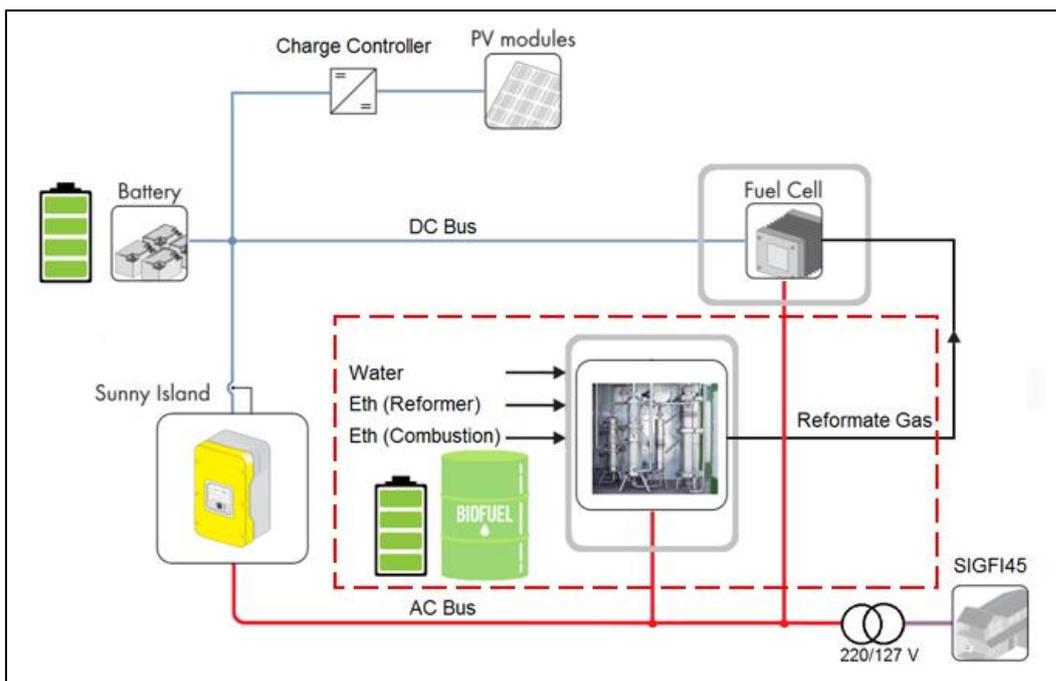


Figura 29 - Análise energética do reformador a vapor de etanol (Elaboração própria, 2021)

De acordo com o fabricante o consumo de etanol no reformador é em torno de 0,97 L/h, onde 0,64 L/h no lado da reforma (produção de gás reformado) e 0,33 L/h no lado da combustão.

Ainda segundo o fabricante, o sistema foi configurado para produzir 1,65 m³/h de gás reformado, sendo 1,20 m³/h de hidrogênio (em torno de 73% do gás reformado).

O gás reformado possui uma composição de: H₂: 70-73%, CH₄: 1-3%, CO: <3ppm (0,5-0,8%), CO₂: 23-24% (base seca). O reformador pode operar em 5 capacidades: 50%, 75%, 80%, 90% e 100% de sua capacidade nominal. Lembrando que inicialmente a unidade alcançará sua capacidade máxima de 100%, após isso, o usuário poderá selecionar a capacidade desejada.

O reformador possui três estágios: partida, produção (produção de gás reformado) e desligamento.

De acordo com os dados fornecidos pelo fabricante, verificou-se que o reformador levava cerca de, aproximadamente, três horas (3 h) para aquecer e começar a produzir gás reformado. Nesta primeira fase do processo, partida (etanol + nitrogênio), são utilizados o etanol no lado da combustão e na reforma, assim como o nitrogênio.

Durante a fase de produção (etanol + água deionizada), o etanol é consumido tanto para produzir o calor necessário para a reação de reformar a vapor, quanto para a produção do gás reformado, em conjunto com a água deionizada. Vale ressaltar que o usuário que define o tempo de produção.

Na última etapa, a etapa de desligamento (nitrogênio) do reformador, a qual leva cerca de vinte e dois minutos (22 min), apenas o nitrogênio é utilizado. Quando o sistema fica “inativo”, a alimentação de nitrogênio é finalizada.

O nitrogênio é alimentado nos reatores apenas durante as etapas de inicialização (aquecimento) e desligamento (resfriamento). A pressão do cilindro de nitrogênio é elevada, cheio chega a 200 bar (g) manométrico. Normalmente se utiliza um regulador de pressão para ajustar a pressão de nitrogênio na entrada dos equipamentos.

Durante as três etapas, que caracterizam um ciclo completo de operação, foi possível obter a curva de consumo do reformador, Figura 30.

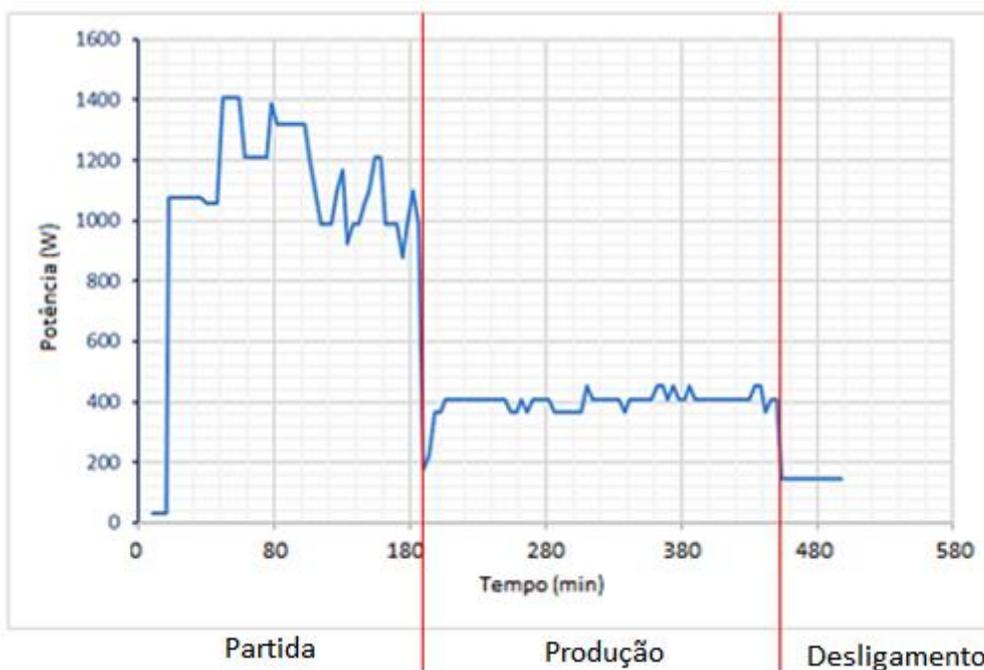


Figura 30 – Curva de consumo do reformador (Elaboração própria, 2021)

Assim como obteve-se a curva de consumo de energia (Wh) do reformador, visto na Figura 31.

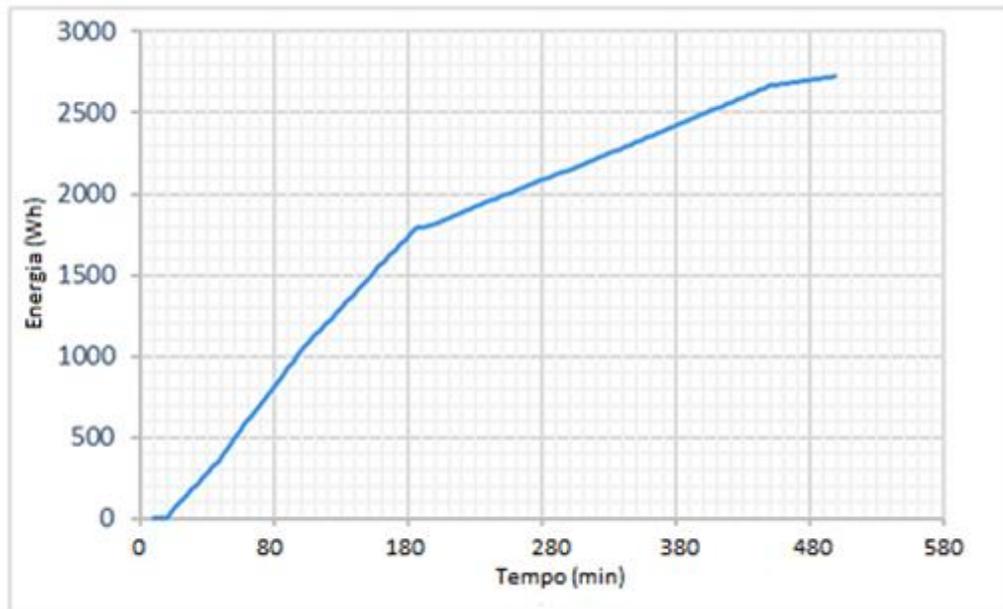


Figura 31 - Energia acumulada consumida no Reformador (Elaboração própria, 2021)

Para calcular a eficiência do Reformador, utiliza-se a fórmula da Figura 32, onde fez-se um volume de controle no mesmo.

Dados de entrada:

- Etanol

$$v = 0,97 \text{ L/h} = \frac{0,97}{3600} = 2,69 \times 10^{-4} \text{ L/s} \quad (40)$$

$$PCI_{etanol} = 27 \times 10^6 \text{ J/kg} \quad (41)$$

$$d = 0,789 \text{ kg/L} \quad (42)$$

$$W_{q,etanol} = \dot{m}_{etanol} * PCI_{etanol} = (v * d) * PCI \quad (43)$$

$$W_{q,etanol} = (2,69 \times 10^{-4} * 0,789) * 27 \times 10^6 \quad (44)$$

$$W_{q,etanol} = 5740 \text{ W} \quad (45)$$

- Potência que entra – $W_e = 409 \text{ W}$ (Em regime permanente)

Dados de saída:

- Gás reformado (Considerando apenas o Hidrogênio para simplificação dos cálculos):

$$v = 1,20 \frac{m^3}{h} = \frac{1,20}{3600} * 1000 = 0,33 \text{ L/s} \quad (46)$$

$$PCI_{H_2} = 120 \times 10^6 \text{ J/kg} \quad (47)$$

$$d = 9 \times 10^{-5} \text{ kg/L} \quad (48)$$

$$W_{q,H_2} = \dot{m}_{H_2} * PCI_{H_2} = (v * d) * PCI \quad (49)$$

$$W_{q,H_2} = (0,33 * 9 \times 10^{-5}) * 120 \times 10^6 \quad (50)$$

$$W_{q,H_2} = 3600 \text{ W} \quad (51)$$

- Rendimento do Reformador:

$$\eta_{Reformador} = \frac{W_{q,H_2}}{W_{q,etanol} + W_e} = \frac{3600}{5740 + 409} = 59\% \quad (52)$$

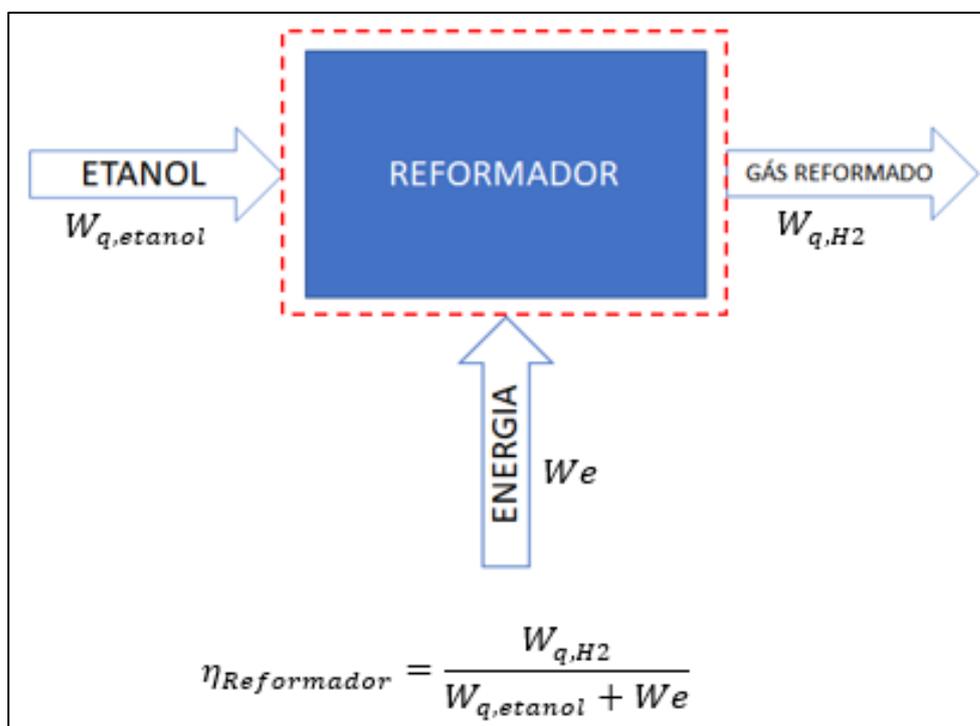


Figura 32 - Volume de controle no Reformador (Elaboração própria, 2021)

3.2.3. Sistema Integrado = Reformador de Etanol + CaC

Utilizando os dados obtidos pela Helbio e os dados experimentais, foi feita a integração do sistema (reformador + CaC) utilizando o Excel. Onde as curvas de potência e de consumo de energia, podem ser vistas, respectivamente, nas Figuras 33 e 34.

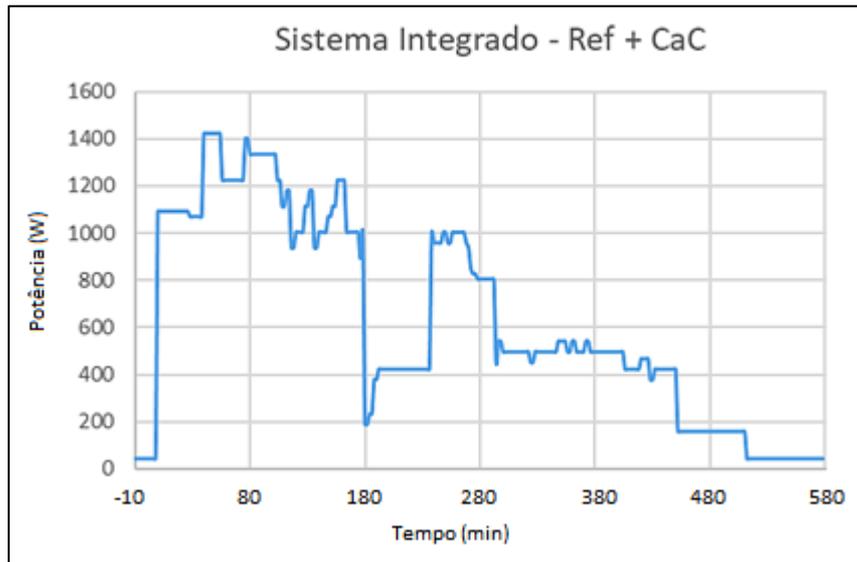


Figura 33 - Curva de consumo do Sistema Integrado (W) (Elaboração própria, 2021)

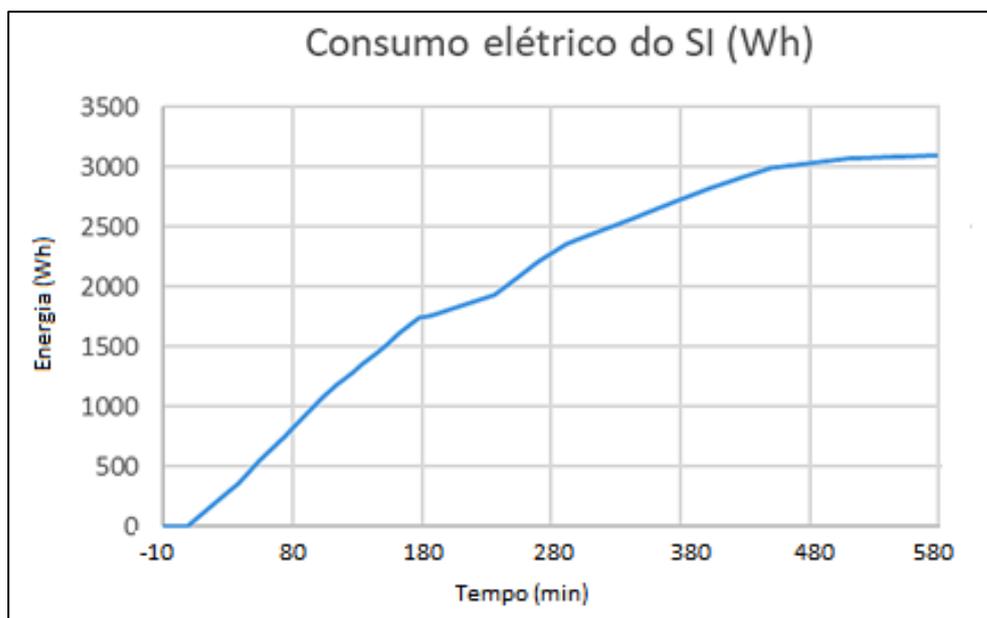


Figura 34 - Consumo elétrico do Sistema Integrado (Wh) (Elaboração própria, 2021)

Olhando a Figura 34, observa-se um consumo elétrico do Sistema Integrado é em torno de 3000 Wh. Uma vez que o banco de baterias do Sistema de geração isolada de energia consegue armazenar ≈ 4500 Wh, com SOC = 100%, e o consumidor SIGFI45 utiliza um consumo diário de 1500 Wh, totalizando no sistema 4500 Wh, “esgotando” o mesmo, conclui-se que é necessário a duplicação da capacidade de armazenamento do banco de baterias, garantindo assim um sistema confiável ao consumidor.

3.2.4. Inversor

A caracterização do inversor foi feita no Projeto CaCRefEtOH. Em que foi medido a potência de entrada no inversor e a potência fornecida pelo inversor durante os ensaios (Silva, 2017).

A potência de entrada é calculada pela eq. (53).

$$P_{inv} = V \cdot I_{inv} \quad (53)$$

Onde I_{inv} é a corrente que entra no inversor, medida pelo transdutor de corrente (TC) e V é a tensão no barramento CC. A potência que sai do inversor corresponde ao consumo elétrico durante os ensaios. Onde este é medido pelo analisador de energia PEM53, do fabricante Bender (Silva, 2017).

A eficiência do inversor é variável e depende da carga que será alimentada. A eq. (54) é válida para cargas baixas, até 460 W e a eq. (55) é válida para cargas altas, ou seja, a partir de 461 W.

$$\eta_{inv} = -534,18 \left(\frac{P_{ot}}{2300} \right)^2 + 199,28 \left(\frac{P_{ot}}{2300} \right) + 76,098 - \text{até } 460 \text{ W} \quad (54)$$

$$\eta_{inv} = -2,4918 \left(\frac{P_{ot}}{2300} \right)^2 + 07536 \left(\frac{P_{ot}}{2300} \right) + 94,795 - \text{a partir de } 461 \text{ W} \quad (55)$$

Onde P_{ot} é a potência na saída do inversor, dada pela eq. (33), onde $P_{otSIGFI45}$ é carga do perfil SIGFI 45, P_{otSI} é a carga do sistema integrado (Reformador + CaC) e η_{inv} é a eficiência do inversor.

$$P_{ot} = \frac{P_{otSIGFI45} + P_{otSI}}{\eta_{inv}} \quad (56)$$

A Figura 35 apresenta as duas equações para cálculo da eficiência do inversor.

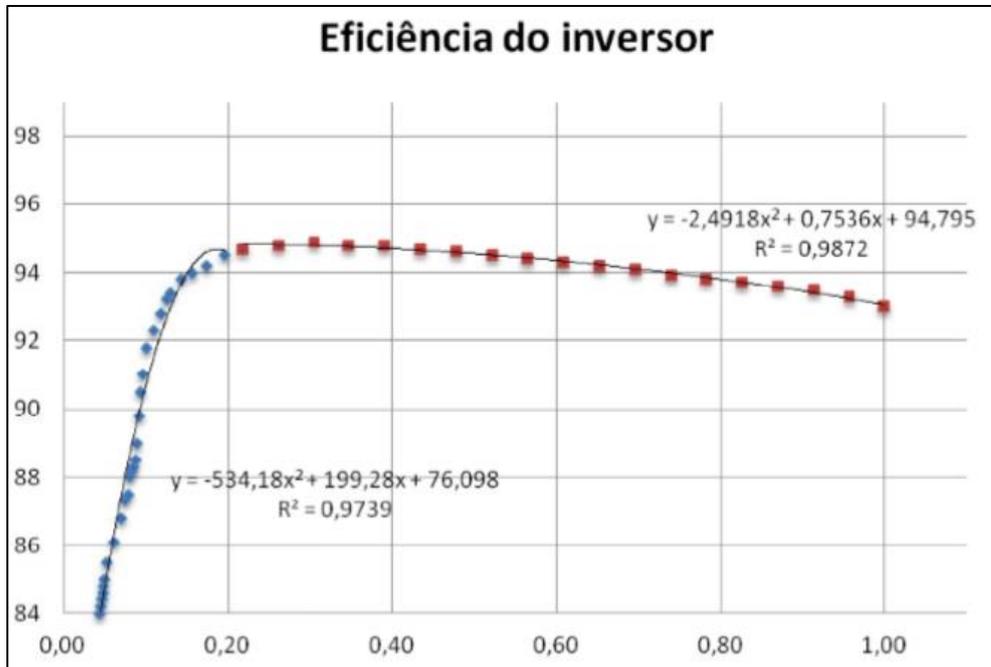


Figura 35 - Eficiência do Inversor (Silva, 2017)

Analisando o inversor, suas entradas são a energia armazenada na bateria e a energia fornecida pela CaC e possui como saída a energia para alimentar as cargas do sistema. O inversor de frequência possui eficiência variável em função da carga total, como visto nas eq. (54) e (55).

Para melhores informações sobre a caracterização do inversor, consultar o trabalho de Silva (2017).

3.2.5. Baterias

A baterias teve como base o input do trabalho de Jackey (2007), o qual propõe um processo simples e eficaz de modelagem de baterias de chumbo-ácido.

A Figura 36 traz o modelo da bateria, onde neste modelo calculou-se as resistências internas da bateria (R_0 , R_1 e R_2).

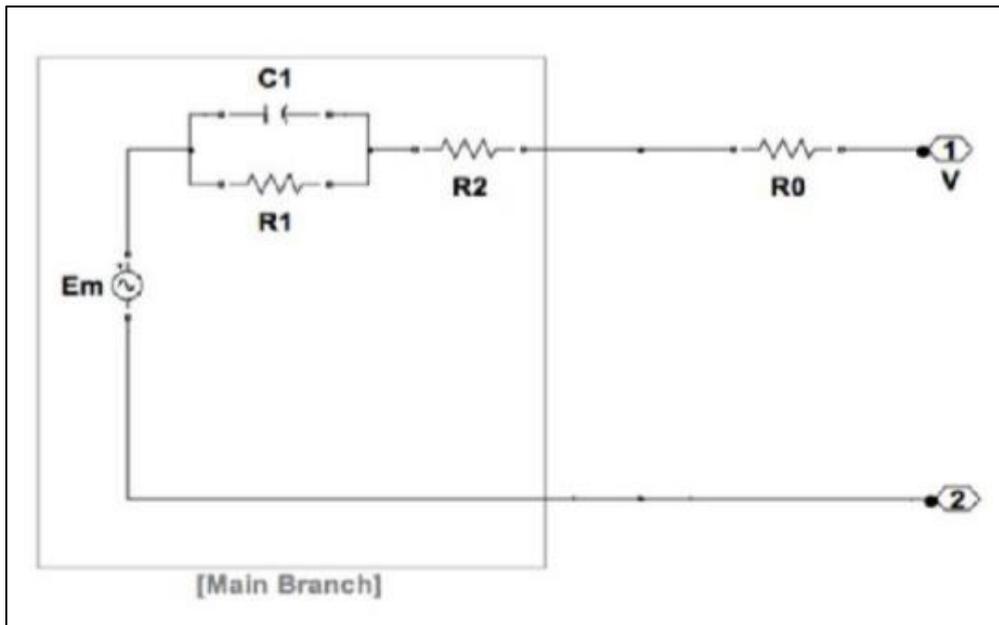


Figura 36 - Modelagem da bateria (Silva, 2017)

O estado de carga (SOC) da bateria é dada pela eq. (57).

$$SOC = 1 - \frac{Q_e}{C(0, \theta)} \quad (57)$$

Onde Q_e é a carga extraída da bateria (A.s) e C é a capacidade da bateria (A.s).

A Carga extraída da bateria (Q_e), eq. (58), é uma simples integração da corrente que entra ou sai do Main Branch (Ramo principal), visto na Figura 36.

$$Q_e(t) = Q_{e_{ini}} + \int_0^t -I_m(\tau) d\tau \quad (58)$$

Onde Q_{e_0} é a carga inicial extraída (A.s), t é o tempo da simulação, τ é a variável tempo de integração e I_m é a corrente do Main Branch (Ramo principal).

A capacidade da bateria C é dada pela eq. (59).

$$C(I, \theta) = \frac{K_c \cdot C_{ini}^* \cdot K_t}{1 + (K_c - 1)(I/I^*)^\delta} \quad (59)$$

Onde K_c é uma constante, C_{ini}^* é a capacidade da bateria sem carga a 0 °C (A.s), K_t é uma constante (tabelado e depende da temperatura), I é a corrente de

descarga (A), I^* é a corrente nominal da bateria (A) e δ é uma constante. Visto que θ é a temperatura do eletrolítico ($^{\circ}C$), onde foi considerada constante em $25^{\circ}C$.

Utiliza-se o $C(0, \theta)$, logo substituindo este na eq. (59), obtém-se a eq. (60).

$$C(0, \theta) = K_c \cdot C_{ini}^* \cdot K_t \quad (60)$$

Assim, a carga extraída da bateria ($Q_{e_{ini}}$), vista nas eq. (61) e (62), e o estado de carga da bateria SOC_{ini} , são as condições iniciais, ou seja, antes do ensaio começar.

$$Q_{e_{ini}} = (1 - SOC_{ini}) \cdot (K_c \cdot C_{ini}^* \cdot K_t) \quad (61)$$

$$Q_{e_{t+1}} = Q_{e_{ini}} - I_t \cdot \Delta t \quad (62)$$

Para calcular as Resistências (R_0 , R_1 e R_2) (em Ohms), utilizou-se as eq. (63), (64) e (65).

$$R_0 = R_{00}[1 + A_0(1 - SOC)] \quad (63)$$

$$R_1 = -R_{10} \cdot \ln(DOC) \quad (64)$$

$$R_2 = R_{20} \frac{\exp[A_{21}(1 - SOC)]}{1 + \exp(A_{22} \cdot I_m/I^*)} \quad (65)$$

Onde R_{00} é o valor de R_0 para um estado de carga de 100%; A_0 , A_{21} e A_{22} são constantes; e, R_{10} e R_{20} são constantes (Ω).

Para o cálculo de R_1 , precisa antes calcular o DOC, ou seja, a profundidade de carga, para isso utiliza-se as eq. (66) e (67).

$$DOC = 1 - \frac{Q_e}{C(I_{avg}, \theta)} \quad (66)$$

$$C(I_{avg}, \theta) = \frac{K_c \cdot C_{ini}^* \cdot K_t}{1 + (K_c - 1)(I_{avg}/I^*)^\delta} \quad (67)$$

Onde, I_{avg} é a corrente de descarga média, dada pela eq. (68).

$$I_{avg} = \frac{I_m}{(\tau_1 s + 1)} \quad (68)$$

Sendo τ_1 a constante do tempo no ramo principal em segundos.

A capacitância (Farads) do ramo principal é dada pela eq. (69).

$$C_1 = \tau_1 / R_1 \quad (69)$$

A tensão foi calculada pelas eq. (70) e (71).

$$E_m = E_{mo} - K_e(273 + \theta)(1 - SOC) \quad (70)$$

$$V = N_B \cdot N_C \cdot [E_m + (R_0 + R_1 + R_2) \cdot I] \quad (71)$$

Onde E_{mo} é a tensão do circuito aberto da bateria com carga total (V), K_e é uma constante (V/°C) e θ é a temperatura do eletrolítico (°C) e SOC o estado de carga da bateria. N_B é o número de baterias que compoem o banco de baterias (neste projeto $N_B = 4$), N_C é o número de células em cada bateria (neste projeto $N_C = 6$ células).

3.2.6. Painéis Fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos possuem a função de alimentar as cargas do sistema e/ou carregar as baterias. A potência de entrada dos painéis é calculada a partir de dados reais de painéis similares aos utilizados neste projeto. No simulador é possível ter como entradas três dias típicos diferentes: dia sem nuvens (ensolarado), dia parcialmente nublado e dia nublado, como mostra na Figura 37.

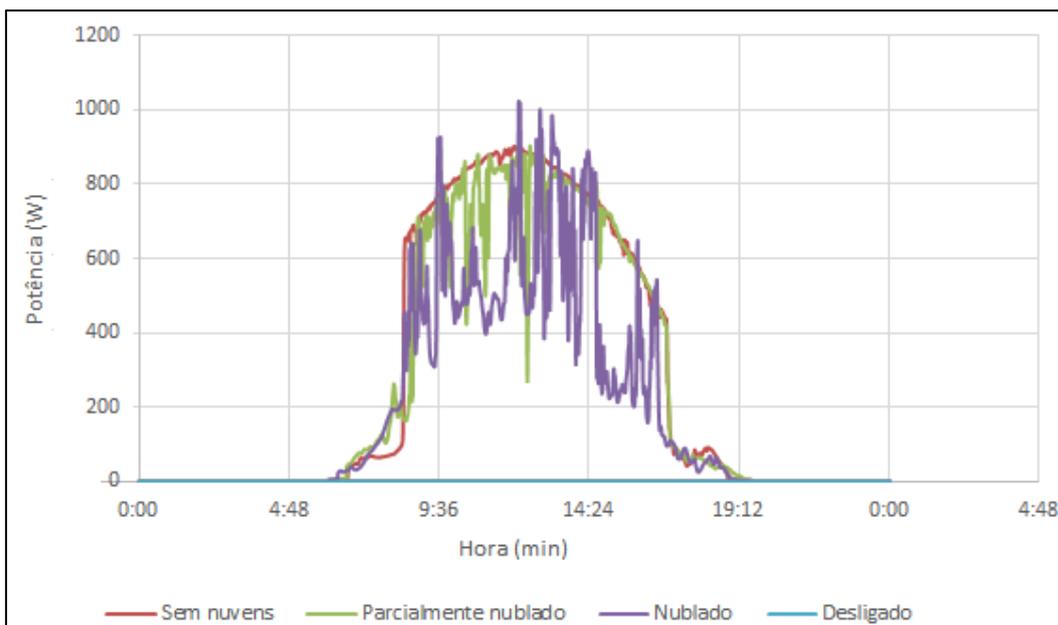


Figura 37 - Potência fornecida pelos painéis fotovoltaicos (Silva, 2017)

3.3. Simulação numérica

Após feita a caracterização energética dos equipamentos do Sistema isolado de geração de energia elétrica, foi possível construir o programa computacional em VBA (*Visual Basic for Application*). O Simulador foi construído no software ExcelTM, onde o arquivo encontra-se gravado no CD.

Para construir o Simulador, primeiro definiu-se as fontes de energia, sendo elas: painéis fotovoltaicos e a célula combustível. Onde o banco de baterias são armazenamento. E depois, quais eram as cargas do sistema: consumidor de energia representado pelo perfil de carga SIGFI 45, sistema integrado (o qual se comporta como carga durante a partida do reformador e da CaC) e os equipamentos periféricos.

Neste projeto, foi chamado de Sistema Integrado o Reformador + Célula a combustível. Primeiro, liga o Reformador e logo em seguida liga a CaC. O Reformador processa o combustível Etanol, para produção de gás reformado (gás reformado é composto, principalmente, por hidrogênio e óxidos de carbono, além do metano em baixas porcentagens). E este é utilizado para alimentar a CaC, a qual transforma a energia química diretamente em energia elétrica. Visto que os dois não funcionam separadamente, uma vez que não existe armazenamento e compressor, como no projeto CaCRefEtOH (Silva, 2017).

No Capítulo 4 foram apresentados os modelos matemáticos e a caracterização dos componentes do Sistema deste trabalho. Este sistema é composto por um conjunto de Equações Diferenciais Ordinárias (EDO) de primeira ordem, as quais são resolvidas por um método numérico. Na solução numérica os princípios de conservação de energia, massa e carga elétrica são atendidos.

A Figura 38 traz o circuito equivalente, de forma simplificada, do sistema isolado de geração de energia elétrica, o qual é utilizado para calcular as grandezas elétricas de cada componente. Para resolver este problema foram utilizadas a primeira e a segunda leis de Kirchhoff.

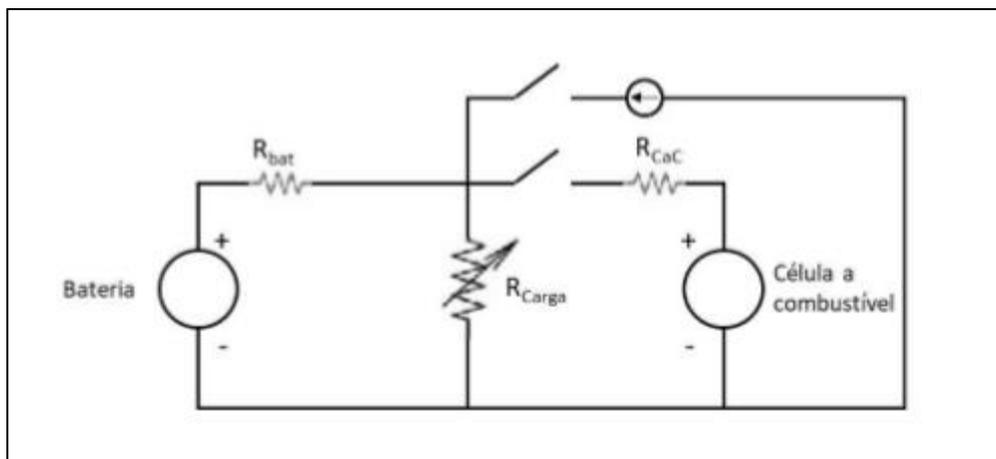


Figura 38 - Circuito elétrico equivalente do sistema híbrido de geração de energia elétrica (Silva, 2017)

A 1ª lei de Kirchhoff, também conhecida como lei dos “nós” ou Lei de Kirchhoff para as correntes (LKC), afirma que a soma das correntes que entram em um “nó” é igual a soma das correntes que saem deste mesmo “nó”, como consequência da conservação da carga elétrica, ou seja, a soma algébrica das cargas existentes em um sistema fechado permanece constante.

A 2ª lei de Kirchhoff, também conhecida como lei das malhas ou Lei de Kirchhoff para as tensões (LKT), afirma que ao percorrer uma malha por um determinado sentido, partindo e chegando em um mesmo ponto, a soma das tensões é zero, como consequência o princípio da conservação de energia.

Para resolver as Equações Diferenciais Ordinárias (EDO) de primeira ordem utilizou-se o Método de Euler (Runge-Kutta de primeira ordem), onde estes encontram uma solução numérica para uma EDO com uma condição inicial. (Silva, 2017)

Para resolver a corrente da bateria, utilizou-se o método de Newton-Raphson. Um método iterativo que possui como objetivo estimar as raízes de uma função. Primeiro escolhe-se um valor inicial para a raiz, depois a derivada da função é calculada neste ponto e a sua interseção com o eixo das abscissas, para que se encontre uma melhor raiz. Este processo ocorre até que se chegue a uma raiz ideal; este método pode ser representado pela eq. (72) (Silva, 2017).

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}, n \in \mathbb{N} \quad (72)$$

4. Resultados e discussões

4.1. Validação do simulador

Com o objetivo de validação do simulador foi feito uma comparação entre os resultados simulados e os experimentais.

Os dados de entrada do simulador são:

- Estado de carga inicial ($SOC_{inicial}$ - %);
- A condição dos painéis fotovoltaicos – Status PV (Nublado, parcialmente dublado, sem nuvens ou Painel Desligado);
- Status do Sistema Integrado (ligado / desligado);
- Definição do tempo de produção do Sistema Integrado (horas:minutos), uma vez que, quem determina o tempo de produção é o usuário;
- Número de bancos de baterias;
- Número de painéis fotovoltaicos.
- Número de SIGFI's.

A Figura 39, traz como esses dados de entrada são inseridos no simulador:

DADOS DE ENTRADA	
nº de SIGFI's	
nº de banco de Baterias	
SOC inicial	
SOC final	
Sistema Integrado (Reformador + CaC)	
Horário que liga o SI	
Status SI	
Reformador	
Status Reformador	
Tempo de produção	
Consumo elétrico durante a produção	
Célula a Combustível - CaC	
Status CaC	
Horário que liga a CaC	
Consumo elétrico durante a produção	
Painel Fotovoltaico	
Status	
nº de PV	
Inversor	
nº de inversores	
LEGENDA:	
	EDITÁVEIS

Figura 39 - Dados de entrada (Elaboração própria, 2021)

Na Figura 39, os dados em alaranjado são os dados de entrada (dados editáveis) e os em branco são resultados.

Para otimização do simulador o sistema integrado está separado em Célula combustível e em Reformador, onde para a CaC ligar ela depende do Reformador primeiro gerar gás reformado. Logo, liga-se o reformador e após 3 horas liga-se a CaC. Pois o reformador demora em torno de três horas para esquentar e começar a produzir gás reformado.

Para validação do simulador o reformador e da CaC foram analisados separadamente, e depois foram integrados. Já que os dados dos dois foram aprovados.

O dado de saída que foi analisado, para validação do simulador, para efeito de comparação com os dados experimentais, é os dados registrados pelo inversor, o Estado de Carga da bateria, o SOC.

4.1.1. Caso Valid1

No Caso Valid1 utiliza-se apenas a bateria e a CaC, com H₂ puro, para fornecer energia para alimentar uma carga de 1000 W. O H₂ está armazenado em cilindros.

A simulação utiliza como parâmetros o teste experimental realizado no dia 01/06/2020 (chamado de teste 4), o teste começou as 07:36. O estado de carga (SOC) inicial era de 94%, e o reformador e os painéis PV estavam desconectados do sistema.

Na Tabela 8 estão os dados de entrada e o dado de saída obtido na simulação, e na Figura 40 é possível observar a comparação entre o SOC_{simulado} x SOC_{experimental}.

Neste teste foram feitas modificações da capacidade da CaC, onde iniciou com 100% e fez-se mudanças para 90, 80 e 50% da sua capacidade.

Tabela 8 - Dados de entrada e saída do Caso Valid 1 (Elaboração própria, 2021)

DADOS DE ENTRADA	PARÂMETROS
Horário de início do teste	07:36:00
Horário que liga a CaC	07:36:00
SOC inicial	94%
Status PV	Desligado
Status CaC	Ligada
Tempo de produção da CaC	00:32:00
Condição PV	Desligado
DADO DE SAÍDA	
SOC final	52%

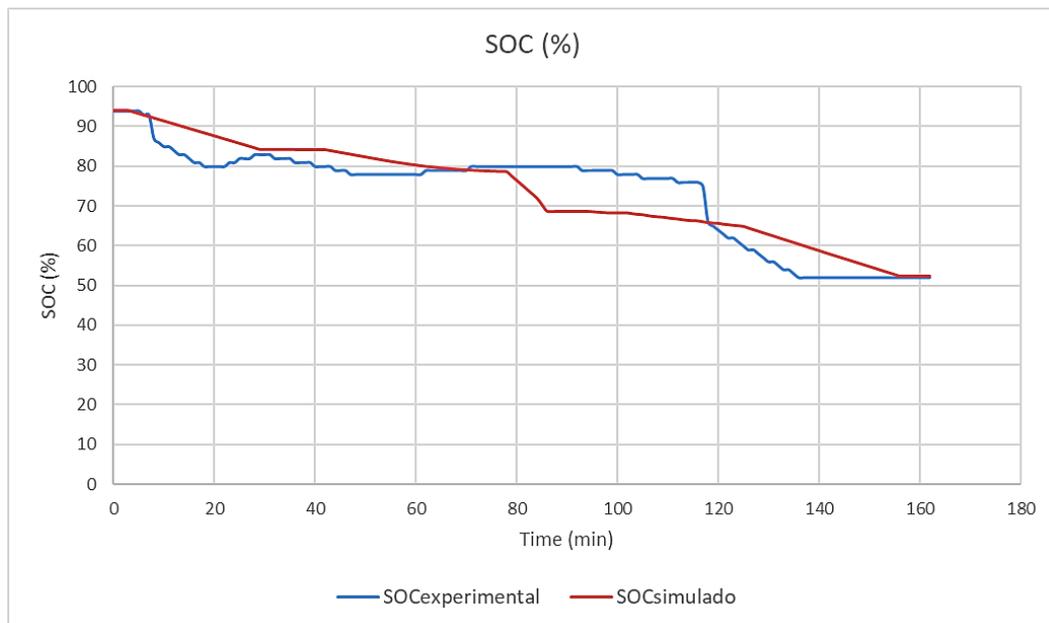


Figura 40 - Comparação entre o SOC experimental e o simulado para o Caso/Validação 1 (Elaboração própria, 2021)

A Figura 40 mostra um resultado aceitável, uma vez que as diferenças se dão pelo fato de se utilizar no simulador o modelo de Jackey, para baterias, um modelo simplificado, uma vez que o modelo não utiliza o momento de carga da bateria. Os dados experimentais foram $SOC_{inicial} = 94\%$ e $SOC_{final} = 52\%$, que são os mesmos que os dados simulados, como visto na Tabela 8.

4.1.2. Caso Valid2

No Caso/Validação 1 utiliza-se apenas a bateria e a CaC, com H_2 puro, para fornecer energia para alimentar uma carga de 1000 W. O H_2 está armazenado em cilindros e sua vazão é controlada de acordo com a capacidade da CaC.

A simulação utiliza como parâmetros o teste experimental realizado no dia 03/06/2020 (chamado de teste 5), o teste começou as 07:40. O estado de carga (SOC) inicial era de 94%, e o reformador e os painéis PV estavam desconectados do sistema.

Na Tabela 9, estão os dados de entrada e o dado de saída obtido na simulação, e, na Figura 41, é possível observar a comparação entre o $SOC_{simulado}$ x $SOC_{experimental}$.

Neste teste foram feitas modificações da capacidade da CaC, onde iniciou com 100% e fez-se mudanças para 90, 80, 75 e 50% da sua capacidade.

Tabela 9 - Dados de entrada e saída do Caso Valid2

DADOS DE ENTRADA	PARÂMETROS
Horário de início do teste	7:40
Horário que liga a CaC	7:40
SOC inicial	94%
Status PV	Desligado
Status CaC	Ligada
Tempo de produção da CaC	01:20
Condição PV	Desligado
DADO DE SAÍDA	
SOC final	75%

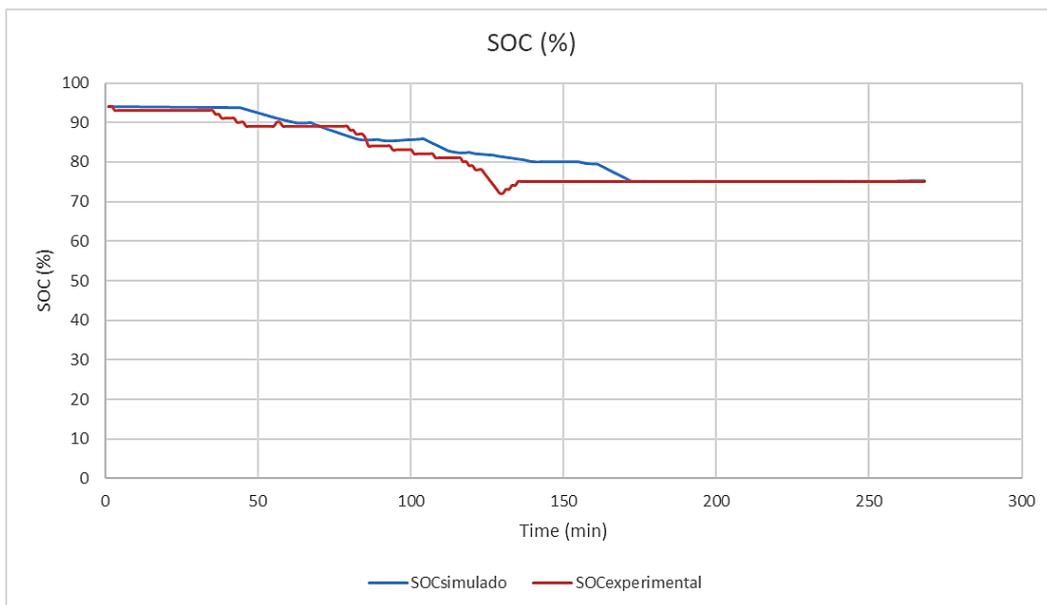


Figura 41 - Comparação entre o SOC experimental e o simulado para o Caso Valid2 (Elaboração própria, 2021)

A Figura 41 mostra um resultado aceitável, uma vez que as diferenças se dão pelo fato de se utilizar no simulador o modelo de Jackey, para baterias, mostrado no subitem 4.5, sendo que os dados experimentais foram $SOC_{inicial} = 94\%$ e $SOC_{final} = 75\%$, que são os mesmos que os dados simulados, como visto na Tabela 8.

4.1.3. Conclusões parciais

Os dados simulados em relação a Célula combustível são aceitáveis, uma vez que estão bem próximos dos dados reais (experimentais). Como é utilizado um modelo matemático isso explica as pequenas diferenças, devido as simplificações adotadas.

Os dados do reformador não foram possíveis de serem feitos experimentalmente, devido a problemas adversos encontrados durante os testes. Assim como a Pandemia de corona vírus que dominou o mundo, impedindo que os fabricantes pudessem vir ao laboratório para consertar o equipamento e realizar os testes. Logo, optou-se por utilizar os dados fornecidos pelo fabricante e considerá-los validados.

No simulador o sistema integrado - SI (CaC + Reformador) é analisado separadamente, para que se possa analisar cada item separadamente. Analisando os dados fornecidos pelo fabricante sobre o SI, reformador liga e após seu aquecimento, em torno de 3 horas, ele começa a produzir gás reformado, ligando a CaC, onde esta

4.2. Comportamento do sistema a partir de casos simulados

Depois de feita a validação do simulador foram feitas simulações com alguns parâmetros pré-estabelecidos para analisar o comportamento do sistema.

Para as simulações foi feito algumas considerações, como:

- o sistema integrado (SI) está ligado *full time*, logo não importa o horário que se inicia o teste, onde, considerou nas simulações o sistema e o SI sempre estará como 00:00;
- Quando você liga o SI as cargas SIGFI45 não podem estar ligadas, ou seja, durante a partida só tem cargas do SI.

Para analisar a eficácia do sistema, deve-se levar em consideração dois requisitos. Onde, o primeiro requisito, de acordo com a Resolução Normativa 493, de 5 de junho de 2012, da ANEEL, o sistema deve possuir uma autonomia mínima de 2 dias (48 horas). Ou seja, se o sistema não estiver com o sistema integrado (CaC + Reformador) e o painel fotovoltaico ligados, ele deve garantir as 48 horas somente

com o banco de baterias. E, o segundo requisito, deve ser levado em consideração, onde o SOC_{final} possui um limite de 40%, pois abaixo desse valor o inversor desarma, desligando todo o sistema.

4.2.1.

Caso I – Autonomia do banco de baterias

No Caso I, Figura 42, mostra a variação do SOC de um sistema convencional com os seguintes dados de entrada:

- SOC inicial = 95%
- N° de SIGFI45 = 1
- N° de banco de baterias = 1 (7,4 kWh C100)
- N° de módulos fotovoltaicos 780 Wp: 3 (Nublado)

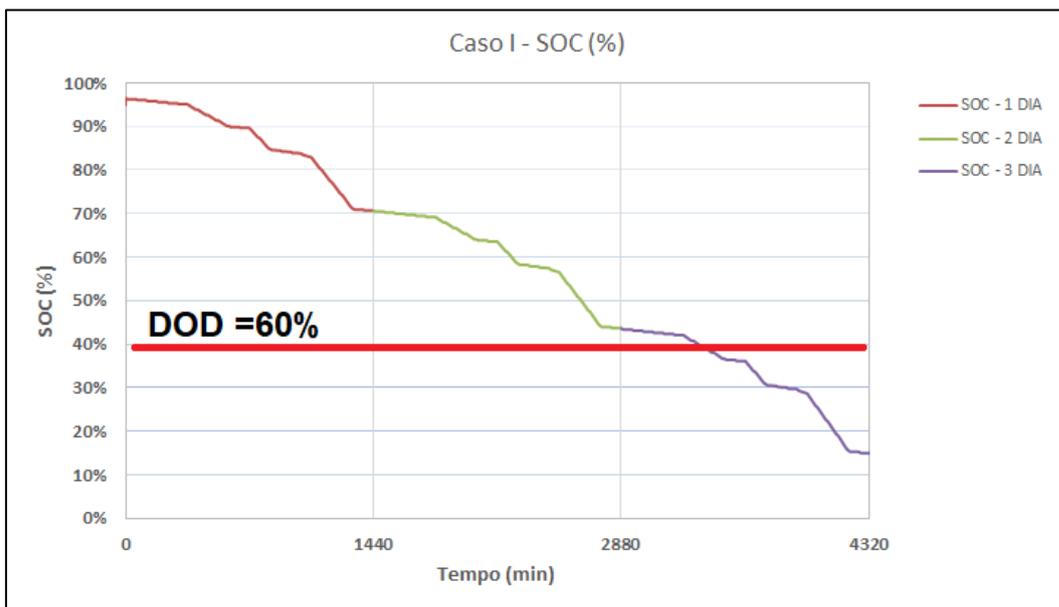


Figura 42 - Variação do SOC (Elaboração própria, 2021)

Analisando a Figura 42, mostra-se a variação do SOC de um sistema convencional SIGFI45 que requer 3 módulos fotovoltaicos de 780 Wp, um banco de baterias de 7,4 kWh C100. Com o banco de baterias com SOC=95%, atenderia 2 dias no caso de dias completamente nublados.

A Figura 43, mostra a variação do estado de carga do banco de baterias do sistema SIGFI45 com os módulos fotovoltaicos ligados em dias nublados. Esta

configuração apresentada no documento da Eletrobras, atende plenamente a um usuário SIGFI45 e poderia se dizer que está ligeiramente superdimensionada.

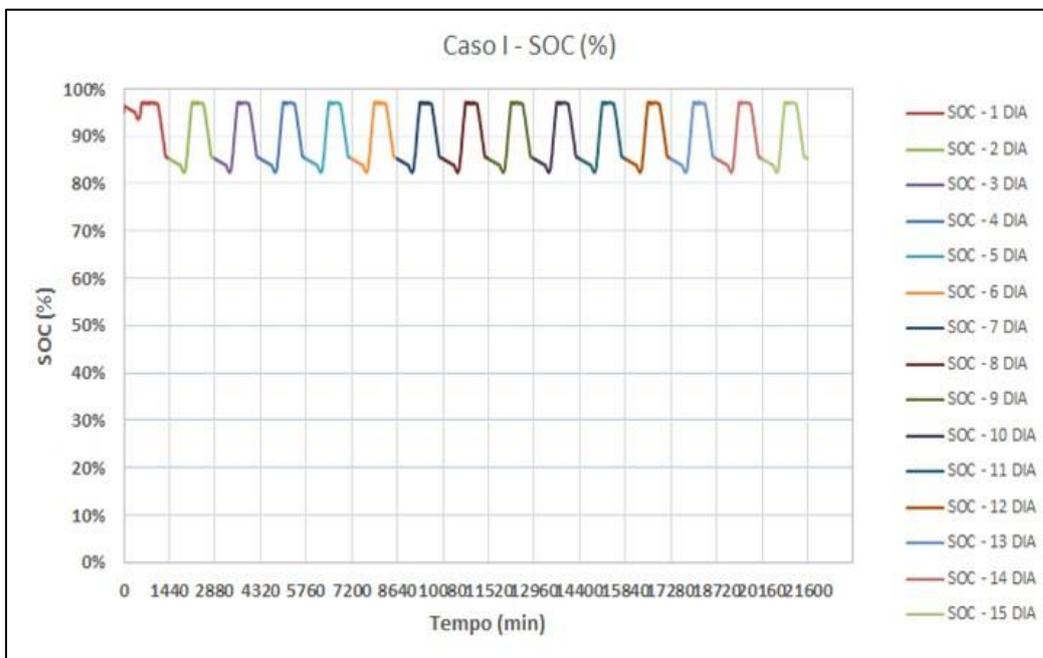


Figura 43 - Variação do SOC em 15 dias (Elaboração própria, 2021)

4.2.2. Caso II – SIGFI45 com sistema integrado

No Caso II, Figura 44, foi simulado os seguintes dados de entrada, utilizando o sistema integrado SOC inicial = 100% e N° de SIGFI'S45 = 1.

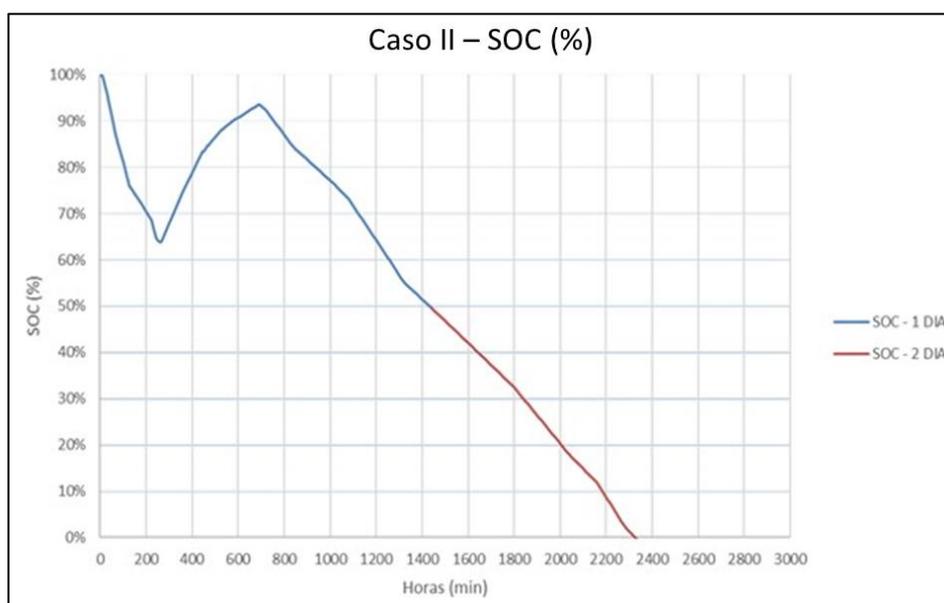


Figura 44 – Caso II - Variação do SOC (Elaboração própria, 2021)

Se for utilizado um sistema integrado, a Figura 44, mostra a variação do SOC. Pode-se observar que afeta negativamente. O sistema com o sistema integrado resulta tecnicamente inviável devido à ausência de armazenamento de energia. No sistema proposto inicialmente, o sistema tinha tanques de armazenamento de gás reformado de reduzida pressão. Este armazenamento de gás sugerido, foi retirado a pedido da Helbio.

Quando o estado de carga está reduzido é possível injetar certa máxima potência, mas, quando o SOC aumenta a potência de carregamento é menor, devido a que a voltagem do barramento CC não pode ultrapassar um determinado valor. Para não ultrapassar esse valor, a potência que pode ser injetada é cada vez menor.

4.2.3.

Caso III – Determinação do máximo número de usuários SIGFI45

O Caso III o Sistema Integrado (SI) na capacidade de 100% fornece aproximadamente 14 kWh de energia elétrica em corrente contínua no sistema. Na Figura 45, mostra: o consumo de energia de várias cargas SIGFI45 ligadas no barramento de corrente alternada do sistema, e mostra a energia fornecida pelo SI.

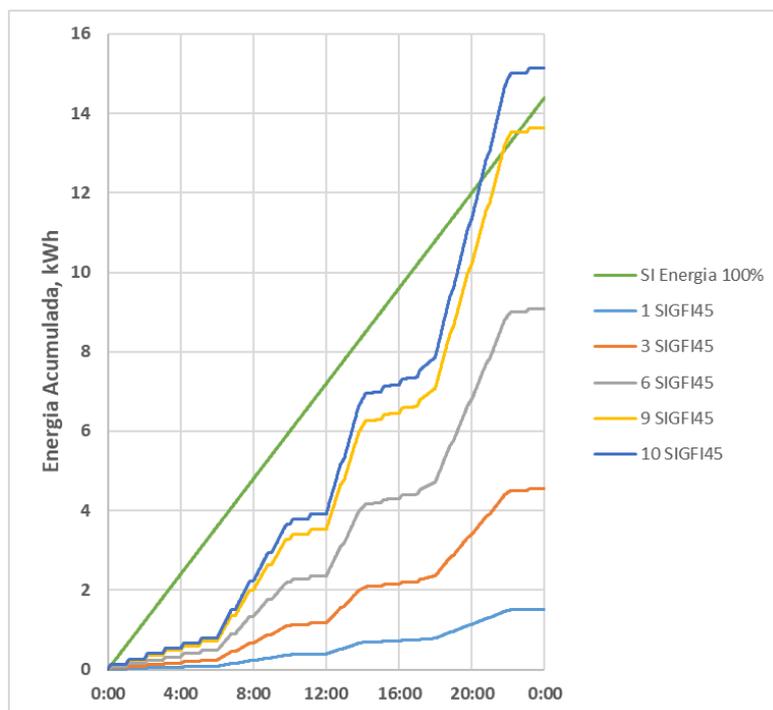


Figura 45 - Caso III (Elaboração própria, 2021)

Como pode-se observar na Figura 45, o Sistema Integrado poderia atender 9 SIGFI45 ligados no sistema.

4.3.

Determinação do mínimo número de bancos de baterias

De acordo com o artigo 5º da Resolução Normativa Nº 493 de 05 de junho de 2017 da ANEEL, os critérios escolhidos para a dimensionamento do SIGFI foram:

- Barramento de corrente contínua;
- Banco de baterias OPzS de 12V ou 24 V;
- Um inversor formador de rede; e
- Painéis fotovoltaicos conectados no barramento CC (tensão de 12V ou 24V) através de um controlador de carga.

O dimensionamento dos sistemas SIGFI com controladores MPPT é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Especificações para SIGFI com controlador MPPT (ANEEL, 2012)

Equipamento	Valor Mínimo Especificado		
	SIGFI45	SIGFI60	SIGFI80
Gerador Fotovoltaico	780 Wp	1.040 Wp	1.390 Wp
Banco de Baterias (DOD=60%)	7,5 kWh (C100) x 0,90 C20 x 0,80 C10	10,0 kWh (C100) x 0,90 C20 x 0,80 C10	13,2 kWh (C100) x 0,90 C20 x 0,80 C10
Controlador de Carga	$I = n^{\circ} \text{módulos} \parallel \times I_{SC} \times 1,10$		
Inversor Formador de Rede	700 W (30 min)	1.000 W (30 min)	1.250 W (30 min)

* De acordo com a configuração e as especificações dos painéis FV.

A capacidade do banco de baterias foi modificada no simulador deste trabalho. Na Tabela 10, a capacidade de um sistema SIGFI45 é 7,5 kWh C100 e DOD=60%. A capacidade do banco do sistema Guascor é menor, 4,8 kWh, e essa capacidade está definida no simulador dos trabalhos passados.

O cálculo da capacidade do banco de baterias de SIGFI conforme a seguinte equação (ANEEL, 2012):

$$Capacidade \text{ (kWh)} = \frac{Armazenamento_{CC} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{dia}} \right) \cdot Autonomia(\text{dias})}{DOD_{Max} \cdot Capacidade_{EOL}} \quad (73)$$

Onde:

$DOD_{m\acute{a}x}$ - Profundidade de Descarga Máxima para proteger o banco de baterias de descarga profunda. O valor adotado será de 0,6 (ou 60%) para todos os sistemas.

$Capacidade_{EOL}$ - O fim da vida útil (End-of-Life) de uma bateria é definido quando a capacidade da bateria  80% da capacidade nominal. Foi estabelecido o parâmetro $Capacidade_{EOL}$ igual a 0,9 que implica que o banco de baterias estará superdimensionado em cerca de 10% após instalação e subdimensionado em cerca de 10% no final da sua vida útil.

Com o SI na capacidade de 100%, a área em verde na Figura 46 representa o armazenamento necessário nos bancos de baterias.

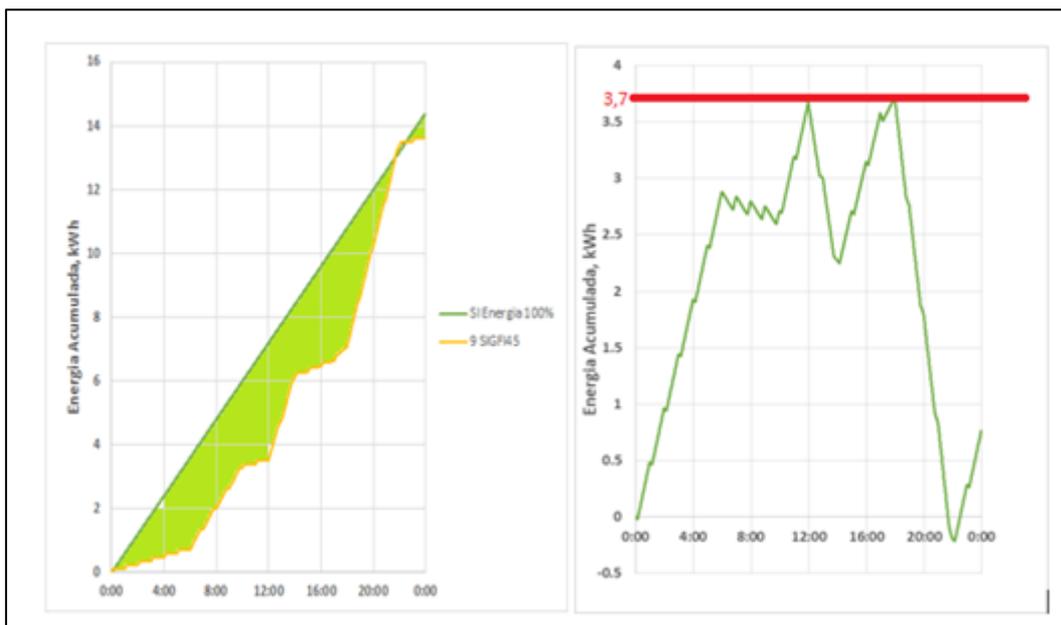


Figura 46 - Armazenamento no banco de baterias (Elaboração própria, 2021)

Analisando a Figura 46 mostra-se que o banco precisa armazenar 3,7 kWh diariamente. Utilizando a equação 73, obtem-se:

$$Capacidade \text{ (kWh)} = \frac{3,7 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{dia}} \right) \cdot 1 \text{ dia}}{0,6 \cdot 0,9} = 7 \text{ kWh} \quad (74)$$

A capacidade do banco de baterias requerido é 7 kWh C100, ou seja, um banco de baterias de um SIGFI45 convencional (7,4 kWh C100). Entretanto, a variação ajustada do SOC entre 40-100% não permite o controle do sistema e eventualmente o inversor poderia se desligar se o SOC for menor a 40%. Por segurança, dois bancos de bateria serão utilizados o que permitirá ao sistema de controle ter uma margem de manobra.

4.4. Sistema proposto final

A partir dos resultados obtidos, utilizando-se dois bancos de bateria, nove usuários SIGFI45 e sem utilizar o painel fotovoltaico, obtém-se o sistema proposto final, Figura 47.

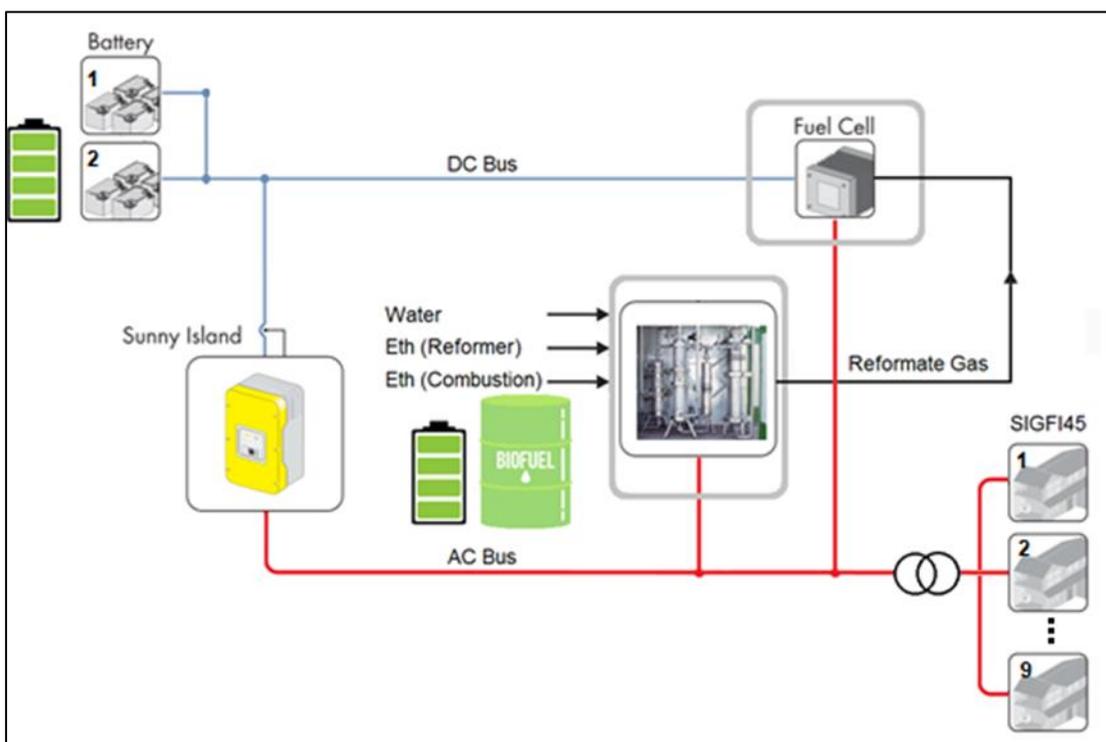


Figura 47 - Sistema GUASCOR Final (Elaboração própria, 2021)

A Figura 48, mostra a variação do SOC iniciando com a partida do Sistema Integrado. Inicialmente os usuários SIGFI45 não estão sendo atendidos o qual é realizado somente após a partida do SI.

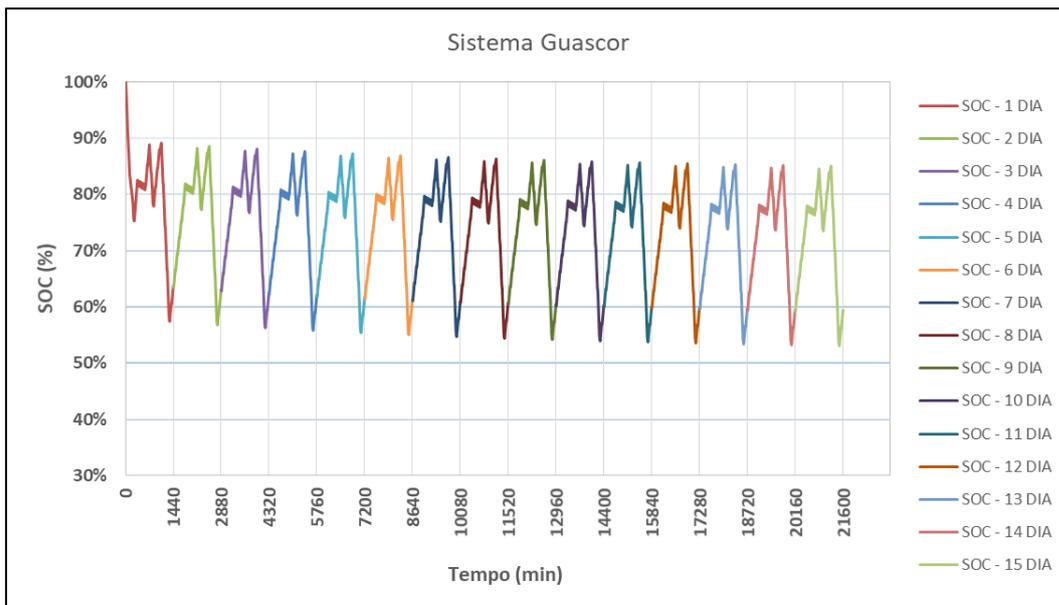


Figura 48 - SOC (Elaboração própria, 2021)

Como se pode observar na Figura 48 o SOC apresenta uma queda contínua durante a operação do sistema. Isto se deve a um padrão específico de variação da capacidade do SI no tempo como mostra a Figura 49.

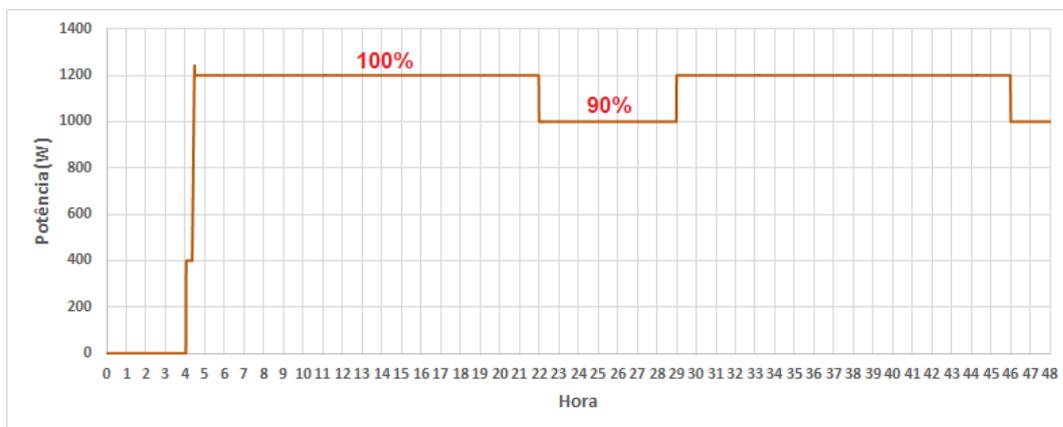


Figura 49 - Potência fornecida pela CaC no padrão de variação da capacidade do SI (Elaboração própria, 2021)

Reajustando o padrão de variação da capacidade do SI no tempo temos o aumento contínuo do SOC no tempo mostrado na Figura 50.

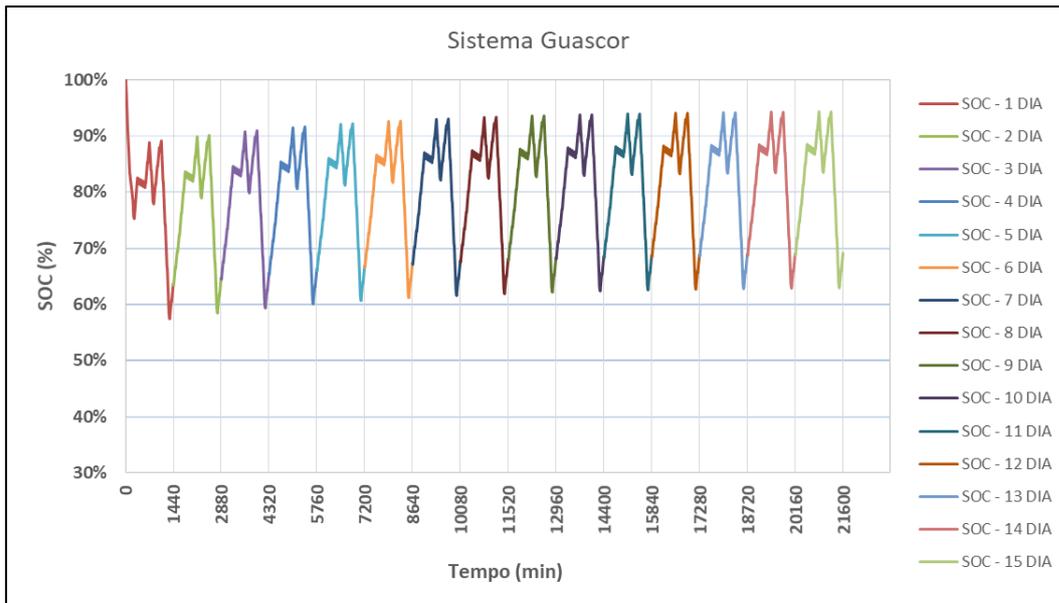


Figura 50 - Variação do SOC (Elaboração própria, 2021)

Durante as simulações foi verificado que as cargas não excedam a potência nominal do inversor, Figura 51. Um procedimento que deve executar-se é que durante a partida do sistema, as cargas SIGFI45 não devem ser atendidas. Este procedimento permitirá poder dar partida ao sistema a qualquer hora do dia.

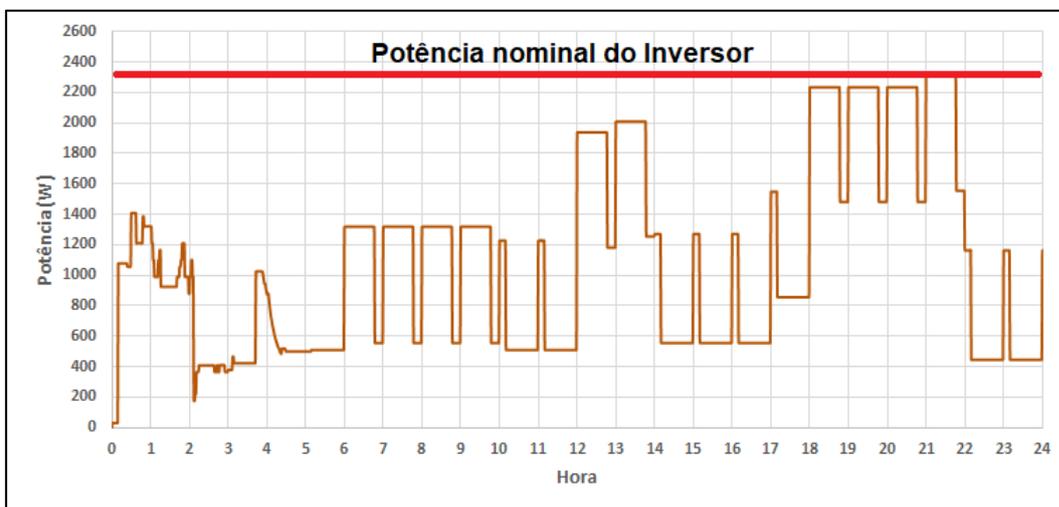


Figura 51 - Potência do Inversor (Elaboração própria, 2021)

4.5. Análise básica de custos

O alto custo dos equipamentos utilizados atualmente inviabiliza o projeto financeiramente, uma vez que a célula a combustível e o reformador de etanol são

importados da Grécia, possuem alto custo de aquisição e transporte, mas é uma tecnologia que já é utilizada em países como China e EUA, e, em breve, essa tecnologia se evolua, reduzindo custos, melhorando os materiais e rendimentos, assim como pode ser comparado em relação ao uso de painéis solares, hoje uma tecnologia limpa mais acessível se comparada a 10 anos atrás. Logo conhecer o custo atual do projeto é importante para comparações futuras.

O objetivo deste trabalho é verificar a viabilidade técnica do sistema, onde foi aprovado, mas como forma de acréscimo verificar a possibilidade de reduzir o custo final do kWh para o consumidor. Após diversas simulações chegou em uma configuração considerável viável tecnicamente (Tabela 9), onde atenderia um número máximo de usuários, não aumentando o número de SI e de inversor, apenas mexendo no número de banco de baterias e painéis fotovoltaicos. O sistema atendendo a um maior número de usuários consequentemente o custo de instalação é diluído entre eles, reduzindo assim o custo final para cada.

Na Tabela 11 traz o custo dos equipamentos adquiridos, onde não considerou os custos de instalação e de construção civil.

Tabela 11 - Custos dos equipamentos (Elaboração própria, 2021)

Custos dos equipamentos	
Reformador	R\$ 270.000,00 / unidade
Painéis Solares	R\$ 1.000,000 / unidade
Inversor	R\$ 25.000,000 / unidade
Baterias	R\$ 1.100,000 / unidade
Célula combustível	R\$ 132.000,00 / unidade

Comparando-se os custos deste trabalho com os custos das dissertações baseadas (SILVA, 2017; RODRIGUES, 2018), como visto na Tabela 12.

Tabela 12 - Custos dos equipamentos do trabalho base (Silva, 2017; Rodrigues, 2018)

Custos dos equipamentos	
Reformador	R\$ 147.000,00 / unidade
Cilindros de H ₂	R\$ 1.200,00 / unidade
Painéis Solares	R\$ 1.000,00 / unidade
Inversor	R\$ 25.000,00 / unidade
Baterias	R\$ 1.100,00 / unidade
Célula a combustível	R\$ 40.000,00 / unidade
Compressor	R\$ 80.000,00 / unidade

O caso 1 apresenta a configuração atual instalada no laboratório, onde, atende a um SIGFI45, possui um banco de bateria (4 baterias), 3 painéis fotovoltaicos, um inversor, uma CaC e um Reformador, os resultados estão na Tabela 13.

Tabela 13 - Custo total dos equipamentos para o Caso 1 (Elaboração própria, 2021)

Equipamento	Custo unitário	Qty.	Total
Reformador	R\$ 360.000,00	1	R\$ 270.000,00
Painéis Solares	R\$ 1.000,00	3	R\$ 3.000,00
Inversor	R\$ 25.000,00	1	R\$ 25.000,00
baterias	R\$ 1.100,00	8	R\$ 8.800,00
Célula combustível	R\$ 70.000,00	1	R\$ 132.000,00
Total			R\$ 438.800,00

O custo total dos equipamentos do Caso 1 é de R\$ 438.800,00 onde atende apenas a um usuário do tipo SIGFI45, que consome 1,5kWh por dia. Logo, um custo de R\$ 292.533,33 R\$/kWh instalado.

Comparando-se com a configuração das dissertações baseadas (Silva, 2017; Rodrigues, 2018), obtém-se a Tabela 14. O custo total dos equipamentos é de R\$ 304.200,00, atendendo a um usuário do tipo SIGFI45, que consome 1,5 kWh por dia. Portanto um custo de 202.800,00 R\$/kWh instalado.

Tabela 14 - Custo total dos equipamentos para o CASO 1. (Silva, 2017; Rodrigues, 2018)

Equipamento	Custo unitário	Qty.	Total
Reformador	R\$ 147.000,00 / unidade	1	R\$ 147.000,00
Cilindros de H ₂	R\$ 1.200,00 / unidade	4	R\$ 4.800,00
Painéis Solares	R\$ 1.000,00 / unidade	3	R\$ 3.000,00
Inversor	R\$ 25.000,00 / unidade	1	R\$ 25.000,00
Baterias	R\$ 1.100,00 / unidade	4	R\$ 4.400,00
Célula a combustível	R\$ 40.000,00 / unidade	1	R\$ 40.000,00
Compressor	R\$ 80.000,00 / unidade	1	R\$ 80.000,00
TOTAL			R\$ 304.200,00

O trabalho utilizado como base possui mais equipamentos e mesmo assim possui um valor mais baixo que o utilizado por este trabalho, uma vez que se fez necessário a troca da célula a combustível e reforma do reformador.

O caso 2 atende a nove SIGFI45, possui dois bancos de baterias, um inversor, uma CaC e um Reformador e 9 usuários SIGFI45, sem Painéis fotovoltaicos, configuração proposta final, os resultados estão na Tabela 15.

Equipamento	Custo unitário	Qnt.	Total
Reformador	R\$ 270.000,00	1	R\$ 270.000,00
Inversor	R\$ 25.000,00	1	R\$ 25.000,00
baterias	R\$ 1.100,00	8	R\$ 8.800,00
Célula combustível	R\$ 132.000,00	1	R\$ 132.000,00
Total			R\$ 435.800,00

Tabela 15 - Custo total dos equipamentos para o Caso 2 (Elaboração própria, 2021)

O custo total dos equipamentos do Caso 2 é de R\$ 435.800,00 onde atende nove usuários tipo SIGFI45, que consome 1,5kWh por dia. Logo, um custo de R\$ 290.533,33 R\$/kWh instalado, onde os materiais ficaria R\$ 48.422,22 para cada usuário.

Mesmo que o sistema possua um alto valor por ser uma tecnologia nova em desenvolvimento, ele possui a possibilidade de ampliação do número de usuários assim como de qualquer componente. Como o sistema deve ficar ligado *fulltime*, seria interessante colocar o sistema em áreas comunitárias visitadas regularmente onde, mantenha ligado por exemplo, um sistema de conservação de alimentos.

5. Conclusões

O objetivo deste trabalho foi utilizar dois projetos anteriores, propor melhorias e verificar a sua viabilidade técnica. Nos projetos anteriores existia dois consumidores vorazes, o reformador e o compressor. Logo, propor-se retirar o compressor, e conseqüentemente o armazenamento, reduzindo custos, e, além de modificar o reformador original e comprar uma nova célula à combustível - CaC. Onde a inovação proposta foi que essa nova CaC, aceitaria gás reformado (com 70% de Hidrogênio – H₂), ou seja, não apenas exclusivamente hidrogênio de 99,99% de pureza, como no projeto original. Uma CaC com tolerância a esse gás reformado, demandaria menos recursos energéticos no reformador, reduzindo seu consumo de energia elétrica.

A partir do projeto proposto de um sistema isolado de geração de energia elétrica com o uso de fontes renováveis, solar e contida no hidrogênio produzido a partir da reforma do etanol, foram realizados ensaios experimentais que permitiram introduzir modificações e validar de um simulador a partir dos dados obtidos. Foram analisados vários cenários de configurações dos componentes do sistema e o simulador permitiu obter um sistema de geração otimizado do ponto de vista técnico e econômico.

No projeto original, foi contemplado apenas o fornecimento de energia a um usuário SIGFI45. Nos ensaios experimentais corroborados pelo simulador, verificou-se que devido às características de operação do sistema de reforma de combustível, este cenário não poderia ser atendido pelo sistema. O reformador de combustível requer muita energia durante o processo de partida e foi concluído que este sistema precisa estar sempre ligado. Com a geração contínua do sistema integrado, a possibilidade de incrementar usuários foi analisada em novos cenários.

Na análise de cenários, a configuração mais enxuta sem participação solar, o sistema poderia atender 9 usuários SIGFI45 com dois bancos de baterias e um inversor. Esta é a configuração do sistema otimizada que utiliza o pleno potencial de geração do sistema integrado e de menor custo por usuário. O número de

consumidores pode ser incrementado no sistema, porém, será necessário adicionar a participação solar, bancos de bateria e inversores.

Segundo a ANEEL o sistema deve atender o usuário por pelo menos 48 horas, foi provado e validado que o sistema atende este requerimento. Na análise dos diversos cenários, como: só as baterias, baterias + Sistema Integrado - SI, baterias + SI + PV. Com o aumento destes, foi possível fazer uma breve análise de custos dos equipamentos e do custo de instalação por kWh produzido, onde mostrou-se a queda dos custos em função do número de consumidores. Com estes resultados positivos, confirmou-se a expectativa de que o sistema proposto é viável para atender pequenas comunidades isoladas.

6. Referências bibliográficas

A.R., CAMARGO. **Alocação e operação ótimas de dispositivos de armazenamento de energia em sistemas de distribuição considerando a preservação da vida útil de baterias.** Dissertação (Dissertação de mestrado). UNICAMP, São Paulo, Brasil, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 493, DE 5 DE JUNHO DE 2012.** Brasília, DF 2012.

AKANDE, A. J. **Production of Hydrogen by Reforming of Crude Ethanol.** Tese de doutorado. Department of Chemical Engineering University of Saskatchewan Saskatoon, Saskatchewan, 2005a.

AKANDE, A. J.; IDEM, R. O.; DALAI, A. K. **Synthesis, characterization and performance evaluation of Ni/Al₂O₃ catalysts for reforming of crude ethanol for hydrogen production.** Applied Catalysis, 287, 159–175, 2005b.

ANDRADE, E. T.; CARVALHO, S. R. G. de.; SOUZA, L. F. de. **Programa do Proálcool e o Etanol no Brasil.** ENGEVISTA, V. 11, n. 2, p. 127-136, 2009.

ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 493, DE 5 DE JUNHO DE 2012.** Brasília, DF 2012.

APPLEBY, A. J. **Characteristics of Fuel Cell Systems.** In: BLOMEN, L. J. M. J., MUGERWA, M. N. Fuel Cell Systems New York: Plenum Press, 614p, 1993.

ARAÚJO, H. E. **CeO₂-10% mol Gd₂O₃:** Efeito da codopagem com X% mol Sm₂O₃ (0<=X<=2) na microestrutura e na condutividade elétrica. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais - Universidade Federal de São Carlos (2011).

BARBOSA, C. F. O.; PINHO, J. T.; VALE, S. B. **Sistema híbridos de energia sola/eólico/diesel para Eletrificação de comunidades isoladas na Região Amazônica brasileira – estado presente e desenvolvimentos futuros.** CLAGTEE, 2005.

BARING-GOULD, E. I.; FLOWERS, L.; LUNDSAGER, P.; MOTT, L.; SHIRAZI, M.; ZIMMERMANN, J. **Worldwide Status of Wind-Diesel Applications.** Windpower 2003, Austin, Texas, USA, 2003.

BARROS, R. **Energia para um novo mundo.** Rio de Janeiro: Monte Castelo Idéias: 160 p. 2007.

BOLACELL, G. S. E. A. **Impacto do custo do banco de baterias em um sistema fotovoltaico.,** 2010. Disponível em:

http://portal.ufsm.br/jai/anais/trabalhos/trabalho_1041257766.htm. Acesso em: 13 ago.

BRASIL. PORTARIA Nº 522, DE 13 DE NOVEMBRO DE 2015. 2015.

BUSCA, G., COSTANTINO, U., MONTANARI, T., RAMIS, G., RESINI, C., & SISANI, M. **Nickel versus cobalt catalysts for hydrogen production by ethanol steam reforming: Ni–Co–Zn–Al catalysts from hydrotalcite-like precursors.** *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 5356–5366, 2010.

CALDERÓN, M.; RAMIRO, A.; GONZÁLEZ, J. F. **Cálculo, Diseño y construcción de um banco de ensayo eólico-solar de laboratório com apoio de hidógeno.** XIV Congreso Ibérico y IX Congreso Iberoamericano de Energía Solar, 1242. Vigo, España, 17/21 June, p. 508-810, 2008.

CAMARGO, J. C. **O Etanol como Fonte de Hidrogênio para Células a Combustível na Geração Distribuída de Energia Elétrica.** Tese de doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos – Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 2004.

CERRI, I.; Lefebvre-Joud, F.; Holtappels, P.; Honegger, K.; Stubos, T.; Millet, P. **Hydrogen and Fuel Cells;** European Commission JRC Institute for Energy and Transport, European Union, 2012; p. 56.

CHAMBOULEYRON, I. **Eletricidade Solar.** *Ciência Hoje*. São Paulo: SBPC. 9 1989.

CHEN, Haisheng et al. **Progress in electrical energy storage system: A critical review.** *Progress in natural science*, [s. l.], v. 19, n. 3, p. 291–312, 2009.

CONAMA. **RESOLUÇÃO CONAMA nº 257, de 30 de junho de 1999.** AMBIENTE, C. N. D. M. Brasília, DF 1999.

COOK, B. **An introduction to fuel cells and hydrogen technology.** *Heliocentris*. Vancouver, Canadá. 31p, 2001.

COPETTI, J. B.; MACAGNAN, M. H. **Baterias em sistemas solares fotovoltaicos.** I CBENS - I Congresso Brasileiro de Energia Solar, p. 10, 2007.

DANTAS, S. C. **Produção de hidrogênio a partir da reforma de metano e etanol em catalisadores de níquel com suportes a base de CeO₂ e CeZrO₂.** Tese de doutorado em Engenharia Química – Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

DAS, D.; VEZIROGLU, T. N. **Hydrogen production by biological processes: a survey os literature.** *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 26, p. 13-28, 2001.

DÍAZ-GONZÁLEZ, Francisco *et al.* **A review of energy storage technologies for wind power applications.** *Renewable and sustainable energy reviews*, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 2154–2171, 2012.

DOE - US Department of Energy. **Fuel Cell Handbook**. 5ª edição. EG&G Services Parsons, Inc. Science Applications International Corporation. Morgantown, West Virginia, EUA, 352 p. 2000.

ELEKTRONIK, W. **Line-commutated sine-wave inverter**. Catálogo técnico Würth Elektronik GmbH 1997.

ELETROBRAS. **Especificações Técnicas dos Programas para Atendimento às Regiões Remotas dos Sistemas Isolados no âmbito do Programa Luz para Todos**. Brasília, DF: 75 p. 2017.

EPE, E. D. P. E.-. **Balanco Energético Nacional 2021**. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>.

FEITOSA, E. A. N.; PEREIRA, A. L.; ROSAS, P. A. C. **Increasing Wind Penetration on Fernando de Noronha – Wind/Diesel System**. In: World Wind Energy Conference, Berlin, 2002.

FISHTIK, I.; ALEXANDER A.; DATTA, R.; GEANA, D. **A thermodynamic analysis of hydrogen production by steam reforming of ethanol via response reactions**. International Journal of Hydrogen Energy 25, p. 31-45, 2000.

FORTUNATO, B.; MUMMOLO, G.; CAVALLERA, G. **Economic optimization of a wind power plant for isolated locations**. Solar Energy, 60, 1997.

FURLAN, A. L. **Análise Comparativa de Sistema de Armazenamento de Energia Elétrica Fotovoltaica por meio de Baterias e Hidrogênio localizadas na Região Amazônica**. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2008.

GARCÍA, E. Y.; LABORDE, M. A. **Hydrogen production by the steam reforming of ethanol: thermodynamic analysis**. International Journal Hydrogen Energy 16, n° 5, p. 307-312, 1991.

GHOSH, P. C.; EMONTS, B.; JANBEN, H.; MERGEL, J.; STOLTEN, D. **Tem years of operational experience with a hydrogen-based renewable energy supply system**. Solar Energy 75, 469-479, 2003.

GUASCOR. **Sistema Integrado de Fornecimento de Energia Elétrica a Sistemas Isolados da Rede, através do Uso de Células a Combustível e Combustível Renovável (Projeto CaCRefEtOH) 2017**.

HAUSCHILD, L. **Avaliação de estratégias de operação de Sistemas Híbridos Fotovoltaico-Eólico-Diesel**. 2006. 117 folhas f. Dissertação (Dissertação de mestrado) -, Universidade de São Paulo (Escola Politécnica / Faculdade de Economia e Administração / Instituto de Eletrotécnica e Energia / Instituto de Física), São Paulo, Brasil.

HEPBASLI, A. **A key review on exoegetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12, 2008.

HOLLADAY, J. D., HU, J., KING, D. L., & WANG, Y. **An overview of hydrogen production technologies.** Catalysis Today, 139, 244–260, 2009.

HOSOI, C. **Comunidades Isoladas exigem um saneamento sob medida.** In: Revista DAE. Saneamento Básico do Estado de São Paulo. SABESP. no 187, ano LIX, set. 2011.

IMHOFF, J. **Desenvolvimento de Conversores Estáticos para Sistemas Fotovoltaicos Autônomos.** 2007. 146 f. (Dissertação de Mestrado) -, Escola de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

INTERNATIONAL ENERGY OUTLOOK 2019, “With projections to 2050”, Washington, September 2019. Disponível em: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/ieo2019.pdf>

IOANNIDES, T.; NEOPHYTIDES, S. **Efficiency of a solid polymer fuel cell operating on ethanol.** Journal of Power Sources 91, p. 150-156, 2000.

JACKEY, R. A. **A Simple, Effective Lead-Acid Battery Modeling Process for Electrical System Component Selection:** SAE International, 2007.

JORQUERA, O.; SALES, E. A.; GHIRARDI, M.; KIPERSTOK, A.; EMBIRUÇU, M. **Modelagem matemática das rotas metabólicas de produção de hidrogênio por microalgas.** In: Brasil H2 fuel cell Expo/Seminar, Recife, p. 1-7, 2007.

KIRUBAKARAN, A. J., JAIN, S.; NEMA, R. K.; **A review on fuel cell technologies and power electronic interface,** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 13, p. 2430–2440, 2009.

LAHIRI, K.; RAGHUNATHAN, A.; DEY, S.; PANIGRAHI, D. **Battery-Driven System Design: A New Frontier in Low Power Design.** 2002. 261-267 p. 0-7695-1441-3.

LAMA, A. **Análise de desempenho de uma Célula de combustível tipo PEM de 5 kW com reformador de Gás Natural e Cogeração.** 2006. 121 f. (Dissertação de Mestrado) Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, Rio de Janeiro – RJ.

LASNIER, F.; ANG, T. G. **Photovoltaic Engineering Handbook.** Adam Hilger, 1990.

LEHMAN, P. A.; CHAMCERLIN, C.E.; PAULETTO, G.; ROCHELEAU, M. **Operating Experience with a Photovoltaic-Hydrogen.** Energy System, Proceedings of the 10th World Hydrogen Energy Conference, D. L. Block and T.N. Veziroglu, editors, Cocoa Beach, FL, June, 1994.

LUNDSAGER, P.; BINDNER, H. **A simple, robust & reliable wind diesel concept for remote power supply.** Renew Energy, 5, 1994.

LUO, Xing *et al.* **Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation.** Applied energy, [s. l.], v. 137, p. 511–536, 2015.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Photovoltaic Science Handbook of Photovoltaic Science.** Wiley & Sons Ltd, 2003.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B., ABREU, S. L.; COLLE, S. **Solar energy scenarios in Brazil. Part one: Resource Assessment.** Energy Policy 36, 2853–2864, 2008.

MARTINS, R., KRAJACIC, G., ALVES, L., DUIC, N., TOSTE, A. J., **Selection and installation of a hydrogen based energy storage.** II Iberian Symposium on Hydrogen, Fuel Cells and Advanced Batteries, Vila Real, September 13th– 17th 2009.

MCGOWAN, J. G.; MANWELL, J. F. **Hybrid Wind/PV/Diesel System Experiences.** Renewable Energy 16, 928–933, 1999.

MESSENGER, R.; VENTRE, J. **Photovoltaic Systems Engineering.** Boca Raton: CRC Press 2010.

NAKABAYASHI, R. K. **Microgeração fotovoltaica no Brasil: condições atuais e perspectivas futuras.** 2014. 106 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-26012015-141237/en.php>.

NELSON, V. C.; FOSTER, R. E.; CLARK, R. N.; RAUBENHEIMER, D. **Wind Hybrid Systems Technology Characterization.** Technical Report, Southwest Technology Development Institute, New Mexico State University, May, 2002.

OAKLEY, J. H.; HOADLEY, A. F. A. **Industrial scale steam reforming of bioethanol: A conceptual study.** International Journal of Hydrogen Energy, 35, 8472– 8485, 2010.

Orlando, A.F., Siqueira, C.E.R., and Do Val, L.G., 2003, **Performance Analysis of a 5 kW PEM Type Fuel Cell with a Natural Gas Reformer**, Proceedings of 17 th International Congress of Mechanical Engineering, November 10-14, São Paulo, SP, Brazil, Paper 1169.

OVELHA, R. M. R. V. D. **Projeto, Dimensionamento e Instalação de Solução Fotovoltaica numa moradia offgrid.** 2017. 102 p. f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA, UNIVERSIDADE DE LISBOA, Lisboa.

PARFOMAK, Paul W. **Energy Storage for Power Grids and Electric Transportation: A Technology Assessment.** Congressional Research Service, [S.L.], v. 75700, p. 11–15, mar. 2012.

PEREIRA, D. **Síntese e caracterização de materiais cerâmicos para aplicação como cátodos em células a combustível de óxido sólido (SOFC), Diplomação em engenharia de Materiais.** Universidade Federal Rio Grande do Sul, 2009.

PEREIRA, M. G.; FREITAS, M. A. V.; SILVA, N. F. **Avaliação da Contribuição do Programa de Universalização do Acesso à Energia Elétrica Luz para Todos: Energia e Qualidade de Vida.** XIII Congresso Brasileiro de Energia. Rio de Janeiro, Brasil. 2010.

PEREZ, R. **The schatz PV Hydrogen Project.** (1991). Disponível em: <http://www.xlabs.pl/schematy_pliki/magazynh2.pdf. Acesso em 08 de setembro de 2019.

PERLES C, **Propriedades físico-químicas relacionadas ao desenvolvimento de membranas de Nafion® para aplicações em células a combustível do tipo PEMFC,** Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 18, nº 4, p. 281-288, 2008

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: 2014. 530 p. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf.

RASTLER, D. M. **Electricity energy storage technology options: a white paper primer on applications, costs and benefits.** [s.l.] : Electric Power Research Institute, 2010.

RENDEIRO, G; MACEDO, E.N.; PINHEIRO, G; PINHO, J.T. **Analysis on the Feasibility of Biomass Power Plants Adding to the Electric Power System - Economic, Regulatory and Market Aspects - State of Pará, Brazil.** Renewable Energy. P. 1678-1684. 2011

RODRIGUES, A. D. C. **Simulação de um sistema híbrido de geração de energia para pequenas comunidades baseado em energia solar, reforma de etanol e armazenamento de hidrogênio.** 2018. 120 folhas. f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2018.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil.** Florianópolis: LABSOLAR: 114 p. 2004.

RYDH, C. J. **Environmental assessment redox and lead-acid batteries for stationary energy storage.** Journal of Power Sources, 80, p. 21-29, 1999.

SABIHUDDIN, Siraj; KIPRAKIS, Aristides; MUELLER, Markus. **A numerical and graphical review of energy storage technologies.** Energies, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 172–216, 2014.

SAUSEN, P. S. **Gerenciamento integrado de energia e controle de topologia em redes de sensores sem fio.** 2008. Doutorado (Tese de Doutorado) -, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil.

SCHMID, A. L.; HOFFMANN, C. A. A. **Replacing diesel by solar in the Amazon: short-term economic feasibility of PV-diesel hybrid systems.** Energy Policy, 2004.

SHAYANI, R. A. **Medição do rendimento global de um sistema fotovoltaico isolado utilizando módulos de 32 células.** 2006. 205 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SILVA, A. C. S. **Simulação numérico-experimental de um sistema híbrido solar/etanol/hidrogênio de geração de energia elétrica.** 2017. 135 folhas. f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) -, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2017.

SILVA, S. B. **Dimensionamento ótimo de Sistema Híbridos, com Geração fotovoltaica e Célula a Combustível, para atendimento a comunidades isoladas na Amazônia.** Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.TD-052/10, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 132p, 2010.

SUN, J.; QIU, X.; WU, F.; ZHU, W.; WANG, W.; HAO, S. **Hydrogen from steam reforming of ethanol in low and middle temperature range for fuel cell application.** International Journal of Hydrogen Energy, 29, p. 1075-1081, 2004.

TAMAGNINI, P.; LEITÃO, E.; OLIVEIRA, P. **Biohidrogênio: produção de H₂ utilizando cianobactérias.** Boletim de Biotecnologia: Energias renováveis e limpas de origem biológica, n. 75, p. 3-6, 2003.

TANKSALE, A., BELTRAMINI, J. N., & LU, G. M. **A review of catalytic hydrogen production processes from biomass.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, 166–182, 2010.

UCZAI, P. **Energias Renováveis riqueza sustentável ao alcance da sociedade.** CÂMARA DOS DEPUTADOS, Brasília-DF, n.10, p.1-273, 2012.

VALE, S. B.; BEZERRA, U. H.; PINHO, J. T.; PEREIRA, E. J. S. **Estudo da inserção de célula a combustível integrada a Sistema Híbrido de geração de eletricidade isolado.** 2º WICaC – Workshop Internacional de Células a Combustível, Unicamp – Campinas, 2004.

VASUDEVA, K.; MITRA, N.; UMASANKAR, P.; DHINGRA, S. C., **Steam Reforming of Ethanol for Hydrogen Production: Thermodynamic Analysis,** Int. J. Hydrogen Energy, vol.21, no.1, pp 13-18, 1996.

VELU, S.; SUZUKI, K.; VIJAYARAJ, M.; BARMAN, S.; GOPINATH, C. S. **In situ XPS investigations of Cu_{1-x}Ni_xZnAl mixed metal oxide catalysts used in the oxidative steam reforming of bio-ethanol.** Applied Catalysis B: Environmental 55, p. 287-299, 2005.

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia solar fotovoltaica: Conceitos e aplicações.** São Paulo: Érica, 2012.

ZHANG, H. E. A. **The Development and review of wind/diesel systems of the world.** New Energy (Chongqing, China), 18, n. 6, 1996.

ZILLES, Roberto et al. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

ZOULIAS, E. I.; GLOCKNER, R.; LYMBEROPOULOS, N.; TSOUTSOS, T. et al. **Integration of hydrogen energy technologies in stand-alone power systems analysis of the current potential for applications.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 10, 2006. ALANEN, R. D4.1 Electrical Energy Storage Technology Review. EERA Joint Programme on Smart Grids, Sub-Programme, v. 4, 2011.

ZUKOWSKI JR., J.C. **Geração de energia em comunidades isoladas:** caso da Comunidade Boa Esperança in ABREU, Yolanda V., OLIVEIRA, Marco Aurélio G. e MALLET-RUY GUERRA, Sinclair (organizadores.), “Energia, Economia, Rotas tecnológicas”: Textos selecionados”, Málaga, Espanha: Eumed. Net, Universidad de Málaga, 2010.

ANEXO I

Catálogo da Célula a Combustível

Physical Data:

Specification for standard stack sizes

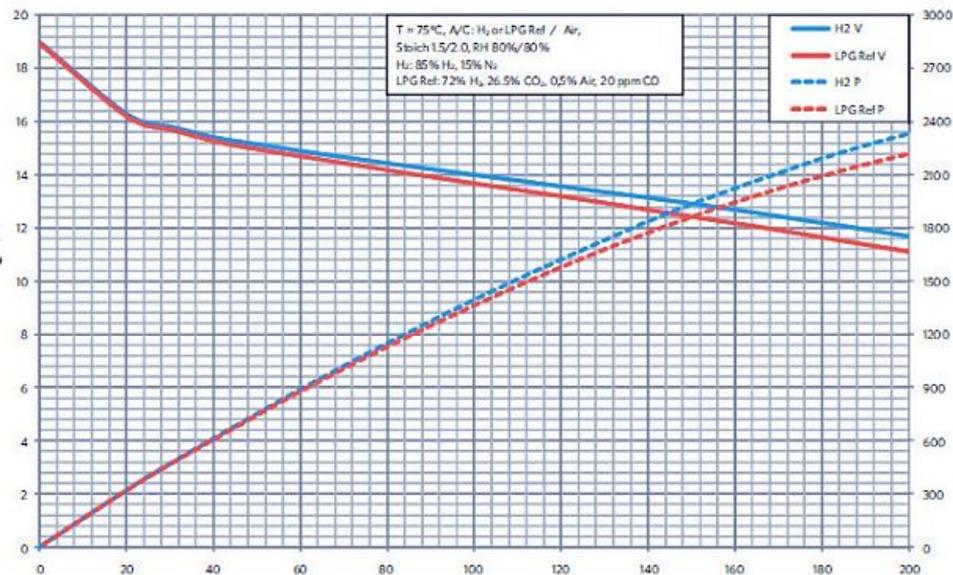
Max power (kW)	1	2.0	3.0	4.0	5.0
Cell Count	10	20	30	40	50
Dimensions (mm)	191x149x240	191x187x240	191x226x240	191x265x240	191x303x240
Weight (kg)	7.9	11.3	14.8	18.2	21.7

*PowerCells S1 stack power and size can be modified for specific needs

All models

Maximum current output	200 A
$\Delta P_{\text{cathode}}$ @ nominal power	Non-condensing at inlet
ΔP_{anode} @ nominal power	< 1.2 Bar (g)
(H ₂ , stoich 1.5, 15% inert)	
Maximum operating temperature	85 °C
Humidity	Non-condensing at inlet
Gas pressure	< 1.5 bar(abs)
Coolant Pressure	Gas pressure + 0.1 Bar
Ambient temperature	2 - 70 °C

Unit Cell Data



ANEXO II

Catálogo do Inversor Sunny Island 3.0M

10 Technical Data

SMA Solar Technology AG

10.1 AC1 Connection for Stand-Alone Grid

	Sunny Island 3.0M	Sunny Island 4.4M	Sunny Island 6.0H	Sunny Island 8.0H
Rated power	2300 W	3300 W	4600 W	6000 W
Power for 30 minutes at 25 °C	3000 W	4400 W	6000 W	8000 W
Power for 5 minute at 25 °C	3500 W	4600 W	6800 W	9100 W
Power for 1 minute at 25 °C	4200 W	4800 W	7500 W	9600 W
Maximum AC power for 3 s at 25 °C	5500 W	5500 W	11000 W	11000 W
Maximum connectable power of the PV inverters in off-grid systems	4600 W	4600 W	9200 W	12000 W
Rated grid voltage	230 V	230 V	230 V	230 V
Voltage range	202 V to 253 V	202 V to 253 V	202 V to 253 V	202 V to 253 V
Rated frequency	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz
Frequency range	45 Hz to 65 Hz	45 Hz to 65 Hz	45 Hz to 65 Hz	45 Hz to 65 Hz
Frequency range of the set range	±10 Hz	±10 Hz	±10 Hz	±10 Hz
Rated Current	10 A	14.5 A	20.0 A	26.1 A
Maximum output current as a peak value for 60 milliseconds	60 A	60 A	120 A	120 A
Total harmonic distortion of the output voltage (THD)	<4.5 %	<4.5 %	<4 %	<4 %
Displacement power factor $\cos \varphi$	-1 to +1	-1 to +1	-1 to +1	-1 to +1
Recommended conductor cross-section	10 mm ²	10 mm ²	10 mm ²	10 mm ²
Maximum connectable conductor cross-section	16 mm ²	16 mm ²	16 mm ²	16 mm ²
Cable diameter	9 mm to 18 mm	9 mm to 18 mm	9 mm to 18 mm	9 mm to 18 mm
Terminal	Lever terminal	Lever terminal	Lever terminal	Lever terminal
Circuit breakers than can be tripped	Tripping characteristics B6	Tripping characteristics B6	Tripping characteristics B16 or C6	Tripping characteristics B16 or C6
Short circuit power of the device	13.8 kW	13.8 kW	27.6 kW	27.6 kW

10.15 General Data

	Sunny Island 3.0M/4.4M	Sunny Island 6.0H / 8.0H
Width x height x depth	467 mm x 612 mm x 242 mm	467 mm x 612 mm x 242 mm
Weight	44 kg	63 kg
Operating temperature range	-25°C to +60°C	-25°C to +60°C
Storage temperature range	-25°C to +70°C	-25°C to +70°C
Humidity	0% to 100%	0% to 100%
Maximum installation height above MSL	3000 m	3000 m
Topology	LF transformer	LF transformer
Cooling method	SMA OptiCool	SMA OptiCool
Protection class in accordance with IEC 62103	I	I
Climatic category in accordance with IEC 60721	3K6	3K6
Degree of protection in accordance with IEC 60529	IP54	IP54

ANEXO III

Controlador de Carga

Technical Parameters

12. Technical Parameters

MPPT solar controller modes : eSMART-12V/24V/48V-series		15A	20A	25A	30A	40A
Charge Mode	MPPT (maximum power point tracking)					
Method	Three stages: constant current (MPPT), constant voltage, floating charge.					
System Type	DC 12V/24V/48V	Automatic recognition				
System voltage	12Vsystem	DC9V~DC15V				
	24Vsystem	DC18V~DC30V				
	48Vsystem	DC36V~DC60V				
Soft Start Time	12V/24V/48Vsystem	≤3S				
Dynamic Response Recovery Time	12V/24V/48Vsystem	500us				
MPPT efficiency	12V/24V/48Vsystem	≥96.5%,≤99%				
INPUT CHARACTERISTICS						
MPPT working voltage range	12Vsystem	DC14V~DC100V				
	24Vsystem	DC30V~DC100V				
	48Vsystem	DC60V~DC100V				
Low input voltage protection point	12Vsystem	DC14V				
	24Vsystem	DC30V				
	48Vsystem	DC60V				
Low input voltage Recovery point	12Vsystem	DC18V				
	24Vsystem	DC34V				
	48Vsystem	DC65V				
High input voltage protection point	12V/24V/48Vsystem	DC110V				
High input voltage recovery point	12V/24V/48Vsystem	DC100V				
Maximum PV power	12Vsystem	213W	284W	355W	426W	568W
	24Vsystem	426W	568W	710W	852W	1136W
	48Vsystem	852W	1136W	1420W	1704W	2272W
CHARGE CHRECTRESTICS						
Selectable Battery Types (Default Gel battery)	12V/24V/48Vsystem	Sealed lead acid, vented, Gel, NiCd battery (Other types of the batteries also can be defined)				
Constant Voltage	12V/24V/48Vsystem	Please check the charge voltage according to the battery type form.				
Floating Charge Voltage	12V/24V/48Vsystem					
Rated Output Current	12V/24V/48Vsystem	15A	20A	25A	30A	40A
Current-limiting Protection	12V/24V/48Vsystem	20A	25A	30A	35A	45A
Temperature Factor	12V/24V/48Vsystem	±0.02%/°C				
Temperature Compensation	12V/24V/48Vsystem	14.2V-(The highest temperature-25°C)* 0.3				
Output Ripples(peak)	12V/24V/48Vsystem	200mV				
Output Voltage Stability Precision	12V/24V/48Vsystem	≤±1.5%				