

Adriano da Costa Rodrigues

Simulação de um sistema híbrido de geração de energia para pequenas comunidades baseado em energia solar, reforma de etanol e armazenamento de hidrogênio.

Dissertação de Mestrado

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

> Orientador: Prof. Sergio Leal Braga Coorientador: Dr. Epifanio Mamani Ticona

Rio de Janeiro Março de 2018



Adriano da Costa Rodrigues

Simulação de um sistema híbrido de geração de energia para pequenas comunidades baseado em energia solar, reforma de etanol e armazenamento de hidrogênio

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

> Prof. Sergio Leal Braga Orientador Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

> > Dr. Epifanio Mamani Ticona Coorientador Instituto de Energia - PUC-Rio

Prof. Reinaldo Castro Souza Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

> Dr. Eduardo Torres Serra ES+PS Consultoria

Dr. Francisco da Costa Lopes CEPEL

Prof. Márcio da Silveira Carvalho Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 26 de março de 2018

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

Adriano da Costa Rodrigues

Graduou-se em Engenharia Mecânica na UFF (Universidade Federal Fluminense) em 2013. Participou de projeto de pesquisa e na área de Sistemas de Energia. Atuou em projetos de tubulação para plataformas de petróleo. Interesse acadêmico na área de Petróleo e Energia.

Ficha Catalográfica

Rodrigues, Adriano da Costa

Simulação de um sistema hírido de geração de energia para pequenas comunidades baseado em energia solar, reforma de etanol e armazenamento de hidrogênio / Adriano da Costa Rodrigues ; orientador: Sergio Leal Braga ; co-orientador: Epifanio Mamani Ticona. – 2018.

120 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2018. Inclui bibliografia

 Engenharia Mecânica – Teses. 2. Sistemas offgrid. 3.
 Reforma de etanol. 4. Energia solar. 5. Célula a combustível. 6.
 Hidrogênio. I. Braga, Sergio Leal. II. Mamani Ticona, Epifanio. III.
 Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

A Deus em primeiro lugar.

Ao meu orientador Professor Dr. Sergio Leal Braga e ao meu co-orientador Dr. Epifanio Mamani Ticona pela oportunidade, pela orientação ao longo deste trabalho e por estarem sempre disponíveis para ajudar com minhas infindáveis dúvidas.

Aos meus pais, Jamil e Lucia pelo amor, pela compreensão e paciência.

À Dresser-Rand Guascor do Brasil, na pessoa do Sr. Cesar Sobral Vieira e à equipe que participou do projeto e contribuiu direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho, Dr. Eduardo Torres Serra, Dr. José Geraldo de Melo Furtado, Dr. Francisco da Costa Lopes, Dr. Fabio Bellot Noronha e MSc. Anna Camila Souza e Silva.

Aos companheiros de curso e de estudos que trilharam o mesmo caminho e compartilharam das dificuldades e conquistas.

À minha namorada Alice Moreira e aos amigos que me incentivaram e motivaram em muitos momentos.

Os autores agradecem o financiamento parcial do projeto de pesquisa à Rede Temática CYTED 717RT0535 "ARMAZENAMENTO DE ENERGIA SOLAR PARA COMUNIDADES ISOLADAS".

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

Resumo

Rodrigues, Adriano da Costa; Braga, Sergio Leal; Ticona, Epifanio Mamani. Simulação de um sistema híbrido de geração de energia para pequenas comunidades baseado em energia solar, reforma de etanol e armazenamento de hidrogênio. Rio de Janeiro, 2018. 120p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho é realizada a simulação de um sistema híbrido de geração de energia para pequenas comunidades, através de um simulador do sistema integrado de fornecimento de energia elétrica para consumidores sem acesso à rede de distribuição de energia elétrica desenvolvido para este fim. O simulador foi desenvolvido em Excel e Visual Basic for Applications (VBA). O sistema inicial consiste basicamente de uma unidade de células a combustível, baterias, um reformador de etanol para produção de hidrogênio, compressor, cilindros de armazenamento e painéis fotovoltaicos. A simulação foi desenvolvida aumentandose gradativamente a quantidade dos componentes do sistema para atender à demanda de vários consumidores SIGFI45, até o limite do sistema, visando a diminuição do custo total de instalação por kWh para cada consumidor. Posteriormente foram avaliadas as características de cada equipamento (reformador de hidrogênio, célula a combustível do tipo PEM, painéis fotovoltaicos, banco de baterias de chumbo-ácido, inversor de frequência, compressor de hidrogênio) e a ampliação do sistema para atender a mais usuários. Foram analisados diferentes cenários, de acordo com o aumento do número de usuários do sistema e a demanda de energia resultante. Como resultado, a simulação do sistema ampliado atendeu a um maior número de consumidores, satisfazendo a demanda de pequenas comunidades com um custo menor para a produção de energia do que no caso com o sistema inicial.

Palavras-chave

Sistemas *offgrid*; Reforma de Etanol; Energia Solar; Célula a combustível; Hidrogênio; Painéis Fotovoltaicos; Sistemas de Energia; Energia Renovável.

Abstract

Rodrigues, Adriano da Costa; Braga, Sergio Leal (Advisor); Ticona, Epifanio Mamani (Co-Advisor). **Simulation of a hybrid energy generation system based on solar energy, ethanol reforming and hydrogen storage.** Rio de Janeiro, 2018. 120p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this current work it is realized the simulation of a hybrid energy generation system for small communities, through a simulation program of the integrated system of energy supply for offgrid costumers developed for this purpose. The simulator was developed in Excel and Visual Basic for Applications (VBA). The starting system consists of a unit of fuel cells, lead-acid batteries, ethanol reformer to produce hydrogen, compressor, storage cylinders and photovoltaic panels. The simulation was developed adding a new component when it was necessary to supply the demand of more than one customer SIGFI45, up to the limit of the system, aiming at reducing the installation cost per kWh for each consumer. Subsequently, the characteristics of each equipment (hydrogen reformer, PEM fuel cell, photovoltaic panels, battery bank, inverter, hydrogen compressor) were evaluated and the system was expanded to supply more users. Different scenarios were analyzed in accordance with the increase in the number of users of the system and the resulting energy demand. As a result, the optimization of the system has supplied a greater number of customers and it can supply energy for small communities with a lower cost for energy production than the original system.

Keywords

Offgrid systems; Ethanol Reforming; Solar Energy; Fuel Cell; Hydrogen; Photovoltaic Panels; Energy Systems; Renewable Energy.

Sumário

1. Introdução	15		
1.1. Objetivo	16		
1.2. Motivação	17		
1.3. Organização do trabalho	21		
2. Conceitos teóricos	22		
2.1. Armazenamento de energia	22		
2.2. O hidrogênio como vetor energético	25		
2.3. Sistema de Energia Atual e Futuro	28		
2.4. Células a combustível	29		
2.5. Métodos de obtenção do H ₂	31		
2.6. O etanol brasileiro	32		
2.7. Formas de armazenamento do hidrogênio 3			
2.8. Sistemas híbridos de geração de energia 34			
3. O sistema de geração de energia para sistemas isolados	41		
3.1. Projeto conceitual e experimental do sistema	41		
3.2. Modelagem do simulador do sistema	44		
3.2.1. Baterias	44		
3.2.2. Célula a combustível (CaC)	47		
3.2.3. Cilindros de hidrogênio	47		
3.2.4. Reformador	48		
3.2.5. Compressor	49		
3.2.6. Painéis fotovoltaicos	49		
3.2.7. Inversor	51		
4. Análise dos subsistemas de geração e armazenamento de energia	53		
4.1. Alteração dos parâmetros do reformador	53		
4.2. Aumento do número de usuários SIGFI45	56		
4.3. Análise dos componentes	59		

4.3.1. Painéis fotovoltaicos59				
4.3.2. Cilindros de armazenamento de H ₂ 59				
4.3.3. Célula a combustível (CaC) 61				
4.3.4. Reformador de etanol64				
4.3.5. Banco de baterias 66				
4.3.6. Inversor Sunny	67			
4.3.7. Compressor de hidrogênio	68			
4.4. Conversão da energia do Etanol e do hidrogênio para kWh	72			
5. Simulações com o sistema ampliado	74			
5.1. Análise do consumo do reformador em função do tempo de				
produção de H ₂	74			
5.2. Determinação das variáveis de Operação da Célula a combustível	76			
5.3. Configurações do sistema ampliado	80			
5.3.1. CASO 1 – Um usuário SIGFI45	80			
5.3.2. CASO 2 – Comunidade de 6 usuários	82			
5.3.3. CASO 3 – Comunidade de 9 usuários	85			
5.3.4. CASO 4 – Comunidade de 10 usuários88				
5.3.5. CASO 5 – Comunidade de 20 usuários 91				
5.4. Análise da eficiência global do sistema	96			
5.5. Considerações finais	99			
6. Análise de custos	100			
7. Conclusões	108			
8. Referências bibliográficas	109			
ANEXO I Catálogo da Célula a Combustível	113			
ANEXO II Catálogo do Reformador de Etanol	114			
ANEXO III Catálogo do Compressor	116			

ANEXO IV Catálogo do Inversor Sunny Island 3.0M	117
ANEXO V Solução numérica da corrente da bateria em VBA	118

Lista de figuras

Figura 1 – Perfil de carga SIGFI45 (Adaptado de Silva, 2017).	16
Figura 2 – Consumo mundial de energia por fonte (Adaptado de International	
Energy Outlook 2016, EIA).	17
Figura 3 – Conceito de um sistema ongrid (Adaptado de White Paper –	
Electrical Energy Storage, IEC, 2011).	19
Figura 4 – Conceito de um sistema offgrid. (Adaptado de White Paper –	
Electrical Energy Storage, IEC, 2011).	19
Figura 5 – Perfil de funcionamento de um sistema baseado em energia solar	
ligado à rede de distribuição. (Adaptado de Technology Roadmap: Solar	
Photovoltaic Energy, IEA, 2014)	23
Figura 7 – Esquema de sistemas de energia renovável baseados em energia	
solar fotovoltaica e/ou eólica (Adaptado de Eriksson e Gray, 2017).	27
Figura 8 – Sistema de energia atual e futuro (Adaptado de Technology	
Roadmap: Hydrogen and Fuel Cells, IEA, 2015).	28
Figura 9 – Diagrama esquemático de uma célula a combustível do tipo	
PEMFC (Adaptado de Abdin et al., 2015).	29
Figura 10 – Diferentes configurações avaliadas por Das et al., (2017)	
(Adaptado de Das et al., 2017).	35
Figura 11 – a) Sistema PV/eólica/baterias; b) PV/eólica/baterias/hidrogênio.	
(Adaptado de Stojković e Bakić, 2016).	36
Figura 12 – Configurações avaliadas por Lagorse et al., (2018) (a) PV, bateria,	
CaC alimentada por um tanque de H ₂ ; (b) PV, CaC, eletrolisador e tanque	
de H ₂ (c) PV, bateria, CaC, eletrolisador e tanque de H ₂ (Lagorse <i>et al.</i> ,	
2018).	37
Figura 13 – Modelo do sistema híbrido utilizando energia solar/eólica/	
bioetanol estudado por (Adaptado de Feroldi et al., 2013).	39
Figura 14 – Instalação do sistema estudado por (Adaptado de Lopes et al.,	
2012).	40
Figura 15 – Concepção do sistema integrado conforme submetido na proposta	
de projeto (Fonte: Silva, 2017).	42

Figura 16 – Diagrama de blocos com ligações e conexões entre os	
equipamentos na configuração final do projeto (Adaptado de Silva, 2017).	43
Figura 17 – Modelagem da bateria (Adaptado de Silva, 2017).	44
Figura 18 – Circuito elétrico equivalente do sistema híbrido de geração de	
energia elétrica (Baseado em Silva, 2017).	46
Figura 19 – Potência fornecida pelos painéis fotovoltaicos (Baseado em Silva,	
2017).	50
Figura 20 – Modos de operação dos painéis fotovoltaicos (Baseado em Silva,	
2017).	50
Figura 21 – Modelo esquemático do simulador.	52
Figura 22 – Dados de entrada do reformador.	54
Figura 23 – Variação de pressão nos cilindros de H_2 de acordo com o consumo	
do reformador.	55
Figura 24 - Variação do estado de carga do banco de baterias de acordo com o	
consumo do reformador.	55
Figura 25 – Variação de pressão nos cilindros de H_2 em função do número de	
consumidores (reformador produzindo por 6 horas).	56
Figura 26 – Variação do estado de carga em função do número de	
consumidores (reformador produzindo por 6 horas).	57
Figura 27 – Variação de pressão nos cilindros de H_2 em função do número de	
consumidores (reformador produzindo continuamente).	58
Figura 28 – Variação do estado de carga em função do número de	
consumidores (reformador produzindo continuamente).	58
Figura 29 – Variação da pressão em função da pressão inicial nos cilindros	
de H ₂ .	60
Figura 30 – Célula a combustível utilizada (Fonte: Silva, 2017).	62
Figura 31 – Variação de pressão nos cilindros de H_2 para uma e duas células a	
combustível.	62
Figura 32 – Variação do estado de carga para uma e duas células a	
combustível.	63
Figura 33 – Células a combustível operando em paralelo.	64
Figura 34 – Variação de pressão nos cilindros de H_2 com um reformador após	
a duplicação da CaC.	65

Figura 35 – Variação do estado de carga com um reformador após a	
duplicação da CaC.	65
Figura 36 – Bancos de baterias chumbo-ácido ligados ao barramento de 48 V.	67
Figura 37 – Curva de eficiência do Inversor Sunny Island 3.0M (Adaptado do	
Manual do inversor Sunny Island 3.0M).	68
Figura 38 – Consumo específico (Wh/L) do compressor de hidrogênio (Fonte:	
Silva, 2017).	69
Figura 39 – Curvas aproximadas do consumo específico do compressor.	72
Figura 40 – Diagrama de blocos da conversão do etanol em energia elétrica.	73
Figura 41 – Consumo do reformador X Horas de produção de H ₂ .	75
Figura 42 - Variação da eficiência das baterias VRLA em função do estado de	
carga (Adaptado de http://ultrabattery.com/technology/ultrabattery-	
technology).	76
Figura 43 – Variação do SOC das baterias com a variação do parâmetro LVS.	78
Figura 44 – Variação da pressão nos cilindros com a variação do parâmetro	
LVS.	78
Figura 45 – Variação do SOC das baterias em função do parâmetro Vfloat.	79
Figura 46 - Variação da pressão nos cilindros em função do parâmetro Vfloat.	79
Figura 47 – Variação da pressão nos cilindros para o CASO 1.	81
Figura 48 – Variação do estado de carga para o CASO 1.	81
Figura 49 – Variação da pressão nos cilindros para o CASO 2.	84
Figura 50 – Variação do estado de carga para o CASO 2.	84
Figura 51 – Variação da pressão nos cilindros para o CASO 3.	87
Figura 52 – Variação do estado de carga para o CASO 3.	87
Figura 53 – Variação da pressão nos cilindros para o CASO 4.	90
Figura 54 – Variação do estado de carga para o CASO 4.	90
Figura 55 – Variação da pressão nos cilindros para o CASO 5.	93
Figura 55 – Variação da pressão nos cilindros para o CASO 5. Figura 56 – Variação do estado de carga para o CASO 5.	93 93
Figura 55 – Variação da pressão nos cilindros para o CASO 5. Figura 56 – Variação do estado de carga para o CASO 5. Figura 57 – Eficiência do sistema com 1 reformador.	93 93 96
Figura 55 – Variação da pressão nos cilindros para o CASO 5. Figura 56 – Variação do estado de carga para o CASO 5. Figura 57 – Eficiência do sistema com 1 reformador. Figura 58 – Eficiência do sistema com 2 reformadores.	93 93 96 97
 Figura 55 – Variação da pressão nos cilindros para o CASO 5. Figura 56 – Variação do estado de carga para o CASO 5. Figura 57 – Eficiência do sistema com 1 reformador. Figura 58 – Eficiência do sistema com 2 reformadores. Figura 59 –Custo do kWh em função do aumento do número de usuários. 	93 93 96 97 105

Lista de tabelas

Tabela 1 – Poder calorífico dos combustíveis por unidade de massa (Adaptado)
de Dutta, 2014).	26
Tabela 2 – Principais tipos de células a combustível (Fonte: Linardi, 2010).	30
Tabela 3 – Reações dos processos de obtenção de H_2 por reforma de etanol	
(Fonte: Linardi, 2010).	32
Tabela 4 – Pressão inicial e final nos cilindros e consumo do compressor.	60
Tabela 5 – Capacidade do Inversor Sunny Island 3.0M.	67
Tabela 6 – Resultados dos ensaios do compressor (Fonte: Silva, 2017).	70
Tabela 7 – Configuração do sistema para o CASO 1.	80
Tabela 8 – Valores de LVS e Vfloat para o CASO 1.	80
Tabela 9 – Variação do balanço de energia para o CASO 1.	82
Tabela 10 – Configuração do sistema para o CASO 2.	83
Tabela 11 – Valores de LVS e Vfloat para o CASO 2.	83
Tabela 12 – Variação do balanço de energia para o CASO 2.	85
Tabela 13 – Configuração do sistema para o CASO 3.	86
Tabela 14 – Valores de LVS e Vfloat para o CASO 3.	86
Tabela 15 – Variação do balanço de energia para o CASO 3.	88
Tabela 16 – Configuração do sistema para o CASO 4.	89
Tabela 17 – Valores de LVS e Vfloat para o CASO 4.	89
Tabela 18 – Variação do balanço de energia para o CASO 4.	91
Tabela 19 – Configuração do sistema para o CASO 5.	92
Tabela 20 – Valores de LVS e Vfloat para o CASO 5.	92
Tabela 21 – Variação do balanço de energia para o CASO 5.	94
Tabela 22 – Resumo dos casos analisados.	95
Tabela 23 – Eficiência do sistema com 1 reformador.	97
Tabela 24 – Eficiência do sistema com 2 reformadores.	98
Tabela 25 – Custo dos equipamentos.	100
Tabela 26 – Custo total dos equipamentos para o CASO 1.	101
Tabela 27 – Custo total dos equipamentos para o CASO 2.	101
Tabela 28 – Custo total dos equipamentos para o CASO 3.	102

Tabela 29 – Custo total dos equipamentos para o CASO 4.103Tabela 30 – Custo total dos equipamentos para o CASO 5.103Tabela 31 – Custo total dos equipamentos para o CASO 1-PV.104Tabela 32 – Custo total dos equipamentos para o CASO 2-PV.105Tabela 33 – Resumo dos casos analisados.107

1. Introdução

O presente trabalho aborda a simulação de um sistema híbrido de geração de energia baseado em fontes renováveis de energia para atender a pequenas comunidades isoladas da rede de distribuição de energia elétrica. O sistema utiliza energia solar e etanol como fontes primárias de energia e o armazenamento se dá em baterias e cilindros de hidrogênio (H₂) comprimido.

A ANEEL define o sistema que atende a um usuário de baixa demanda isolado da rede elétrica como SIGFI – sistema individual de geração de energia elétrica com fonte intermitente. Este trabalho foi realizado com base no SIGFI45, no qual o fornecimento de energia é de 45 kWh por mês. De maneira similar, a ANEEL define ainda o microssistema isolado de geração e distribuição de energia elétrica – MIGDI para pequenas comunidades em regiões remotas. Este sistema foi inicialmente idealizado para o fornecimento por meio de um microssistema do tipo SIGFI45, equivalente a 1,5 kWh por dia ou 45 kWh por mês. Doravante o fornecimento de energia dado por um microssistema SIGFI45 será considerado e nomeado como um usuário SIGFI45. A Figura 1 apresenta o perfil de carga SIGFI45. As análises realizadas utilizam como base os resultados experimentais da integração do sistema previamente realizado no projeto "Sistema Integrado de Fornecimento de Energia Elétrica a Sistemas Isolados da Rede, através do Uso de Células a Combustível e Combustível Renovável (Projeto CaCRefEtOH)", em uma parceria entre a PUC-Rio e a empresa Dresser-Rand Guascor do Brasil.



Figura 1 – Perfil de carga SIGFI45 (Adaptado de Silva, 2017).

1.1. Objetivo

O objetivo deste trabalho foi realizar a simulação de um sistema híbrido de geração de energia para atender a pequenas comunidades isoladas da rede elétrica, utilizando apenas fontes renováveis de energia. O sistema inicial é composto por painéis fotovoltaicos, um reformador de etanol para produção de hidrogênio, um banco de baterias, um inversor, um compressor de hidrogênio e uma unidade de células a combustível doravante denominada célula a combustível.

Com base no sistema já existente, foram analisados os subsistemas de geração e armazenamento de energia com o intuito de verificar a viabilidade técnica da duplicação de cada componente. Após a aquisição das informações necessárias, foi construído um simulador do sistema em Excel e VBA. Foram estudados diferentes casos com ampliação do sistema para que possa atender ao maior número possível de unidades consumidoras, gerando novas configurações do sistema para que atendam à demanda de energia de uma pequena comunidade isolada.

Por fim foram avaliados 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.

1.2. Motivação

O crescimento da demanda de energia no mundo está no centro das atenções e discussões internacionais. Juntamente com o aquecimento global e a redução das emissões, a procura por satisfazer uma crescente demanda global de energia é uma das maiores preocupações em todo o mundo. As fontes renováveis de energia têm recebido cada vez mais atenção e tem apresentado um crescimento acentuado nos últimos anos. Além disso as previsões são de que o crescimento continue nas próximas décadas, diminuindo a participação das fontes não renováveis.

O U.S. Energy Information Administration (EIA), no International Energy Outlook 2016, apresenta a projeção do consumo mundial de energia até 2040, conforme mostra a Figura 2. As energias renováveis são fonte de energia de crescimento rápido do mundo ao longo do período projetado, em uma média de 2,6% ao ano entre 2012 e 2040.





Além disso, no Brasil a parcela da energia vinda de fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica é ainda muito pequena e existe uma grande dependência da energia hidráulica e de combustíveis fósseis. As usinas hidrelétricas são responsáveis por 64% da geração de energia no país, segundo dados do Ministério de Minas e Energia (Balanço Energético Nacional – BEN 2016).

No contexto da geração de energia, a tendência é de crescimento para a chamada geração distribuída, aquela na qual a geração elétrica é realizada junto ou próxima do consumidor independente da potência. Estes consumidores estão conectados à rede de distribuição de energia elétrica e, quando há abundância de energia em seu sistema ele injeta na rede e vende energia, podendo comprar da rede quando sua demanda superar sua produção.

Por outro lado, o consumidor que está desconectado da rede elétrica fica fora deste avanço e continua dependente de sistemas autônomos de geração de energia. Os consumidores de regiões remotas, chamados de *offgrid*, ou seja, fora da rede, necessitam de sistemas autossuficientes para o suprimento de energia e, na maioria das vezes, utilizam grupos geradores à Diesel. Estes usuários são importantes *players* no mercado futuro de energia, onde há espaço para a implementação de novos sistemas geradores baseados em energias renováveis. A Figura 3 apresenta a configuração de um sistema *ongrid*, ou seja, conectado à rede de distribuição. Neste caso o sistema permite comprar da rede quando a demanda é maior que a geração local de energia ou vender energia para a rede quando há excesso de energia sendo gerada. A Figura 4 apresenta o conceito de um consumidor *offgrid*, isto é, aquele que não está conectado à rede de distribuição de energia elétrica. Este consumidor, portanto, não tem a disponibilidade de comprar ou vender para a rede, sendo assim ainda mais dependente dos sistemas de armazenamento.



Figura 3 – Conceito de um sistema *ongrid* (Adaptado de White Paper – Electrical Energy Storage, IEC, 2011).



Figura 4 – Conceito de um sistema *offgrid*. (Adaptado de White Paper – Electrical Energy Storage, IEC, 2011).

Algumas aplicações em potencial são os sistemas remotos de telecomunicação, instalações de bombeamento de água, residências ou comunidades inteiras isoladas, para as quais a conexão à rede é muito dispendiosa ou impossível (Gray *et al.*, 2011).

Os sistemas *offgrid* de produção de energia com o uso de energias renováveis podem contribuir para o objetivo de, em 2050, reduzir as emissões de carbono em 80% em relação a 1990. Tais sistemas estão se tornando cada dia mais acessíveis. A quantidade de energia gerada a partir de células fotovoltaicas poderia ultrapassar a energia gerada a partir do carvão em 2050, chegando a atingir 27% do suprimento mundial de energia e, juntamente com a energia eólica e a hidráulica, as energias renováveis poderiam compor 79% do total (Scamman *et al.*, 2015).

Um segundo ponto importante com relação a este tipo de consumidor está relacionado com o custo de implantação da rede elétrica. Em determinados locais

muito afastados o custo de instalação da rede de distribuição pode impedir que pessoas nestas comunidades tenham acesso à energia elétrica. Concomitantemente, existem diversos locais afastados da rede elétrica em todo o mundo e em alguns países há uma grande parcela da população sem acesso à energia elétrica. Sendo assim, torna-se de fato muito relevante o desenvolvimento de novos sistemas de energias renováveis que atendam a estas comunidades *offgrid*.

1.3. Organização do trabalho

O trabalho está dividido em sete capítulos.

O capítulo um se dedica à introdução.

O capítulo dois apresenta a revisão bibliográfica realizada.

O capítulo três aborda o sistema híbrido de geração de energia, o projeto conceitual e experimental e o simulador do sistema.

O capítulo quatro apresenta a análise dos subsistemas de geração e armazenamento de energia.

O capítulo cinco aborda a ampliação do sistema híbrido de geração de energia.

O capítulo seis apresenta a análise dos custos de produção de energia com a ampliação do sistema.

O capítulo sete traz a conclusão do trabalho.

2. Conceitos teóricos

2.1. Armazenamento de energia

Com o crescimento da participação das fontes renováveis intermitentes de energia no fornecimento mundial, torna-se cada dia mais importante o assunto de armazenamento de energia. As fontes intermitentes são classificadas como não despacháveis, isto é, aquela em que não há controle da geração de energia e depende das condições climáticas. De outro lado estão as fontes despacháveis, como as usinas hidrelétricas por exemplo, nas quais existe o controle da produção de energia independentemente das condições climáticas.

Um fato importante é que o preço da energia elétrica é maior em horários de maior demanda do que em períodos de menor demanda. Desta maneira o armazenamento de energia torna-se importante para diminuir o custo para o usuário nos horários de pico, além de ser responsável pela estabilização do fornecimento de energia para os usuários. Além disso, a intermitência de fontes como a solar fotovoltaica e a eólica prejudica a operação do sistema, levando ao "desperdício de energia" em períodos em que há grande disponibilidade destas fontes e baixa demanda e levando também à falta do fornecimento de energia elétrica em determinados períodos. O excedente nos horários de baixa demanda pode ser armazenado e utilizado para complementar o suprimento da demanda das unidades consumidoras em horários de maior consumo ou em momentos em que a fonte não esteja disponível, por exemplo, a energia solar, que não está disponível à noite. O rumo atual do desenvolvimento na área de sistemas autônomos de geração de energia elétrica torna o armazenamento uma peça chave para uma maior utilização e aproveitamento das fontes renováveis, redução no uso de combustíveis fósseis e desenvolvimento da microgeração de energia.

Atualmente existem ainda inúmeros locais que não tem conexão com a rede de distribuição de energia elétrica e os sistemas utilizados nestes locais são, geralmente, baseados na queima de combustíveis fósseis. Os sistemas baseados em energias renováveis, principalmente solar e eólica, estão agora entrando neste setor. O armazenamento de energia é o grande desafio a ser superado no que tange a geração de energia elétrica por fontes renováveis e sua disponibilidade a longo prazo (Abdin *et al.*, 2015).

Algumas fontes renováveis de energia como a solar e a eólica, embora sejam fontes limpas e de grande potencial energético, sofrem com o problema da intermitência. Os painéis solares captam a energia ao longo do dia e, portanto, recebem uma quantidade variável de energia, tendo um pico em torno do meio do dia e nenhuma geração no período da noite. A Figura 5 mostra o perfil típico de funcionamento de um sistema baseado em energia solar ligado à rede de distribuição. É possível verificar quando há produção em excesso e a energia é injetada na rede e, por outro lado, quando a demanda é maior do que a produção de energia, a energia é comprada da rede para complementar o fornecimento.



Figura 5 – Perfil de funcionamento de um sistema baseado em energia solar ligado à rede de distribuição. (Adaptado de Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy, IEA, 2014)

Além disso, em dias nublados ou chuvosos o usuário não pode depender exclusivamente da energia vinda dos painéis para alimentar uma residência ou uma pequena comunidade. De forma similar, a energia eólica depende da continuidade dos ventos e muitas vezes deixam de produzir uma quantidade razoável de energia devido à falta de vento. Outro fator importante é a questão do fornecimento, pois, se o sistema de energia eólica ou solar está produzindo e não há demanda, esta energia em excesso precisa ser injetada na rede elétrica. Em casos onde não há ligação com a rede elétrica, ou ainda em sistemas de backup para uma residência, um sistema integrado de armazenamento de energia se torna necessário.

Recentemente os sistemas híbridos de geração de energia baseados em energias renováveis estão recebendo uma grande atenção em todo o mundo. Tais sistemas incluem em suas configurações os componentes de produção de energia, armazenamento, sistema de distribuição CA ou CC, conversores, filtros e sistemas de controle de carga, que podem estar conectados a diferentes arquiteturas (Mezzai *et al.*, 2014; Rekioua *et al.*, 2014).

Existem atualmente diversas formas de armazenamento de energia, variando de acordo com o tipo de aplicação, a potência necessária e o tempo de resposta que o sistema necessita. Os meios de armazenamento de energia são (Ferreira *et al.*, 2013):

- Bombeamento hidráulico;
- Ar comprimido;
- Baterias (chumbo-ácido, níquel, lítio, sódio-enxofre, zebra)
- Baterias de fluxo;
- Baterias metal-ar;
- Volantes de inércia;
- Supercondutores magnéticos;
- Supercapacitores;
- Hidrogênio;
- Armazenamento térmico.

A Figura 6 mostra a maturidade das tecnologias de armazenamento de energia. Dentre as diversas formas de armazenamento, é possível verificar que o hidrogênio é uma tecnologia ainda em desenvolvimento. O hidrogênio pode ser



utilizado como vetor energético em conjunto com diferentes fontes renováveis de energia e será a principal forma de armazenamento de energia neste trabalho.

Figura 6 – Grau de maturidade das principais tecnologias de armazenamento energético (Adaptado de Technology Roadmap: Energy Storage, IEA, 2014).

2.2. O hidrogênio como vetor energético

Um dos assuntos que é amplamente discutido com relação à geração de energia é a descentralização ou os chamados sistemas de geração distribuída. Um sistema descentralizado é aquele no qual a geração elétrica é realizada junto ou próxima do consumidor independente da potência. Estes consumidores estão conectados à rede de distribuição de energia elétrica e, quando há abundância de energia em seu sistema ele injeta na rede e vende energia, podendo comprar da rede quando sua demanda superar sua produção.

Atualmente existe uma abundante literatura discutindo estes sistemas descentralizados de energia em diversas configurações, dependendo da fonte de geração de energia, o meio de armazenamento e transportador. O transportador de energia pode ser o próprio meio de armazenamento, como nas baterias, ou pode ser transformado para que seja armazenado em uma outra forma para utilização posterior, como uma célula a combustível. Para a energia solar fotovoltaica como para a energia eólica, a eletricidade e o hidrogênio são os portadores, ou vetores, por meio dos quais a energia capturada é entregue (Eriksson e Gray, 2017).

Devido às suas características e versatilidade, o hidrogênio está em ascensão como uma alternativa para substituir os combustíveis fósseis no longo prazo, uma vez que pode ser gerado a partir de fontes renováveis. O hidrogênio é mundialmente aceito como um transportador eficiente para energia limpa por ser livre de carbono, por sua combustão produzir apenas água como subproduto e por possuir um elevado poder calorífico em comparação ao petróleo e outras fontes, como visto na Tabela 1.

Combustível	Poder calorífico (MJ/kg)
Hidrogênio	120
Gás natural liquefeito	54,4
Propano	49,6
Gasolina de aviação	46,8
Gasolina automotiva	46,4
Diesel automotivo	45,6
Etanol	29,6
Metanol	19,7

Tabela 1 – Poder calorífico	o dos combustíveis por unidad	e de massa (Adaptado de
	Dutta, 2014).	

A Figura 7 apresenta um modelo esquemático de um sistema que utiliza o hidrogênio. Na parte superior um esquema de um sistema de geração de energia no qual as rotas de produção e uso do hidrogênio e da eletricidade estão em paralelo, alimentando simultaneamente o eletrolisador e a carga. Na parte inferior da figura é apresentado um sistema no qual as rotas do hidrogênio e da eletricidade estão em série, ou seja, a fonte (eólica/solar) alimenta o eletrolisador e este alimenta a carga.



Figura 7 – Esquema de sistemas de energia renovável baseados em energia solar fotovoltaica e/ou eólica (Adaptado de Eriksson e Gray, 2017).

2.3. Sistema de Energia Atual e Futuro

A Figura 8 apresenta um esquema de como é o sistema de energia atualmente e como pode ser no futuro com o desenvolvimento e integração da tecnologia do hidrogênio. No futuro o hidrogênio pode se tornar um dos principais vetores energéticos e desempenhar um papel central, interligando toda a infraestrutura de transmissão e distribuição de energia, aumentando a flexibilidade operacional no futuro em um sistema de energia de baixo carbono.



Figura 8 – Sistema de energia atual e futuro (Adaptado de Technology Roadmap: Hydrogen and Fuel Cells, IEA, 2015).

2.4. Células a combustível

A utilização do hidrogênio como vetor energético está fortemente ligada ao desenvolvimento das células a combustível. Uma célula a combustível é um dispositivo eletroquímico capaz de converter energia química (hidrogênio) diretamente em energia elétrica e calor de forma eficiente e sustentável. O sistema é composto por três componentes: ânodo, cátodo e eletrólito. O diagrama esquemático de uma célula a combustível é apresentado na Figura 9.



Figura 9 – Diagrama esquemático de uma célula a combustível do tipo PEMFC (Adaptado de Abdin *et al.*, 2015).

A conversão é realizada por meio de duas semi-reações eletroquímicas nos dois eletrodos, ou seja, a oxidação no ânodo e redução no cátodo, dadas pelas Eq. (1) e (2). Utilizando-se o hidrogênio como combustível as reações são (Fonte: Linardi, 2010):

$$2 H_2 + 4 H_2O \rightarrow 4 H_3 O_+ + 4 e^- (\hat{a}nodo)$$
(1)

$$O_2 + 4 H_3O^+ + 4 e^- \rightarrow 6 H_2O \quad (c\acute{a}todo) \tag{2}$$

Existem diversos tipos de células a combustível, dependendo do tipo de combustível, do eletrólito que utilizam e sua temperatura de operação. As células do tipo AFC (alcaline fuel cell), PEMFC (próton exchange membrane fuel cell), DMFC (direct methanol fuel cell) e PAFC (phosphoric acid fuel cell) são as células de baixa temperatura de operação. As células do tipo MCFC (molten carbonate fuel cell) e SOFC (solid oxide fuel cell) são as células de alta temperatura de operação. A Tabela 2 apresenta uma comparação entre os principais tipos de células a combustível.

Tino	Flotrólito	Faixa de	Principais vantagons	Principais	Aplicaçãos
Tipo	Elettonto	Temperatura	T Thicipais vantagens	devantagens	Apricações
				Sensível a CO ₂ ;	Espaçonaves;
AFC	КОН	60 - 90	Alta eficiência	Remoção de água;	Aplicações
				Gases ultrapuros	espaciais
PEMFC	Polímero; Nafion	80 - 90	Altas densidades de potência e eficiências; Operação flexível; Robustas	Custo da membrana e catalisador; Contaminação da Pt por CO (tolerância de 100 ppm)	Veículos; Espaçonaves; Unidades estacionárias
PAFC	H ₃ PO ₄	160 - 200	Maior desenvolvimento tecnológico	Controle da porosidade do eletrodo; Sensibilidade a CO (tolerância de 1%) Eficiência limitada pela corrosão	Unidades estacionárias; Cogeração eletricidade/calor
MCFC	Carbonatos fundidos	650 – 700	Tolerância a CO/CO ₂ ; Eletrodos a base de Ni; Reforma interna na célula	Problemas de materiais; Necessidade de reciclagem de CO ₂ ; Interface trifásica de difícil controle; Corrosão	Unidades estacionárias; Cogeração eletricidade/calor
SOFC	ZrO ₂	800 - 1000	Alta eficiência; Cinética favorável; Reforma interna	Problemas de materiais; Problemas de expansão térmica; Necessidade de pré- reforma	Unidades estacionárias; Cogeração

Tabela 2 – Principais tipos de células a combustível (Fonte: Linardi, 2010).

2.5. Métodos de obtenção do H₂

Existem diversas formas de produção a partir das quais se obtém o H_2 , tanto baseadas em fontes renováveis quanto em combustíveis fósseis. Entre as tecnologias atualmente disponíveis e em uso, estão a eletrólise, reforma de vapor de carvão e gás natural, entre outros, porém, a fonte mais utilizada para produção de hidrogênio ainda são os combustíveis fósseis. A eletrólise, em comparação com os métodos não renováveis, é um método limpo, porém com elevado custo devido ao seu alto consumo elétrico.

Neste ponto torna-se conveniente o uso de fontes renováveis como a solar e a eólica para a geração de energia elétrica para a alimentação do sistema de produção de H₂, que pode ser armazenado e utilizado posteriormente. Assim é possível resolver a questão da intermitência na geração de energia solar ou eólica com a utilização do hidrogênio como meio de armazenamento ao mesmo tempo que se utiliza de fontes renováveis para a alimentação da grande demanda de energia para produção do H₂.

2.6. O etanol brasileiro

Uma alternativa para a obtenção do gás hidrogênio é através da biomassa, como: etanol, lixo urbano, rejeitos da agricultura, etc. Em especial, no caso do Brasil, o etanol apresenta um grande potencial para produção de H_2 , devido à grande produção de cana de açúcar no país e, portanto, à disponibilidade do combustível em praticamente todo o território nacional e por ser um combustível renovável.

A produção de energia do etanol brasileiro é de 9 Joules renováveis para cada 1 Joule não renovável utilizado em sua produção (Fonte: Linardi, 2010). Além disso, por ser um combustível líquido, com uma infraestrutura já montada e de fácil transporte e armazenamento, o etanol apresenta-se como uma ótima opção para a produção de hidrogênio no país.

Além da possibilidade da oxidação direta do etanol em células a combustível, existe a opção de utilizá-lo de forma indireta, como fonte de produção de H₂. Portanto, o etanol torna-se muito importante no desenvolvimento dos sistemas de energias renováveis no Brasil e uma promissora fonte renovável de produção de hidrogênio.

O processamento do etanol para produção de H_2 ainda está em estágio de desenvolvimento. Os reformadores de etanol ainda são objetos de pesquisa tanto no Brasil quanto no exterior e os métodos atualmente considerados para a produção de H_2 a partir do etanol são: Reforma por oxidação parcial, Reforma autotérmica e Reforma a vapor. A Tabela 3 apresenta as reações de cada processo.

Tabela 3 – Reações dos processos de obtenção de H₂ por reforma de etanol (Fonte: Linardi, 2010).

Processo de reforma	Reação
Oxidação parcial	$CH_3CH_2OH_{(v)} + 3/2 O_{2(g)} \rightarrow 2CO_{2(g)} + 3H_{2(g)}$
Autotérmica	$CH_{3}CH_{2}OH_{(v)} + 2H_{2}O_{(v)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow 2CO_{2(g)} + 5H_{2(g)}$
A vapor	$CH_3CH_2OH_{(v)} + 3H_2O_{(v)} \rightarrow 2CO_{2(g)} + 6H_{2(g)}$

2.7. Formas de armazenamento do hidrogênio

Os subsistemas de armazenamento de energia são parte importante do sistema integrado de geração de energia e um ponto chave a ser desenvolvido em busca da utilização do hidrogênio em larga escala. A produção, o armazenamento, o transporte e o uso em quantidades grandes o suficiente para competir com os combustíveis fósseis atualmente são alguns dos desafios a serem enfrentados no uso do hidrogênio.

Existem diversas formas de armazenar o hidrogênio e, entre elas, as tecnologias consideradas mais promissoras são:

- Gás hidrogênio comprimido em cilindros de alta pressão. Armazenado em pressões entre 35 e 70 MPa. Disponível no mercado, porém tem um alto custo devido à alta pressão de trabalho. Alto Consumo energético para pressurizar o gás;
- Criogenia Hidrogênio liquefeito. Armazenado à pressão de 0,2 MPa e temperatura de -253°C. Disponível no mercado, mas tem um alto custo devido às temperaturas extremamente baixas e à energia gasta na liquefação;
- Armazenamento em estado sólido. O hidrogênio é absorvido ou adsorvido em hidretos metálicos, hidretos complexos, hidretos químicos, carbono e materiais de grande área superficial. Tecnologia em desenvolvimento e disponível no mercado. Armazena em pressões entre 0,1 e 6 MPa.

O armazenamento nas formas líquida e sólida já está disponível comercialmente, porém o método mais simples e mais amplamente utilizado é o gás comprimido. O gás hidrogênio possui uma alta densidade de energia por unidade de massa, se comparado com hidrocarbonetos, porém possui uma pequena densidade de energia por unidade de volume, o que faz com que seja necessária a aplicação de altas pressões no armazenamento do H₂ na forma gasosa. Este método, ainda que esteja bem estabelecido e difundido, pode ter custos elevados com transporte, caso seja necessário recarrega-los em um local distante do seu uso final. Portanto, a produção local de H₂ se faz necessária, podendo assim suprir continuamente o sistema de produção de energia.

2.8. Sistemas híbridos de geração de energia

Os sistemas híbridos de geração de energia são aqueles que combinam duas ou mais fontes de energia no mesmo sistema. Devido à característica intermitente de algumas formas de energia, como a solar e a eólica, um sistema híbrido garante a continuidade do fornecimento no momento em que estas fontes fornecem pouca ou nenhuma energia.

O armazenamento de energia possui um importante papel nos sistemas híbridos de geração de energia, uma vez que este é o vetor que permite a "estabilização" do fornecimento de energia ao usuário final. Estes são os sistemas mais adequados para uso em locais remotos, ou seja, desconectados da rede elétrica (*offgrid*).

Diversos tipos de sistemas já foram propostos e estudados, incluindo sistemas de base renovável ou não. Os sistemas mais amplamente estudados para aplicações remotas são baseados em energia solar fotovoltaica (PV), turbinas eólicas, energia hidráulica, células a combustível e geradores a diesel, ou combinações destes. No caso de instalações que utilizam células a combustível, vários podem ser os combustíveis utilizados em sua alimentação, incluindo fontes não renováveis, como é o caso do gás natural. Devido à versatilidade do hidrogênio, seu alto poder calorífico por unidade de massa e por ser uma forma renovável de energia, o hidrogênio é mundialmente aceito como um transportador eficiente para energia limpa e, portanto, sistemas que utilizam o hidrogênio como vetor energético apresentam um grande potencial para sistemas híbridos de produção de energia, especialmente aqueles que produzem localmente o H₂ a ser utilizado, armazenando- o e convertendo-o posteriormente em energia elétrica.

Das et al., (2017) fizeram uma análise técnico-econômica de um sistema híbrido baseado em energias renováveis projetado para atender a uma carga predeterminada. Eles analisam um sistema baseado em fontes renováveis com a solar e a eólica em comparação com um gerador a diesel. Os três diferentes sistemas considerados foram PV/baterias/CaC, PV/bateria e um sistema a diesel. Os autores não consideraram um sistema híbrido com a utilização do diesel em paralelo por se tratar da busca por um sistema totalmente renovável para a substituição dos sistemas

a diesel. A célula a combustível utiliza hidrogênio proveniente da eletrólise para evitar os problemas de transporte de combustível. De acordo com os autores, a substituição do sistema a diesel por um sistema baseado em baterias e painéis fotovoltaicos é possível, porém a utilização de um sistema com eletrolisador tem custos ainda muito elevados. A Figura 10 mostra as diferentes configurações avaliadas por (Das *et al.*, 2017).



Figura 10 – Diferentes configurações avaliadas por Das *et al.*, (2017) (Adaptado de Das et al., 2017).

O trabalho de Stojković e Bakić, (2016) também fez uma avaliação técnica e econômica de diferentes sistemas híbridos baseados em fontes renováveis. Os autores analisaram três sistemas para aplicação em áreas remotas, especificamente para atender a finalidades de baixo consumo, como estações de telecomunicações, residências, instalações militares isoladas, entre outros. O trabalho analisou a atuação das fontes renováveis intermitentes em conjunto com baterias de chumboácido para armazenamento de curto prazo e a utilização do H₂ como armazenamento de longo prazo, por meio da utilização de um eletrolisador, tanques de hidrogênio e célula a combustível. A Figura 11 a) apresenta o diagrama esquemático do sistema PV/eólica/baterias, Figura enquanto a 11 b) apresenta sistema 0 PV/eólica/baterias/hidrogênio.

Segundo os resultados do estudo, o sistema que utiliza o hidrogênio como forma de armazenamento leva vantagem sobre o outro sistema estudado por minimizar o uso de baterias, embora elas ainda sejam necessárias, além de utilizar no acionamento do eletrolisador 294 kWh de energia que de outra forma não seriam aproveitados. Os autores concluíram que o custo do sistema que inclui a utilização do hidrogênio como vetor energético é 25% maior, porém este tipo de sistema híbrido se torna justificável, uma vez que este tipo de instalação remota necessita de alta confiabilidade no sistema.



Figura 11 – a) Sistema PV/eólica/baterias; b) PV/eólica/baterias/hidrogênio. (Adaptado de Stojković e Bakić, 2016).

O estudo de Poggi *et al.*, (2010) analisou a redução dos picos de demanda de energia em um sistema isolado com a utilização de fontes renováveis. O sistema baseia-se em energia solar fotovoltaica, eletrolisador e uma célula a combustível de 50 kW, capaz de atender sozinha ao pico máximo diário de demanda. Os autores ressaltaram a importância de um bom dimensionamento do sistema, analisando sistemas com diferentes autonomias (3,5, 7 e 10 dias) para simular armazenamento a curto, médio e longo prazos. A massa mínima necessária de H₂ para cada configuração foi calculada, para que o sistema opere sem sofrer quedas no fornecimento de energia.

Lagorse *et al.*, (2008) estudaram três diferentes configurações de sistemas híbridos com painéis fotovoltaicos e células a combustível, conforme mostra a Figura 12, avaliando a questão econômica. Os autores afirmam que, com um dimensionamento adequado, é possível fornecer energia em uma instalação autônoma com um custo aceitável. A configuração (a), na qual não há o eletrolisador e o hidrogênio não é produzido localmente, apresenta um custo de 0,519 €/kWh, enquanto a configuração (b) (com eletrolisador) apresenta um custo de 4,943 €/kWh e a configuração (c) (com eletrolisador e baterias) apresenta um
custo de 0,645 €/kWh. Ainda segundo os autores, devido ao alto custo, atualmente a configuração (b) não é financeiramente viável, mas pode vir a ser uma opção no futuro com a diminuição dos custos. A Configuração (a) é uma alternativa real ao sistema clássico PV/bateria/gerador a diesel.



Figura 12 – Configurações avaliadas por Lagorse *et al.*, (2018) (a) PV, bateria,
CaC alimentada por um tanque de H₂; (b) PV, CaC, eletrolisador e tanque de H₂
(c) PV, bateria, CaC, eletrolisador e tanque de H₂ (Lagorse *et al.*, 2018).

O trabalho de Guinot *et al.*, (2015) também avaliou um sistema híbrido de geração de energia desconectado da rede elétrica à base de painéis fotovoltaicos e hidrogênio. O sistema conta com os subsistemas de eletrólise, armazenamento de H₂, armazenamento em baterias de lítio e uma célula a combustível. Os autores compararam este sistema com outros dois casos: painéis fotovoltaicos/gerador diesel e Painéis fotovoltaicos/baterias. Os autores ressaltam a importância do subsistema de produção/armazenamento/conversão do hidrogênio na redução do custo da energia produzida.

No Brasil os sistemas híbridos de geração de energia também estão sendo avaliados no que tange às aplicações fora da rede elétrica. O estudo de Silva *et al.*, (2013) simulou o dimensionamento de um sistema de painéis fotovoltaicos/célula a combustível/baterias para utilização em uma pequena comunidade isolada da região amazônica. Os autores focaram em questões técnicas e financeiras de um projeto piloto criado em uma área de proteção ambiental, localizada no estado do Tocantins, Brasil. Seus resultados mostram, após a análise dos resultados, que este sistema híbrido não é economicamente viável devido aos altos custos da tecnologia do hidrogênio no Brasil e que o sistema painéis fotovoltaicos/baterias apresentou o menor custo.

Embora a eletrólise seja o processo mais amplamente estudado, existem alternativas a esta forma de produção de H₂, como a biomassa. Sistemas híbridos de geração de energia podem ter configurações que incluam um processador de biomassa no lugar do eletrolisador, por exemplo, um reformador de etanol, equipamento que extrai o hidrogênio a partir do combustível líquido. Uma diferença bastante significativa está no consumo elétrico, que é muito maior no eletrolisador, configurando uma vantagem para o reformador. Embora esta seja uma tecnologia de alto custo e ainda em desenvolvimento, este tipo de sistema é bastante promissor e pode ser tornar viável com o passar do tempo e a evolução tanto da tecnologia quanto dos custos a ela associados. Wu et al., (2014) estudaram um sistema híbrido de geração de energia com a utilização de um reformador de etanol como forma de produção de hidrogênio em conjunto sistema de com 0 painéis fotovoltaicos/bateria/CaC. O H₂ produzido pelo reformador alimenta a célula a combustível do tipo PEMFC de 5 kW, que sustenta a carga durante a noite, enquanto os painéis fotovoltaicos atendem à carga durante o dia. Os autores concluem que um processador de combustível otimizado, utilizando etanol, pode produzir hidrogênio de alta pureza e que, além disso, a simulação mostra que este tipo de sistema pode produzir H_2 continuamente se houver etanol disponível.

Feroldi *et al.*, (2013) estudaram uma estratégia de gerenciamento de energia para um sistema de energia renovável baseado em energia solar, eólica e bioetanol e implementaram um modelo do sistema em plataforma Matlab/Simulink. Neste sistema o hidrogênio é produzido pelo reformador de bioetanol para alimentar uma célula a combustível do tipo PEM. Os autores propõem uma metodologia de dimensionamento baseada em algoritmos genéticos para otimizar este tipo de sistema. Parte da energia solar e eólica produzida é utilizada para alimentar o processo de reforma do bioetanol, aumentando a eficiência do sistema. Os autores ressaltam que a adição do reformador de etanol ao processo permite a diminuição no dimensionamento dos demais componentes, graças à inclusão de uma reserva extra de energia ao sistema, concluindo que a produção do H₂ a partir do bioetanol é uma alternativa favorável ao meio ambiente e que melhora o aproveitamento no uso das fontes energéticas. A Figura 13 apresenta o modelo estudado neste trabalho.



Figura 13 – Modelo do sistema híbrido utilizando energia solar/eólica/bioetanol estudado por (Adaptado de Feroldi *et al.*, 2013).

Lopes *et al.*, (2012) realizaram uma avaliação técnica e econômica de um sistema de energia para aplicação no Brasil, baseado em uma célula a combustível (PEMFC de 5 kW) alimentada com hidrogênio produzido por um reformador de etanol desenvolvido pelo Laboratório de Hidrogênio da Unicamp e pela Hytron. O sistema possui ainda um banco de baterias utilizado como um "buffer", armazenando eletricidade gerada pela CaC e fornecendo energia ao inversor de acordo com a carga. O banco de baterias é composto por 10 baterias de 12V/45Ah conectadas em série e a capacidade do inversor é de 6 kVA. A Figura 14 apresenta a instalação do sistema estudado.



Figura 14 – Instalação do sistema estudado por (Adaptado de Lopes et al., 2012).

Os autores enfatizam o cenário brasileiro por possuir um alto potencial para aderir às fontes renováveis de energia, como a hidráulica, a solar e a eólica, onde a hidráulica já fornece mais da metade da demanda do país.

Os resultados do estudo mostram que o preço do hidrogênio produzido pelo reformador de etanol é menor do que os preços do hidrogênio disponível no mercado brasileiro e que o custo da eletricidade produzida na célula a combustível é menor do que o de outras fontes, exceto se comparado à energia proveniente da rede elétrica. De acordo com os autores, embora esta tecnologia esteja ainda em desenvolvimento, a reforma do etanol parece uma solução promissora. Além disso, as reduções de custos são esperadas uma vez que a tecnologia está em desenvolvimento.

3. O sistema de geração de energia para sistemas isolados

3.1. Projeto conceitual e experimental do sistema

Este trabalho baseia-se em dados experimentais obtidos anteriormente no projeto "Sistema Integrado de Fornecimento de Energia Elétrica a Sistemas Isolados da Rede, através do Uso de Células a Combustível e Combustível Renovável (Projeto CaCRefEtOH)", em uma parceria entre a PUC-Rio e a empresa Dresser-Rand Guascor do Brasil. O projeto visa o desenvolvimento da tecnologia de geração distribuída de energia para atendimento a sistemas isolados da rede elétrica com a utilização de fontes renováveis de energia.

O sistema é composto por painéis fotovoltaicos, um banco de baterias, uma célula a combustível (CaC) do tipo PEM, um reformador de etanol para produção de H₂, um inversor de frequência, um compressor e cilindros de armazenamento de hidrogênio.

O objetivo do projeto era conceber um sistema híbrido de geração distribuída de energia utilizando apenas fontes renováveis. Para tanto, o etanol foi utilizado como matéria prima para produção de hidrogênio. Este hidrogênio é comprimido, armazenado e, posteriormente, convertido em energia elétrica de acordo com a demanda. A CaC junto com os painéis fotovoltaicos fornece energia para alimentar a carga do usuário e os componentes do próprio sistema (reformador e compressor). O projeto inicial foi construído nas instalações da PUC-Rio para atender a um perfil de carga baseado no padrão SIGFI45 (uma das classes de atendimento ANEEL para Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes - SIGFI), um consumidor de baixa demanda, que utiliza apenas 1,5 kWh/dia. O presente trabalho se concentra na ampliação do sistema proposto e na simulação da aplicação em pequenas comunidades isoladas de maior potência instalada. A Figura 15 apresenta o modelo inicial proposto para o sistema.



Figura 15 – Concepção do sistema integrado conforme submetido na proposta de projeto (Fonte: Silva, 2017).

A energia solar e o hidrogênio produzido pelo reformador de etanol são as fontes de energia do sistema. A CaC produz energia elétrica a partir do H₂ armazenado e alimenta as cargas do sistema (compressor e consumidor), enquanto os painéis fotovoltaicos carregam as baterias e complementam o atendimento às cargas do sistema, além de manter os equipamentos (inversores, controlador de frequência, transformador). A Figura 16 apresenta a configuração final do sistema, após as modificações propostas durante o projeto. Vale ressaltar a alteração feita no projeto inicial, que previa a energia solar alimentando diretamente o reformador, porém, neste novo modelo, o reformador entra como mais uma carga do sistema como um todo. Os subsistemas e os equipamentos estão descritos a seguir, juntamente com a avaliação de cada componente com a finalidade de ampliar o sistema para atender a uma pequena comunidade fora da rede elétrica. Para maiores informações sobre a integração e os experimentos realizados com o sistema integrado consultar o trabalho de (Fonte: Silva, 2017).



Figura 16 – Diagrama de blocos com ligações e conexões entre os equipamentos na configuração final do projeto (Adaptado de Silva, 2017).

3.2. Modelagem do simulador do sistema

Durante o Projeto CaCRefEtOH foram realizados os experimentos do sistema integrado e, a partir dos dados obtidos na caracterização energética dos equipamentos, desenvolveu-se um simulador capaz de emular o sistema integrado de fornecimento de energia atendendo a um usuário SIGFI45 (Fonte: Silva, 2017).

Neste trabalho um novo simulador foi desenvolvido, baseado nos mesmos princípios deste primeiro, porém com a ampliação gradual do sistema para atender a pequenas comunidades *offgrid* com a menor configuração possível. O simulador foi desenvolvido em Excel e Visual Basic for Applications.

Como descrito anteriormente, o sistema é formado por painéis fotovoltaicos, banco de baterias e célula a combustível como opções de fornecimento de energia elétrica e as cargas do sistema são compostas pelo usuário SIGFI45, pelo reformador e pelo compressor.

3.2.1. Baterias

Primeiramente o banco de baterias e a célula a combustível foram modeladas como como opções para alimentar a carga do perfil SIGFI45. A modelagem matemática das baterias baseou-se no trabalho de Jackey, (2007), que propõe um modelo com estrutura simples para baterias de chumbo-ácido. As constantes utilizadas no modelo foram baseadas no modelo de Jackey, (2007).

A Figura 17 apresenta o modelo de bateria utilizado a partir do qual foram calculadas as resistências internas da bateria (R_0 , R_1 , R_2).



Figura 17 – Modelagem da bateria (Adaptado de Silva, 2017).

O cálculo do estado de carga da bateria (SOC) se dá pelas Eq. (3), (4) e (5):

$$SOC = 1 - \frac{Q_e}{C(0,\theta)} \tag{3}$$

$$Q_{e ini} = (1 - SOC_{ini}) \cdot (Kt \cdot Kc \cdot C) \tag{4}$$

$$Q_{e_{t+1}} = Q_{e_{ini}} - I_t \cdot \Delta t \tag{5}$$

onde Q_e é a integral da corrente da bateria, em Ampères, que foi calculada segundo as Eq. (4) e (5), C (0, θ) é a capacidade da bateria e onde $Q_{e_{ini}}$ é a carga já extraída da bateria antes do início da operação, C é a capacidade da bateria em A·min, Kt e Kc são constantes, SOC_{ini} é o estado de carga da bateria, Δt é o tempo e I é a corrente da bateria.

As resistências internas da bateria (R_0 , R_1 e R_2), em Ohms, são calculadas pelas Eq. (6) a (10):

$$R_0 = R_{00} \left(1 + A_0 \cdot (1 - SOC) \right) \tag{6}$$

$$DOC = 1 - \frac{Q_e}{C(I_{avg}, \theta)} \tag{7}$$

$$C(I_{avg}, \theta) = \frac{K_c \cdot C_{0*} \cdot K_t}{1 + (K_c - 1) \cdot (I/I^*)^{\delta}}$$
(8)

$$R_1 = -R_{10} \cdot (\log(DOC)) \tag{9}$$

$$R_2 = R_{20} \frac{\exp(A_{21} \cdot (1 - SOC))}{1 + \exp(A_{22} \cdot I/I^*)}$$
(10)

onde SOC é o estado de carga da bateria, definido anteriormente, R_{00} é o valor de R_0 para um estado de carga de 100%; A_0 , A_{21} , A_{22} , R_{10} , R_{20} são constantes; DOC é a profundidade de carga; K_c , K_t e δ são constantes adimensionais; C_{0*} é a capacidade da bateria sem carga a 0°C; I^{*} é a corrente nominal da bateria em ampères; I é a corrente da bateria e θ é a temperatura.

Por fim, a tensão pode ser calculada através das Eq. (11) e (12):

$$V = N_B \cdot N_c \cdot (Em + (R_0 + R_1 + R_2) \cdot I)$$
(11)

$$Em = Em_0 - K_e \cdot (273 + \theta) \cdot (1 - SOC) \tag{12}$$

onde N_B é o número de baterias utilizadas (em série), Nc é o número de células contidas em cada bateria, Em é a tensão em circuito aberto da bateria em volts, Em₀ é a tensão em circuito aberto da bateria com carga completa em volts, Ke é uma constante em volts/°C, θ é a temperatura em °C e SOC é o estado de carga da bateria.

Para o modelo matemático da solução numérica para a corrente da bateria foi utilizado o método de Newton Raphson, Eq. (13), um método interativo que apresenta como objetivo estimar as raízes de uma função a partir de uma estimativa inicial, depois a derivada da função é calculada nesse ponto e sua interseção com o eixo das abscissas com o objetivo de se encontrar uma melhor raiz. O processo é iterativo e é repetido até que se chegue à raiz da equação. A modelagem em VBA é apresentada no ANEXO V. O esquema do circuito elétrico equivalente é apresentado na Figura 18.

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \text{ , onde } n \in \mathbb{N}$$
(13)



Figura 18 – Circuito elétrico equivalente do sistema híbrido de geração de energia elétrica (Baseado em Silva, 2017).

3.2.2. Célula a combustível (CaC)

A operação da unidade de células a combustível (CaC) é controlada pelo parâmetro Low Voltage Start (LVS), conforme indicado no manual da unidade da ReliOn utilizada, que indica o patamar de tensão no qual a célula é acionada, permanecendo ligada pelo período determinado pelo usuário. A potência de cada CaC (Pot_{cac}) é calculada pelas Eq. (14) e (15), onde, I_{cac} é a corrente da CaC, I é a corrente da bateria, V é a tensão calculada e Pot é a potência da carga a ser alimentada. O consumo específico, determinado experimentalmente no Projeto CaCRefEtOH é dado pela Eq. (16), enquanto o volume de H₂ consumido pela célula a combustível é dado pela Eq. (17):

$$Pot_{CaC} = V \cdot I_{CaC} \tag{14}$$

$$I_{CaC} = I + \frac{Pot}{V} \tag{15}$$

$$c_{cac} = 7 \cdot 10^{-8} \cdot Pot_{cac}^{2} + 0,001 \cdot Pot_{cac} + 0,2591$$
(16)

$$\forall_{CaC} = \frac{Pot_{CaC}}{c_{CaC}} \tag{17}$$

3.2.3. Cilindros de hidrogênio

Conforme a CaC é acionada, ela passa a ser alimentada pelo hidrogênio contido nos cilindros de armazenamento e, quando o reformador está na fase de produção de H₂, este fornece hidrogênio aos cilindros conforme mostrado na Figura 18. A pressão interna dos cilindros de armazenamento é calculada de acordo com a entrada e saída de massa, que é dada pelas Eq. (18) e (19), onde \dot{m}_e é a vazão mássica na saída do reformador de etanol, \dot{m}_s é a vazão mássica na saída dos

cilindros de H₂ que alimenta a CaC, $\dot{\forall}_{CaC}$ é a vazão volumétrica de hidrogênio consumida pela CaC em L(padrão)/s e ρ é a massa específica do hidrogênio em g/L.

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s \tag{18}$$

$$\dot{m}_s = \dot{\forall}_{CaC} \cdot \rho \tag{19}$$

A variação da massa contida nos cilindros a cada instante de tempo é calculada pela Eq. (20), onde m_t é a massa de hidrogênio num instante e m_{t+1} é a massa de hidrogênio contida nos cilindros no instante seguinte (t+1).

$$m_{t+1} = m_t + (\dot{m}_e - \dot{m}_s) \cdot \Delta t \tag{20}$$

A variação da pressão nos cilindros a cada instante de tempo é calculada pelas Eq. (21) e (22), onde n_{t+1} é o número de mols no instante t+1, T é a temperatura, \forall é o volume em litros de H₂ (a 20°C e 1 atm), M é a massa molar, R é a constante universal dos gases perfeitos e P_{t+1} é a pressão no cilindro no instante t+1.

$$n_{t+1} = \frac{m_{t+1}}{M}$$
(21)

$$P_{t+1} = \frac{n_{t+1} \cdot R \cdot T}{\forall} \tag{22}$$

3.2.4. Reformador

Quando o reformador está na fase de produção de hidrogênio há massa entrando nos cilindros e, portanto, aumentando a pressão nos mesmos, conforme descrito anteriormente. O volume de produção de H₂ na saída do reformador é dada pelas Eq. (23) e (24), onde, $Cons_{Ref}$ é o consumo elétrico do reformador em kWh, Δt é o tempo de produção de hidrogênio determinado pelo usuário, \forall_{Ref} é o volume de hidrogênio produzido e $Cons_{Ref}$ é o consumo do reformador durante a fase de produção de hidrogênio.

$$\forall_{Ref} = \frac{Cons_{Ref} - 3}{0,0002} \cdot 60 \tag{23}$$

$$Cons_{Ref} = 0.20 \cdot \Delta t \tag{24}$$

3.2.5. Compressor

O compressor é acionado para comprimir o gás hidrogênio produzido no reformador quando este entra na fase de produção. A Eq. (25) e (26) apresentam o cálculo do seu consumo elétrico, onde c_{comp} é o consumo específico do compressor em Wh/L, \forall_{prod} é a produção de hidrogênio no reformador em litros (a 20°C e 1 atm), Pot_{comp} é a potência consumida pelo compressor em kW e P_{ent} é a pressão na entrada do compressor, que foi fixada em 120 kPa.

$$Pot_{comp} = c_{comp} \cdot \forall_{prod} \tag{25}$$

$$c_{comp} = -0,0009 \cdot \left(\frac{P}{P_{ent}}\right)^2 + 0,0278 \cdot \left(\frac{P}{P_{ent}}\right) + 0,2639$$
(26)

3.2.6. Painéis fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos entram no simulador como uma fonte de energia elétrica para alimentação das cargas no sistema e/ou carregamento das baterias. A potência de entrada dos painéis fotovoltaicos é calculada a partir de dados reais de painéis similares aos utilizados no sistema, possibilitando a entrada de três dias típicos diferentes: dia sem nuvens, dia parcialmente nublado e dia nublado, conforme mostrado na Figura 19. Para os experimentos do Projeto CaCRefEtOH foram utilizados dois painéis fotovoltaicos de silício policristalino, com potência nominal máxima de 245 W e um painel fotovoltaico monocristalino, com potência máxima nominal de 250 W.



Figura 19 – Potência fornecida pelos painéis fotovoltaicos (Baseado em Silva, 2017).

Existem três diferentes modos de operação dos painéis fotovoltaicos, que dependem da tensão de flutuação (V_{float}) e da tensão de ciclagem (V_{bulk}). Tensão de flutuação é o nível de tensão no qual a célula a combustível tenta manter a tensão do barramento enquanto está ligada e a tensão de ciclagem é o valor de tensão aplicado sobre a bateria para equalização da carga nas células que compõem a bateria, denominada também tensão de equalização de carga. Nas baterias do tipo VRLA a tensão de flutuação encontra-se na faixa de 13,5 a 13,8 V e a tensão de ciclagem de 14,4 a 15,0 V. Os modos de operação possíveis são apresentados na Figura 20.



Figura 20 – Modos de operação dos painéis fotovoltaicos (Baseado em Silva, 2017).

Modo 1 – Modo de máxima potência

Se a tensão no barramento CC for menor que a tensão de ciclagem ou de flutuação, a potência máxima disponível nos painéis é fornecida ao sistema.

Modo 2 – Modo de tensão constante de ciclagem

Se a tensão do barramento CC atinge a tensão de ciclagem, o modo de máxima potência é interrompido e o funcionamento dos painéis passa a se comportar de forma parecida com a CaC, ou seja, se torna uma fonte de tensão constante.

Modo 3 - Modo de tensão constante de flutuação

Se o SOC está próximo de 100% e a corrente vinda dos painéis estiver entre 0 e 5 A, o painel entra no modo de tensão constante de flutuação, que se comporta da mesma forma que o Modo 2, porém a tensão passa a ser a de flutuação.

3.2.7. Inversor

O inversor de frequência é o componente que recebe a energia vinda dos painéis, das baterias e/ou da CaC, funcionando como um ponto central do fornecimento de energia do sistema. Como pode ser visto na Figura 21, a energia produzida pelos painéis e/ou pela CaC tem duas possibilidades de caminho: passar pelo inversor para alimentar as cargas do sistema ou carregar o banco de baterias. Dependendo da demanda de energia o banco de baterias pode atuar como acumulador de energia quando a produção dos painéis ou da CaC é maior que a demanda ou pode atuar como fornecedor de energia quando a produção é insuficiente.

A eficiência do inversor é variável e depende da carga a ser alimentada, sendo calculada pela Eq. (27) para cargas inferiores a 460 W e pela Eq. (28) para cargas maiores.

$$\eta_{inv} = -534,18 \cdot (Pot)^2 + 199,28 \cdot (Pot/2300) + 76,098$$
⁽²⁷⁾

$$\eta_{inv} = -2,4918 \cdot (Pot/2300)^2 + 0,7536 \cdot (Pot/2300) + 94,795$$
(28)

Onde Pot é a potência na saída do inversor, dada pela Eq. (29), onde $Pot_{SIGFI45}$ é a carga do usuário SIGFI45, Pot_{Ref} é a carga do reformador, Pot_{Comp} é a carga do compressor e η_{inv} é a eficiência do inversor.



Figura 21 – Modelo esquemático do simulador.

Para maiores informações sobre a modelagem matemática inicial do simulador do sistema desenvolvido no Projeto CaCRefEtOH, consultar o trabalho de (Fonte: Silva, 2017).

4. Análise dos subsistemas de geração e armazenamento de energia

Para analisar a possibilidade de ampliação do sistema um novo simulador foi desenvolvido a partir dos dados obtidos previamente no projeto CaCRefEtOH, visado atender um maior número de usuários SIGFI45, porém observando também a diminuição do custo de instalação por kWh para cada consumidor.

Foram analisados casos com um número crescente de usuários até atingir a capacidade de cada componente do sistema. Quando o limite de um equipamento era atingido, este era avaliado quanto à possibilidade de duplicação, resultando em um aumento gradual da potência instalada total do sistema. Além da necessidade de fornecimento de energia, foram consideradas também as limitações técnicas impostas por cada componente e o impacto sobre as demais partes do sistema, podendo ou não exigir a duplicação de um outro componente.

Cada etapa da ampliação do sistema é apresentada abaixo com seus respectivos resultados parciais e as simulações foram realizadas conforme o esquema mostrado na Figura 21.

4.1. Alteração dos parâmetros do reformador

O simulador desenvolvido no Projeto CaCRefEtOH já trazia as opções de ligar e desligar o reformador, horário de entrada em operação e tempo de produção de hidrogênio como dados de entrada. Ainda durante o projeto foi adicionada a opção de consumo elétrico durante a produção de H₂ para que fosse possível comparar situações com diferentes consumos.

Para aumentar o controle sobre as variáveis do reformador foram inseridos também os demais parâmetros: tempo de aquecimento e consumo durante o aquecimento; tempo de resfriamento e consumo durante o resfriamento; PCI do etanol e massa específica do etanol. A Figura 22 mostra os novos parâmetros de

Reformador						
On/Off	Ligado	PCI etanol (kWh/kg)	7,69			
Horário que liga	06.00	Massa específica	0,789			
(hh:mm)	06:00	etanol (kg/L)				
Tempo de aquecimento	02.00	Consumo	1000			
(hh:mm)	03:00	aquecimento (W)				
Tempo de produçao	Consumo		020			
(hh:mm)	06.00	produção (W)	929			
Tempo de resfriamento	01.20	Consumo	200			
(hh:mm)	01:30	resfriamento (W)	200			

entrada definidos para o reformador, onde apenas o PCI e a massa específica do etanol serão mantidos constantes.

Figura 22 – Dados de entrada do reformador.

Visto que o reformador adquirido para o projeto experimental não atendeu às condições de consumo esperadas, foi feita uma análise de sensibilidade com relação ao impacto do consumo elétrico durante a fase de produção de H_2 no reformador sobre o desempenho do sistema. Para isto todas as demais variáveis foram mantidas constantes: Carga alimentada = 1 SIGFI45; Horário de início 00:00; SOC inicial de 80%; Timer da CaC = 60 min; LVS = 50,5 V; painéis fotovoltaicos desligados; pressão inicial nos cilindros = 700 kPa; reformador ligado às 06:00 e produzindo durante 6 horas.

As Figuras 23 e 24 mostram, respectivamente, a variação da pressão nos cilindros de H_2 e o estado de carga (SOC) durante a simulação com os diversos valores de consumo durante a produção, partindo de 200 W (consumo esperado) até 929 W (consumo medido experimentalmente).

Através da simulação feita foi possível verificar que o aumento do consumo do reformador durante a fase de produção de hidrogênio influencia consideravelmente no armazenamento de energia tanto na bateria quanto nos cilindros de H₂. Pode-se observar também que, quando o consumo está em 929 W, a pressão nos cilindros de armazenamento cai constantemente e rapidamente esvaziaria os cilindros mesmo atendendo a uma carga baixa de apenas um SIGFI45.

Doravante, todas as simulações serão feitas considerando o consumo de 200 W na fase de produção, que é o consumo esperado para o reformador adquirido para o projeto, e serão mantidos os consumos na fase de aquecimento (1000 W) e resfriamento (200 W).



Figura 23 – Variação de pressão nos cilindros de H₂ de acordo com o consumo do reformador.



Figura 24 – Variação do estado de carga do banco de baterias de acordo com o consumo do reformador.

4.2. Aumento do número de usuários SIGFI45

Em seguida o simulador foi modificado para atender a um número variável de unidades consumidoras, possibilitando assim o aumento gradual da carga alimentada pelo sistema. Cada usuário SIGFI45 aqui referenciado corresponde ao perfil de carga apresentado na Figura 1 e a carga total a ser alimentada refere-se ao somatório do consumo dos usuários conectados ao sistema.

O objetivo inicial é de atender à maior quantidade possível de consumidores, visando o mínimo custo do kWh instalado por usuário e analisar a mínima configuração do sistema necessária para que atenda a esta demanda.

Foi analisado um caso utilizando os parâmetros do projeto anterior, onde os painéis estão ligados (sem nuvens), o reformador liga as 06:00 e produz hidrogênio durante 6 horas e os demais parâmetros mantidos constantes. A partir de então, o número de SIGFI45s foi modificado progressivamente. A variação da pressão nos cilindros é apresentada na Figura 25 e o SOC das baterias é apresentado na Figura 26.



Figura 25 – Variação de pressão nos cilindros de H₂ em função do número de consumidores (reformador produzindo por 6 horas).



Figura 26 – Variação do estado de carga em função do número de consumidores (reformador produzindo por 6 horas).

Com base nesses resultados foi possível observar que, ao aumentar o número de usuários SIGFI45, a energia armazenada nos cilindros de H₂ ao final de 24 horas cai consideravelmente. O sistema consegue atender a 2 usuários simultâneos e, neste caso, terminar o dia com o nível de H₂ nos cilindros maior que o inicial e com pouca variação no nível final da bateria para todos os casos. A partir da inclusão do terceiro SIGFI45 a pressão nos cilindros de armazenamento no final do dia é menor do que a pressão inicial, indicando que a energia gasta pelo sistema foi maior do que a energia produzida.

Pôde-se constatar que este modo de funcionamento, ligar às 06:00, produzir por 6 horas e desligar, não é viável para atender a uma carga maior. Sendo assim, todas as simulações adiante serão realizadas com o reformador operando continuamente, ligando às 00:00 e permanecendo ligado.

A Figura 27 e a Figura 28 apresentam, respectivamente, a variação da pressão nos cilindros e o SOC para o caso anterior, ligando-se o reformador no início da simulação e mantendo-o ligado durante todo o dia, mantendo os demais parâmetros iguais.



Figura 27 – Variação de pressão nos cilindros de H₂ em função do número de consumidores (reformador produzindo continuamente).



Figura 28 – Variação do estado de carga em função do número de consumidores (reformador produzindo continuamente).

Analisando estes resultados nota-se que o estado de carga do banco de baterias varia pouco e a pressão nos cilindros de H_2 no final de um dia é maior do que a pressão inicial para todos os casos, indicando que há acumulo de energia no sistema. Foram simulados casos com um número de até 7 consumidores pois, com estas configurações, 7 usuários já extrapolam a capacidade máxima da Célula a Combustível – CaC, que é de 2,2 kW.

4.3. Análise dos componentes

4.3.1. Painéis fotovoltaicos

Para os experimentos do Projeto CaCRefEtOH foram utilizados dois painéis fotovoltaicos de silício policristalino, com potência nominal máxima de 245 W e um painel fotovoltaico monocristalino, com potência máxima nominal de 250 W.

A entrada de energia vinda dos painéis fotovoltaicos no simulador foi alterada para que permitisse a variação do número de painéis. Agora, além de entrar com o dia típico, "Sem nuvens", "Parcialmente nublado", "nublado" ou "Painel desligado", o usuário entra também com a quantidade de painéis que deseja simular. O projeto original contava com três painéis fotovoltaicos, cada um gerando até 1,67 kWh ao longo de um dia ensolarado. A partir das modificações no simulador, o usuário pode alterar o número de painéis fotovoltaicos, fornecendo mais energia ao sistema. Porém, como o intuito do projeto é o armazenamento em forma de hidrogênio e não apenas utilizar energia solar para atender ao SIGFI45, será utilizado o menor número de painéis possível nas simulações com vários consumidores ligados ao sistema.

4.3.2. Cilindros de armazenamento de H₂

Sabendo que o compressor é uma das grandes cargas a serem alimentadas no sistema e que, quanto maior a pressão de armazenamento, maior o consumo do compressor, foi feita uma análise de sensibilidade referente à pressão de armazenamento.

Para esta simulação todos os dados de entrada foram mantidos constantes, exceto a pressão de armazenamento de H₂. Para esta simulação foram usados os seguintes dados de entrada: 6 consumidores SIGFI45; início da simulação às 00:00; SOC inicial de 80%; 3 painéis fotovoltaicos (sem nuvens); timer da CaC com 120 minutos; LVS = 50,5 V e o reformador liga às 00:00 e fica ligado durante 24 horas. Ao final de cada simulação foram comparados os gráficos de variação da pressão para cada valor de pressão inicial nos cilindros e a relação entre a pressão inicial, a pressão final e o consumo do compressor em cada caso. O estado de carga das baterias não era o objetivo nesta seção e, portanto, não foi comparado neste tópico, já que o banco de baterias apresenta o mesmo comportamento, sendo carregado e mantendo aproximadamente o mesmo nível em todos os casos. A Tabela 4 e a Figura 29 apresentam os resultados obtidos em 24 horas de operação contínua do reformador.

Pressão inicial (kPa)	Pressão final (kPa)	Consumo do	
600	688,7	9,13	
800	877,5	9,77	
1000	1054,0	10,25	
1200	1236,9	10,65	
1400	1432,2	11,00	
1600	1618,5	11,29	

Tabela 4 – Pressão inicial e final nos cilindros e consumo do compressor.



Figura 29 – Variação da pressão em função da pressão inicial nos cilindros de H₂.

Com base na Tabela 4 e na Figura 29 é possível observar que, à medida que a pressão inicial é aumentada, a pressão final não aumenta proporcionalmente. Isso ocorre devido ao consumo do compressor, que aumenta em função da pressão. Ainda na Tabela 4 é possível observar o consumo de energia do compressor para

cada caso. O consumo do compressor, que já é uma das grandes cargas a serem alimentadas pelo sistema, se torna consideravelmente maior à medida que a pressão inicial é aumentada. Portanto, o ideal seria utilizar o armazenamento em baixas pressões visando a economia de energia, porém sempre levando em consideração a pressão mínima nos cilindros, que é de 345 kPa devido aos requisitos da célula a combustível.

4.3.3. Célula a combustível (CaC)

Para se manter em funcionamento, a CaC necessita estar ligada ao barramento CC de 48 V e necessita de uma pressão mínima de 345 kPa nos cilindros de hidrogênio. Os cilindros de armazenamento de H₂ devem estar carregados ou estar sendo alimentados com hidrogênio suficiente para manter o sistema em funcionamento, portanto, a produção de hidrogênio no reformador deve ser suficiente para suprir o consumo da CaC. Com a intenção de ampliar o sistema, adicionando cada vez mais consumidores SIGFI45 e com o reformador e o compressor funcionando constantemente, o limite de potência da Célula a Combustível (2,2 kW) é um fator crucial.

Como visto anteriormente, com os parâmetros estabelecidos, mantendo o reformador ligado por todo o dia e inserindo 7 usuários atinge-se a potência máxima da CaC. A partir disso, para que sejam adicionados mais usuários, é necessário adicionar mais uma Célula a Combustível.

A Figura 30 apresenta a unidade de células a combustível utilizada no projeto, modelo E-2200x da Reli-On. Esta unidade é composta dois módulos de CaCs do tipo PEM totalizando 2,2 kW de potência nominal, cujo consumo máximo é de 28 litros normais de hidrogênio por minuto na condição de potência máxima e pressão nominal do hidrogênio na entrada de 0,69 bar. Este modelo permite ainda o uso de mais de uma CaC ligada ao mesmo sistema, cada uma podendo funcionar independentemente.

Com o intuito de continuar o estudo da ampliação do sistema, o simulador foi mais uma vez alterado para ter um número variável de células a combustível. Assim, quando a carga máxima alimentada supera os 2,2 kW, uma CaC adicional entra em funcionamento.



Figura 30 – Célula a combustível utilizada (Fonte: Silva, 2017).

Se a segunda CaC for inserida no sistema e ambas ligarem ao mesmo tempo sempre, ambas operam em baixas potências, ocasionando um maior consumo de H_2 , uma vez que o consumo aumenta com o aumento da potência fornecida pela CaC. Para esta simulação foram usados os seguintes dados de entrada: 6 consumidores SIGFI45; início da simulação às 00:00; SOC inicial de 80%; 3 painéis fotovoltaicos (sem nuvens); timer da CaC com 120 minutos; pressão inicial nos cilindros de 700 kPa; LVS = 50,5 V e o reformador liga às 00:00 e fica ligado durante todo o dia. A Figura 31 e a Figura 32 apresentam a comparação da variação de pressão nos cilindros e o SOC, respectivamente.



Figura 31 – Variação de pressão nos cilindros de H₂ para uma e duas células a combustível.



Figura 32 – Variação do estado de carga para uma e duas células a combustível.

É possível verificar nos gráficos acima que, com a duplicação da CaC, a pressão no final do dia é consideravelmente menor e o SOC é praticamente o mesmo. Pode-se então concluir que a célula a combustível deve operar sempre na maior potência possível para minimizar o consumo específico de hidrogênio. Pode-se então concluir que para que seja incluída uma segunda célula a combustível é necessário que esta seja ligada apenas em momentos em que a carga alimentada seja elevada e exceda a potência máxima da primeira CaC e assim por diante, caso sejam necessárias mais do que duas. Portanto, o simulador foi modificado para permitir que as CaCs entrem em operação automaticamente em função da carga alimentada e cada uma opera de forma independente, como pode ser visto na Figura 33, onde todas as células a combustível estão interligadas e a CaC adicional é ativada pela CaC mestra (CaC 1) quando esta atinge sua potência máxima.



Figura 33 – Células a combustível operando em paralelo.

4.3.4. Reformador de etanol

Visto que com o aumento do número de consumidores a demanda por hidrogênio passa a ser maior, torna-se então necessário aumentar a entrada de H₂ no sistema. Para que o sistema receba hidrogênio suficiente é necessária a inclusão de um novo reformador, dobrando a produção. O simulador foi novamente modificado para permitir um número variável de reformadores para que atendam à necessidade de hidrogênio no sistema. A cada reformador adicionado dobra-se a produção de H₂, porém o consumo em todas as etapas (aquecimento, produção e resfriamento) também é dobrado. Depois que o reformador foi duplicado, foi analisado um caso com mais de 6 usuários, com o uso de duas CaCs e o reformador se mantendo em funcionamento durante dois dias. Para esta simulação foram usados os seguintes dados de entrada: início às 00:00; SOC inicial de 80%; 3 painéis fotovoltaicos (sem nuvens); pressão inicial nos cilindros de 1000 kPa; timer da CaC com 120 minutos; LVS = 50,5 V e o reformador liga às 00:00 do primeiro dia. A Figura 34 e a Figura 35 mostram os resultados obtidos com relação à variação da pressão nos cilindros e o estado de carga, respectivamente, para a condição de duplicação do reformador.



Figura 34 – Variação de pressão nos cilindros de H₂ com um reformador após a duplicação da CaC.



Figura 35 – Variação do estado de carga com um reformador após a duplicação da CaC.

Ao analisarmos dois dias consecutivos, sendo o primeiro o dia em que o reformador é ligado e o segundo o dia no qual o reformador está em funcionamento contínuo, os resultados mostram que com esta configuração seria possível atender um grande número de consumidores. O estado de carga é praticamente o mesmo em todos os casos e o H₂ armazenado nos cilindros no final é função da quantidade

de consumidores. Ao inserir 11 usuários ou mais percebe-se que a pressão nos cilindros no final do segundo dia é menor do que a pressão final do primeiro dia, indicando que mesmo com o reformador ligado continuamente não é possível atender à demanda de hidrogênio. Portanto se faz necessária a inclusão de um segundo reformador. Pôde ser avaliado também que as duas células a combustível estão operando no limite de potência, indicando a necessidade de uma terceira CaC.

4.3.5. Banco de baterias

As baterias utilizadas no projeto são do tipo VRLA (valve regulated lead acid), estacionárias, do modelo 12MVA-100 (C20), 12 V/100 Ah, fabricadas pela Moura (Fonte: Catálogo de No Breaks VRLA Moura). Este banco de baterias atende aos requisitos de funcionamento da célula a combustível, que são 40 Ah por kW em uma instalação de 24 V ou 20 Ah por kW em uma instalação de 48 V. Como a instalação possui quatro baterias em um barramento de 48 V, a capacidade exigida seria de 20 Ah por kW produzido na CaC, portanto 2,2*20 = 44 Ah, sendo que o banco de baterias possui 100 Ah. Portanto, o conjunto de baterias poderia estar ligado a até duas células a combustível. O banco de baterias atende também à necessidade do inversor Sunny, que necessita de uma capacidade mínima de 100 Ah (Fonte: Manual do inversor Sunny Island 3.0M).

Vale a pena ressaltar também algumas características destas baterias, segundo informado no manual do fabricante (Fonte: Catálogo de No Breaks VRLA Moura). Os valores são referentes a cada bateria 12MVA-100 (C20).

- Capacidade C20 de 100 Ah, ou seja, 100 Ah/20 h = 5 A por 20 horas;
- Capacidade C10 de 93 Ah, ou seja, 93 Ah/10 h = 9,3 A por 10 horas;
- Capacidade C5 de 85 Ah, ou seja, 85 Ah/5 h = 17 A por 5 horas;
- Capacidade C1 de 60 Ah, ou seja, 60 Ah/1 h = 60 A por 1 hora;
- Corrente máxima de recarga de 30 A;

Foi possível observar durante as simulações que quando o número de usuários SIGFI45 era grande e não havia mais sol, o banco de baterias do projeto não seria suficiente para suportar a carga caso a CaC desligasse. Portanto, para garantir a segurança do sistema foi multiplicado o banco de baterias. Além disso, para atender aos requisitos do inversor Sunny, para cada inversor adicional é necessário um novo banco de baterias de 100 Ah. A Figura 36 apresenta o arranjo esquemático de três bancos de baterias no barramento CC de 48 V, cada um composto por 4 baterias de 12 V e 100 Ah.



Figura 36 – Bancos de baterias chumbo-ácido ligados ao barramento de 48 V.

4.3.6. Inversor Sunny

Assim como o banco de baterias, a capacidade do inversor também foi avaliada. O modelo selecionado para o projeto foi o Sunny Island 3.0M da SMA Solar Technologies AG, que atende a uma carga máxima de 3 kW durante 30 minutos, conforme informado pelo fabricante e mostrado na Tabela 5. Ao aumentar o número de usuários e equipamentos ligados ao sistema, a carga ultrapassa os 3 kW, necessitando assim de um segundo inversor.

Tabela 5 – Capacidade do Inversor Sunny Island 3.0M.

Sunny Island 3.0M			
Potência por 30 minutos a 25 °C	3000 W		
Potência por 5 minutos a 25 °C	3500 W		
Potência por 1 minutos a 25 °C	4200 W		
Potência por 3 segundos a 25 °C	5500 W		

De acordo com o manual do fabricante cada Inversor Sunny necessita estar acoplado a uma bateria com uma capacidade mínima de 100 Ah. Cada banco de baterias possui capacidade de 100 Ah, sendo então necessário, no mínimo, um banco de baterias adicional sempre que se adicionar um inversor ao sistema.

Uma vantagem adicional ao se inserir um segundo inversor é a eficiência, visto que para cargas muito elevadas a eficiência do inversor começa a baixar. Portanto, utilizando-se dois inversores a eficiência é sensivelmente aumentada. A Figura 37 mostra o perfil de eficiência do inversor utilizado.



Figura 37 – Curva de eficiência do Inversor Sunny Island 3.0M (Adaptado do Manual do inversor Sunny Island 3.0M).

4.3.7. Compressor de hidrogênio

O sistema de armazenamento de hidrogênio é composto pelo compressor juntamente com os cilindros de H₂. Poucos fabricantes atendem aos requisitos do projeto proposto e, portanto, o compressor utilizado foi sabidamente superdimensionado. O equipamento adquirido para o projeto foi o modelo 2TX2, da RIX Industries, que atende à pressão de saída do reformador de etanol (0,2 barg) e vazão de até 2,6Nm3/h a 1200 rpm.

O compressor é uma das maiores cargas a serem alimentadas pelo sistema e sabe-se que seu consumo específico varia em função da pressão e que o consumo específico é maior para maiores valores de pressão, como visto no estudo experimental feito no Projeto CaCRefEtOH e também conforme mostrado na Tabela 4. Portanto, para que o consumo seja o menor possível é preciso armazenar o hidrogênio a uma pressão tão baixa quanto possível, sem comprometer o funcionamento do sistema. Os ensaios foram conduzidos selecionando-se a frequência elétrica de operação do compressor e mantendo-a fixa durante o ensaio. Na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos experimentalmente no Projeto CaCRefEtOH para as diferentes configurações de funcionamento do compressor, variando a frequência de 20 a 60Hz. A Figura 38 mostra as curvas experimentais de consumo específico para cada frequência.



Figura 38 – Consumo específico (Wh/L) do compressor de hidrogênio (Fonte: Silva, 2017).

Frequência (Hz)	Potência (W)	Vazão de H ₂ (L/h)	Pressão de saída (kPa)	Razão de pressão	Consumo específico (Wh/L)
20	427	770	1711	14,2	0,55
20	437	777	1902	15.8	0.56
20	413	793	1511	12,5	0.52
20	425	831	1318	10.9	0.51
20	408	852	1063	8.86	0.48
20	398	892	847	7.06	0.45
20	363	898	671	5.59	0.4
20	366	957	472	3.93	0.38
20	348	1082	220	1.83	0.32
30	556	1154	1717	14.3	0.48
30	568	1180	1904	15.8	0.48
30	552	1211	1506	12,5	0.46
30	551	1250	1063	8.86	0.44
30	573	1256	1318	10.9	0.46
30	487	1310	671	5 59	0.37
30	534	1319	846	7.05	0.4
30	500	1388	472	3.93	0.36
30	485	1500	225	1.88	0.3
40	738	1532	1716	14.3	0.48
40	755	1545	1904	15.8	0,40
40	755	1591	1502	12,5	0.47
40	765	1640	1302	10.9	0.47
40	738	1683	1063	8.86	0.44
40	661	1709	671	5 59	0.39
40	728	1705	8/1	7.01	0,37
40	665	1779	<u> </u>	3.96	0,42
40	622	2029	225	1.88	0.31
50	971	1670	1716	1,00	0,51
50	98/	1885	1908	15.0	0,50
50	986	1005	1509	13,5	0,52
50	994	1992	1318	12,5	0,51
50	957	2054	1067	8.89	0.47
50	882	2034	675	5.63	0,47
50	936	2070	850	7.08	0,42
50	870	2210	476	3.97	0,39
50	797	2210	225	1.88	0.33
<u> </u>	123	2444	1510	1,00	0,55
60	123	2214	1771	14.3	0,50
60	124	2222	1906	14,5	0,50
60	120	2232	1068	80	0,50
60	123	2432	25 1	7.00	0,31
60	110	2403	679	7,09	0,40
60	113	2505	/83	3,03	0,40
60	112	2020	231	1.03	0,+5

Tabela 6 – Resultados dos ensaios do compressor (Fonte: Silva, 2017).

Durante o Projeto CaCRefEtOH foi determinado que a frequência ideal estaria entre 30 e 40Hz, uma vez que estas têm o menor consumo específico. Porém há um controlador de frequência acoplado ao compressor, que altera a velocidade do compressor de acordo com a vazão.

Com base nos dados experimentais foram traçadas curvas do consumo específico em função da razão de pressão para cada frequência e as curvas determinadas estão listadas abaixo:

Para curva de frequência de 20 Hz foi determinada a Eq. (30):

$$c_{20Hz} = 0,1162 * \ln(r) + 0,2301$$
(30)

Onde r é a razão de pressão, que é dada pela razão entre a pressão nos cilindros de armazenamento e a pressão de referência na saída do reformador ($P_{ref} = 120 \ kPa$).

$$\mathbf{r} = \frac{\mathbf{P}_{cil}}{\mathbf{P}_{ref}} \tag{31}$$

Para curva de frequência de 30 Hz foi determinada a Eq. (32):

$$c_{30Hz} = 0,0873 * \ln(r) + 0,2409$$
 (32)

Para curva de frequência de 40 Hz foi determinada a Eq. (33):

$$\mathbf{c}_{40\text{Hz}} = \mathbf{0}, \mathbf{0877} * \ln(\mathbf{r}) + \mathbf{0}, \mathbf{2486} \tag{33}$$

Para curva de frequência de 50 Hz foi determinada a Eq. (34):

$$c_{50Hz} = 0,1056 * \ln(r) + 0,2491$$
(34)

Para curva de frequência de 60 Hz foi determinada a Eq. (35):

$$c_{60Hz} = 0,1015 * \ln(r) + 0,2888$$
(35)

A Figura 39 mostra o resultado obtido com as curvas aproximadas.



Figura 39 – Curvas aproximadas do consumo específico do compressor.

A partir das curvas determinadas foi feita a alteração do simulador para que a frequência e o consumo específico sejam alterados automaticamente em função da vazão. De acordo com os dados da Tabela 6 foi possível determinar a curva de consumo específico na qual o compressor vai operar, visto que o controlador de frequência aumenta a rotação do compressor em função da vazão. Para vazões de H₂ menores ou iguais a 1000 L/h o compressor trabalha a 20 Hz, utilizando a respectiva curva de consumo específico, dada pela Eq. (30). Para vazões entre 1000 e 2000 L/h a operação se dá a 40 Hz, conforme a Eq. (33), e para vazões de 3000 L/h ou maiores a operação se dá a 60 Hz, conforme a Eq. (35).

4.4. Conversão da energia do Etanol e do hidrogênio para kWh

Com o intuito de analisar o balaço energético do sistema, foram calculadas todas as entradas e saídas de cada equipamento em kWh. A Figura 40 apresenta o diagrama de blocos da conversão do etanol em energia elétrica.

O consumo acumulado do consumidor SIGFI45 e dos equipamentos do sistema foi calculado baseado na potência de cada um. Como o passo de tempo é de 1 em 1 minuto, a potência foi convertida para energia (kWh) através da Eq. (36) e em seguida foi calculado o consumo acumulado a cada passo de tempo, somandose a energia consumida em cada minuto, como pode ser visto na Eq. (37).
$$E_{consumida} \left[kWh \right] = Potência \left[kW \right] \cdot \frac{1h}{60min} \cdot 1min$$
(36)

 $E_{t+1} = E_t + \left(Pot \hat{e}ncia \left[kW \right] \cdot \frac{1h}{60min} \cdot 1min \right)_{t+1}$

Figura 40 – Diagrama de blocos da conversão do etanol em energia elétrica.

Para converter o consumo em litros de etanol para kWh foram utilizados o poder calorífico inferior do etanol, PCI_{etanol}=7,69 kWh/kg, e a massa específica do etanol de 0,789 kg/L (ρ_{etanol}). Assim, é possível calcular a energia consumida na forma de etanol a partir da Eq. (38), onde V é o volume em litros, e integrá-la no tempo, como visto anteriormente.

$$E_{etanol} [kWh] = PCI_{etanol} \left[\frac{kWh}{kg}\right] \cdot \rho_{etanol} \left[\frac{kg}{L}\right] \cdot V_{etanol} [L]$$
(38)

Para converter a produção de hidrogênio no reformador e o consumo da célula a combustível, dados em litros, para kWh foram utilizados o poder calorífico inferior do H₂, PCI_{Hidrogênio}=33,32 kWh/kg, e a massa específica do H₂ de 0,0834 g/L (a 20°C e 1 atm). Desta forma, é possível calcular a energia consumida pela CaC e também a energia produzida pelo reformador a partir da Eq. (39), onde V_{hidrogênio} pode ser o volume que sai do reformador ou o volume que entra na CaC, em litros, e integrá-la no tempo, como visto anteriormente.

$$E_{H_2}\left[kWh\right] = PCI_{H_2}\left[\frac{kWh}{kg}\right] \cdot \rho_{H_2}\left[\frac{kg}{L}\right] \cdot V_{H_2}\left[L\right]$$
(39)

(37)

5. Simulações com o sistema ampliado

Após a avaliação da capacidade de cada equipamento constituinte do sistema e da viabilidade técnica de sua duplicação, foram testados e analisados casos com a ampliação gradativa do sistema, ou seja, foi incluído um número crescente de usuários SIGFI45 e, à medida que cada equipamento chegava em seu limite de capacidade, um novo foi acrescentado. Desta forma foi possível verificar qual a configuração adequada em cada caso, determinar as variáveis de operação da CaC e conhecer a capacidade do sistema sem que haja a duplicação do compressor, componente com maior superdimensionamento e o único que não será duplicado. Todas as simulações foram feitas com o reformador operando continuamente, conforme descrito a seguir.

5.1. Análise do consumo do reformador em função do tempo de produção de H₂

Para demonstrar a variação no consumo do reformador em função do tempo de produção de H_2 foram realizadas simulações onde todas as variáveis foram mantidas constantes, exceto o tempo de produção. Para esta simulação foram usados os seguintes dados de entrada: 1 consumidor SIGFI45; início da simulação às 00:00; SOC inicial de 95%; 3 painéis fotovoltaicos (sem nuvens); timer da CaC com 120 minutos; pressão inicial nos cilindros de 700 kPa; LVS = 48,2 V; Vfloat = 52,7 V e o reformador liga às 00:00.

O tempo de produção foi variado de 1 a 24 horas, mostrando que o consumo de aquecimento e resfriamento do reformador são diluídos e, portanto, quanto maior o tempo de produção, menor o consumo do reformador por Nm³ de hidrogênio produzido, como pode ser visto na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**41.



Figura 41 – Consumo do reformador X Horas de produção de H₂.

Os resultados mostram que o consumo do reformador em Wh/Nm³ é muito alto para pequenos tempos de produção, caindo progressivamente e se estabilizando próximo ao valor do consumo da fase de produção (200 Wh/Nm³). No gráfico, é exibido também o valor da energia produzida pela Célula a Combustível para 1 Nm³ de hidrogênio, com a CaC operando em altas potências (1260 Wh/Nm³). Portanto, é possível concluir que quando o reformador permanece ligado constantemente, como foi sugerido no capítulo 3, seu consumo depois de passado muito tempo tende a se aproximar do valor do consumo de produção. É possível avaliar também que, em casos onde o reformador fica ligado por um curto período, a energia produzida não é suficiente nem para sua própria alimentação.

5.2. Determinação das variáveis de Operação da Célula a combustível

Depois de determinada a quantidade necessária de equipamentos para cada configuração, com o objetivo de evitar o desperdício de energia foram determinados os parâmetros de operação da Célula a Combustível (LVS e Vfloat) para cada caso de estudo, favorecendo o armazenamento de energia no sistema.

Quando o sistema está ligado e existe uma carga a ser alimentada, a tensão do barramento CC começa a cair. O parâmetro Low Voltage Start (LVS), determina o valor de tensão na qual a CaC é acionada. Para valores muito elevados do LVS a célula a combustível é acionada inúmeras vezes, visto que uma pequena queda na tensão é suficiente para atingir o LVS, o que leva a um alto consumo de H₂. Por outro lado, um valor de LVS muito baixo permite que a tensão no barramento chegue a valores muito baixos antes de acionar a célula a combustível, fazendo com que haja uma grande descarga do banco de baterias. Os limites para o valor do LVS foram determinados pela tensão mínima na qual as baterias tenham a maior eficiência e a tensão na qual a CaC desliga (55 V). Como pode ser visto na Figura 42 a maior eficiência das baterias do tipo VRLA ocorre quando se mantem o SOC acima de 60%, o que corresponde a um LVS de aproximadamente 48 V. Portanto a faixa de valores está compreendida entre 48 e 55 V e este foi o intervalo utilizado para a determinação do LVS.



Figura 42 – Variação da eficiência das baterias VRLA em função do estado de carga (Adaptado de http://ultrabattery.com/technology/ultrabattery-technology).

O parâmetro Vfloat é a tensão de flutuação, ou seja, o valor no qual a célula a combustível tenta manter a tensão do barramento enquanto está ligada. Este valor determina o patamar de tensão no qual a CaC opera e, portanto, influencia na carga e descarga da bateria e no consumo de H₂ do sistema. O valor do Vfloat padrão utilizado no simulador do sistema foi de 54,9 V, sendo que a CaC é ligada quando a tensão cai e atinge o valor de LVS e é desligada quando a tensão chega a 55 V. Nas baterias utilizadas no projeto a tensão de flutuação encontra-se na faixa de 13,5 a 13,8 V, portanto a faixa de valores para o banco com 4 baterias está compreendido entre 54 V e 55,2 V. Os valores iniciais utilizados para o LVS e o Vfloat foram os mesmos determinados no simulador desenvolvido para o Projeto CaCRefEtOH, LVS de 50,5 V e Vfloat de 54,9 V.

Estas variáveis foram otimizadas levando em consideração que o armazenamento de energia ao final da simulação (baterias + cilindros) deve ser maior ou igual a zero e, além disso, a pressão mínima deve ser maior ou igual a 345 kPa e a pressão máxima menor ou igual a 2070 kPa. Conforme visto anteriormente, o consumo total do sistema varia de acordo com a pressão de armazenamento e quanto mais baixa a pressão, menor o consumo do compressor, portanto, melhor é o aproveitamento do sistema. O valor inicial de pressão utilizado foi de 700 kPa. Após a determinação das variáveis de operação da CaC, foi comparado o balanço de energia e a energia armazenada no sistema com os valores anteriores. Para a determinação das variáveis de operação foi utilizado o pacote *"Evolutionary"* do Solver do Excel, que é utilizado quando o objetivo e as restrições são determinados a partir de funções que variam abruptamente.

A Figura 43 mostra a variação do estado de carga nas baterias e a Figura 44 mostra a variação do armazenamento de hidrogênio, alterando-se apenas o valor do LVS e mantendo-se o Vfloat em 54,9 V.



Figura 43 – Variação do SOC das baterias com a variação do parâmetro LVS.



Figura 44 – Variação da pressão nos cilindros com a variação do parâmetro LVS.

A **Figura 45** mostra a variação do estado de carga nas baterias e a **Figura 46** mostra a variação do armazenamento de hidrogênio, alterando-se apenas o valor do Vfloat e mantendo-se o LVS em 50,5 V.



Figura 45 – Variação do SOC das baterias em função do parâmetro Vfloat.



Figura 46 – Variação da pressão nos cilindros em função do parâmetro Vfloat.

Com base nos resultados é possível observar que o armazenamento de energia, tanto nos cilindros de H₂ quanto nas baterias, varia de acordo com o LVS e o Vfloat, sendo então necessária a resolução das duas variáveis em conjunto.

5.3. Configurações do sistema ampliado

5.3.1. CASO 1 – Um usuário SIGFI45

Com o intuito de refinar os resultados obtidos no caso onde há apenas um usuário no sistema, foi analisado um caso com este usuário utilizando-se o simulador com todas as alterações. O caso 1 representa a configuração original do projeto, alterando-se apenas os parâmetros de operação da CaC. Para esta seção foram utilizados os dados de entrada descritos anteriormente, porém com a duração de 2 dias consecutivos. A Tabela 7 mostra a configuração do sistema para atender à carga de um usuário do tipo SIGFI45.

Tabela 7 – Configuração do sistema para o CASO 1.

Configuração do sistema		
Número de usuários SIGFI45	1	
Reformadores	1	
Cilindros de H ₂	4	
Painéis fotovoltaicos	3	
Inversores Sunny	1	
Bancos de baterias	1	
Células a Combustível	1	
Compressores	1	

A Tabela 8 apresenta as variáveis de operação da CaC, LVS e Vfloat, para a configuração descrita acima.

Parâmetros de Operação da CaC	
LVS	48,2
Vfloat	54,0

Tabela 8 – Valores de LVS e Vfloat para o CASO 1.

A Figura 47 e a Figura 48 apresentam a variação da pressão e a variação do estado de carga das baterias ao longo da simulação, respectivamente. Na Tabela 9 pode ser observado o balanço de energia no sistema antes e depois da determinação das variáveis, onde é possível verificar que o armazenamento de energia (baterias + cilindros de H₂) mudou de 51,6 kWh para 58,1 kWh e não houve desperdício de energia dos painéis fotovoltaicos.



Figura 47 – Variação da pressão nos cilindros para o CASO 1.



Figura 48 – Variação do estado de carga para o CASO 1.

BALANÇO DE ENERGIA	Padrão	Corrigido	
REFORMADOR			
Produção de H2 em L	45016,7	45016,7	L
Produção de H2 em kWh	125,1	125,1	kWh
Consumo elétrico	12,7	12,7	kWh
Consumo de Etanol em L	37,0	37,0	L
Consumo de Etanol em kWh	224,3	224,3	kWh
COMPRESSOR			
Consumo	21,9	22,3	kWh
CaC			
Consumo de H2 na CaC em L	26466,4	23928,1	L
Consumo de H2 na CaC em kWh	73,5	66,5	kWh
Geração na CaC	29,4	29,8	kWh
Potência Máxima das CaC's	1263,2	1938,3	W
BATERIA			
Variação da Energia Armazenada	0,1	-0,5	kWh
PAINÉIS			
Energia fornecida	10,0	10,0	kWh
CILINDROS DE H2			
Variação da Energia Armazenada	51,5	58,6	kWh
SIGFI			
Consumo	3,0	3,0	kWh
INVERSOR			
Carga Elétrica Alimentada	39,0	39,4	kWh
ENERGIA FINAL ACUMULADA (baterias + cilindros de H ₂)	51,6	58,1	kWh

Tabela 9 – Variação do balanço de energia para o CASO 1.

5.3.2. CASO 2 – Comunidade de 6 usuários

A capacidade do sistema atual foi analisada e os resultados obtidos seguem abaixo. Foi analisado um caso no qual o número de usuários é aumentado progressivamente, porém nenhum equipamento é duplicado, mostrando que é possível atender a 6 usuários com a configuração atual do sistema. A Tabela 10 mostra a configuração do sistema para atender à carga de seis usuários do tipo SIGFI45.

Configuração do sistema		
Número de usuários SIGFI45	6	
Reformadores	1	
Cilindros de H ₂	4	
Painéis fotovoltaicos	3	
Inversores Sunny	1	
Bancos de baterias	1	
Células a Combustível	1	
Compressores	1	

Tabela 10 – Configuração do sistema para o CASO 2.

A Tabela 11 apresenta as variáveis de operação da CaC, LVS e Vfloat, para a configuração descrita acima.

Tabela 11 – Valores de LVS e Vfloat para o CASO 2	2.
--	----

Parâmetros de Operação da CaC		
LVS	48,4	
Vfloat	54,5	

A Figura 49 e a Figura 50 apresentam a variação da pressão e a variação do estado de carga ao longo da simulação, respectivamente. Na Tabela 12 pode ser observado o balanço de energia no sistema antes e depois da determinação das variáveis, onde é possível verificar que o armazenamento de energia (baterias + cilindros de H₂) mudou de 19,6 kWh para 25,2 kWh e não houve desperdício de energia dos painéis fotovoltaicos.



Figura 49 – Variação da pressão nos cilindros para o CASO 2.



Figura 50 – Variação do estado de carga para o CASO 2.

BALANÇO DE ENERGIA	Padrão	Corrigido	
REFORMADOR			
Produção de H2 em L	45016,7	45016,7	L
Produção de H2 em kWh	125,1	125,1	kWh
Consumo elétrico	12,7	12,7	kWh
Consumo de Etanol em L	37,0	37,0	L
Consumo de Etanol em kWh	224,3	224,3	kWh
COMPRESSOR			
Consumo	20,5	20,9	kWh
CaC			
Consumo de H2 na CaC em L	38012,1	35836,2	L
Consumo de H2 na CaC em kWh	105,6	99,6	kWh
Geração na CaC	44,4	44,5	kWh
Potência Máxima das CaC's	2084,0	2112,6	W
BATERIA			
Variação da Energia Armazenada	0,2	-0,3	kWh
PAINÉIS			
Energia fornecida	9,9	10,0	kWh
CILINDROS DE H2			
Variação da Energia Armazenada	19,5	25,5	kWh
SIGFI			
Consumo	18,2	18,2	kWh
INVERSOR			
Carga Elétrica Alimentada	53,7	54,1	kWh
ENERGIA FINAL ACUMULADA (baterias + cilindros de H ₂)	19,7	25,2	kWh

Tabela 12 – Variação do balanço de energia para o CASO 2.

5.3.3. CASO 3 – Comunidade de 9 usuários

A partir da inclusão do sétimo usuário SIGFI45 há a necessidade da duplicação da célula a combustível. O limite de capacidade do sistema com três painéis fotovoltaicos foi analisado e os resultados obtidos seguem abaixo. A Tabela 13 mostra a configuração do sistema para atender à carga de nove usuários do tipo SIGFI45.

Configuração do sistema		
Número de usuários SIGFI45	9	
Reformadores	1	
Cilindros de H ₂	4	
Painéis fotovoltaicos	3	
Inversores Sunny	1	
Bancos de baterias	1	
Células a Combustível	2	
Compressores	1	

Tabela 13 – Configuração do sistema para o CASO 3.

A Tabela 14 apresenta as variáveis de operação da CaC, LVS e Vfloat, para a configuração descrita acima.

Tabela 14 – Valores de LVS e Vfloat para o CASO 3.

Parâmetros de Operação da CaC	
LVS	48,1
Vfloat	54,7

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**e a Figura 52 apresentam a variação da pressão e a variação do estado de carga ao longo da simulação, respectivamente. Na Tabela 15 pode ser observado o balanço de energia no sistema antes e depois da determinação das variáveis, onde é possível verificar que o armazenamento de energia (baterias + cilindros de H₂) mudou de -0,5 kWh para +4,4 kWh e não houve desperdício de energia dos painéis fotovoltaicos.



Figura 51 – Variação da pressão nos cilindros para o CASO 3.



Figura 52 – Variação do estado de carga para o CASO 3.

BALANÇO DE ENERGIA	Padrão	Corrigido	
REFORMADOR			
Produção de H2 em L	45016,7	45016,7	L
Produção de H2 em kWh	125,1	125,1	kWh
Consumo elétrico	12,7	12,7	kWh
Consumo de Etanol em L	37,0	37,0	L
Consumo de Etanol em kWh	224,3	224,3	kWh
COMPRESSOR			
Consumo	19,4	19,9	kWh
CaC			
Consumo de H2 na CaC em L	45236,2	43332,9	L
Consumo de H2 na CaC em kWh	125,7	120,4	kWh
Geração na CaC	53,2	53,3	kWh
Potência Máxima das CaC's	3896,1	4288,9	W
BATERIA			
Variação da Energia Armazenada	0,1	-0,3	kWh
PAINÉIS			
Energia fornecida	9,7	10,0	kWh
CILINDROS DE H2			
Variação da Energia Armazenada	-0,6	4,7	kWh
SIGFI			
Consumo	27,3	27,3	kWh
INVERSOR			
Carga Elétrica Alimentada	62,5	62,9	kWh
ENERGIA FINAL			
ACUMULADA	-0,5	4,4	kWh
(baterias + cilindros de H ₂)			

Tabela 15 – Variação do balanço de energia para o CASO 3.

5.3.4. CASO 4 – Comunidade de 10 usuários

A partir da inclusão do décimo usuário SIGFI45 há a necessidade de aumentar o fornecimento de energia ao sistema, porém se muitos painéis fotovoltaicos são adicionados há um grande desperdício de energia nos horários de pico. Portanto, para a inclusão do décimo consumidor foi necessária a inclusão de um novo painel fotovoltaico. O limite de capacidade do sistema com esta configuração foi analisado e os resultados obtidos seguem abaixo. A Tabela 16 mostra a configuração do sistema para atender à carga de dez usuários do tipo SIGFI45.

Configuração do sistema		
Número de usuários SIGFI45	10	
Reformadores	1	
Cilindros de H ₂	4	
Painéis fotovoltaicos	4	
Inversores Sunny	1	
Bancos de baterias	1	
Células a Combustível	2	
Compressores	1	

Tabela 16 - Configuração do sistema para o CASO 4.

A **Tabela 17** apresenta as variáveis de operação da CaC, LVS e Vfloat, para a configuração descrita acima.

Tabela 17 – Valores de LVS e Vfloat para o CASO 4.

Parâmetros de Operação da CaC	
LVS	48,0
Vfloat	54,4

A Figura 53 e a Figura 54 apresentam a variação da pressão e a variação do estado de carga ao longo da simulação, respectivamente. Na Tabela 18 pode ser observado o balanço de energia no sistema antes e depois da determinação das variáveis, onde é possível verificar que o armazenamento de energia (baterias + cilindros de H₂) mudou de 0,8 kWh para 5,4 kWh e não houve desperdício de energia dos painéis fotovoltaicos.



Figura 53 – Variação da pressão nos cilindros para o CASO 4.



Figura 54 – Variação do estado de carga para o CASO 4.

BALANÇO DE ENERGIA	Padrão	Corrigido	
REFORMADOR			
Produção de H2 em L	45016,7	45016,7	L
Produção de H2 em kWh	125,1	125,1	kWh
Consumo elétrico	12,7	12,7	kWh
Consumo de Etanol em L	37,0	37,0	L
Consumo de Etanol em kWh	224,3	224,3	kWh
COMPRESSOR			
Consumo	19,6	19,9	kWh
CaC			
Consumo de H2 na CaC em L	44756,9	42846,0	L
Consumo de H2 na CaC em kWh	124,4	119,1	kWh
Geração na CaC	53,5	53,0	kWh
Potência Máxima das CaC's	4069,7	4139,6	W
BATERIA			
Variação da Energia Armazenada	0,1	-0,6	kWh
PAINÉIS			
Energia fornecida	12,9	13,3	kWh
CILINDROS DE H2			
Variação da Energia Armazenada	0,7	6,0	kWh
SIGFI			
Consumo	30,3	30,3	kWh
INVERSOR			
Carga Elétrica Alimentada	66,0	66,4	kWh
ENERGIA FINAL			
ACUMULADA	0,8	5,4	kWh
(baterias + cilindros de H ₂)			

Tabela 18 – Variação do balanço de energia para o CASO 4.

5.3.5. CASO 5 – Comunidade de 20 usuários

A partir da inclusão do décimo primeiro usuário SIGFI45 há a necessidade de aumentar o fornecimento de energia ao sistema, porém se muitos painéis fotovoltaicos são adicionados há uma grande perda de energia. Portanto, para um sistema com mais de dez usuários, é necessário duplicar o reformador e, como consequência, o inversor e o banco de baterias também devem ser duplicados. O limite de capacidade do sistema com esta configuração foi analisado e os resultados obtidos seguem abaixo. A Tabela 19 mostra a configuração do sistema para atender à carga de vinte usuários do tipo SIGFI45.

Configuração do sistema			
Número de usuários SIGFI45	20		
Reformadores	2		
Cilindros de H ₂	4		
Painéis fotovoltaicos	5		
Inversores Sunny	2		
Bancos de baterias	2		
Células a Combustível	3		
Compressores	1		

Tabela 19 – Configuração do sistema para o CASO 5.

A Tabela 20 apresenta as variáveis de operação da CaC, LVS e Vfloat, para a configuração descrita acima.

Parâmetros de Operação da CaC da CaC				
LVS	48,8			
Vfloat	54,2			

Tabela 20 – Valores de LVS e Vfloat para o CASO 5.

A Figura 55 e a Figura 56 apresentam a variação da pressão e a variação do estado de carga ao longo da simulação, respectivamente. Na Tabela 21 pode ser observado o balanço de energia no sistema antes e depois da alteração das variáveis, onde é possível verificar que o armazenamento de energia (baterias + cilindros de H₂) mudou de -1,4 kWh para +2,5 kWh e não houve desperdício de energia dos painéis fotovoltaicos.



Figura 55 – Variação da pressão nos cilindros para o CASO 5.



Figura 56 – Variação do estado de carga para o CASO 5.

BALANÇO DE ENERGIA	Padrão	Corrigido	
REFORMADOR			
Produção de H2 em L	90033,3	90033,3	L
Produção de H2 em kWh	250,2	250,2	kWh
Consumo elétrico	25,5	25,5	kWh
Consumo de Etanol em L	73,9	73,9	L
Consumo de Etanol em kWh	448,5	448,5	kWh
COMPRESSOR			
Consumo	35,8	36,2	kWh
CaC			
Consumo de H2 na CaC em L	90565,0	89015,3	L
Consumo de H2 na CaC em kWh	251,6	247,3	kWh
Geração na CaC	113,0	111,9	kWh
Potência Máxima das CaC's	6104,6	6026,6	W
BATERIA			
Variação da Energia Armazenada	0,1	-0,4	kWh
PAINÉIS			
Energia fornecida	16,3	16,7	kWh
CILINDROS DE H2			
Variação da Energia Armazenada	-1,5	2,7	kWh
SIGFI			
Consumo	60,6	60,6	kWh
INVERSOR			
Carga Elétrica Alimentada	128,3	128,8	kWh
ENERGIA FINAL			
ACUMULADA (baterias + cilindros de H ₂)	-1,4	2,3	kWh

Tabela 21 – Variação do balanço de energia para o CASO 5.

A Tabela 22 apresenta um resumo dos casos estudados.

Caso	Usuários sigfi45	Alteração em relação ao sistema	LVS (V)	LVS		LVS	Vfloat	Ener; acumula	gia final ada (kWh)
	51g1145	paurao		(•)	Padrão	Corrigido			
1	1	-	48,2	54,0	51,6	58,1			
2	6	-	48,4	54,5	19,7	25,2			
3	9	$1 \text{ CaC} \rightarrow 2 \text{ CaCs}$	48,1	54,7	-0,5	4,4			
4 10	$1 \text{ CaC} \rightarrow 2 \text{ CaCs}$	48.0	54.4	0.8	5.4				
	10	$3 \text{ PVs} \rightarrow 4 \text{ PVs}$	10,0	, -	0,0	.,.			
		$1 \text{ CaC} \rightarrow 3 \text{ CaCs}$							
5		$3 \text{ PVs} \rightarrow 5 \text{ PVs}$		54,2	-1,4	2,3			
	20	1 Inversor \rightarrow 2 Inversores	48,8						
		4 baterias \rightarrow 8 Baterias							
		1 Reformador \rightarrow 2 Reformadores							

5.4. Análise da eficiência global do sistema

Com o intuito de analisar a eficiência global do sistema foram simulados casos com 1 e 2 reformadores, iniciando sem painéis fotovoltaicos e adicionando usuários ao sistema. À medida que era necessário os painéis fotovoltaicos eram acrescentados ao sistema, bem como os demais componentes necessários. Os resultados para 1 reformador podem ser vistos na Figura 57 e na Tabela 23. Os resultados para 2 reformadores podem ser vistos na Figura 58 e na Tabela 24. Por falta de dados precisos acerca do reformador na conversão do etanol em energia, foi adotada uma eficiência de 30% para esta conversão, uma eficiência próxima à de uma máquina térmica, e utilizando-se o PCI do etanol, como descrito anteriormente. Para o caso com 1 reformador, a energia acumulada fornecida pelo etanol é de 67,28 kWh e para o caso com 2 reformadores é de 134,55 kWh. A eficiência leva em consideração a entrada e energia (PV + Etanol) e o consumo dos usuários. As simulações foram feitas considerando dois dias seguidos ensolarados. Os resultados mostram que a eficiência é crescente com o número de usuários e, em ambos os casos, há um ponto de máximo, que ocorre com 17 usuários para 1 reformador e 31 usuários para 2 reformadores.



Figura 57 – Eficiência do sistema com 1 reformador.

	Número de usuários	Consumo (kWh)	Número de painéis	Energia dos Painéis (kWh)	Eficiência
	1	1,50	0	0,00	2,2%
dor)	2	3,00	0	0,00	4,5%
ma PV	3	4,50	0	0,00	6,7%
efor sem	4	6,00	0	0,00	8,9%
1 R	5	7,50	0	0,00	11,1%
	6	9,00	0	0,00	13,4%
	7	10,50	1	3,33	14,9%
	8	12,00	2	6,66	16,2%
	9	13,50	3	9,99	17,5%
	10	15,00	4	13,33	18,6%
dor ()	11	16,50	4	13,33	20,5%
ma PV	12	18,00	5	16,66	21,4%
efor	13	19,50	6	19,99	22,3%
1 R.	14	21,00	7	23,32	23,2%
	15	22,50	8	26,65	24,0%
	16	24,00	9	29,98	24,7%
	17	25,50	10	33,31	25,4%
	18	27,00	13	43,31	24,4%

Tabela 23 – Eficiência do sistema com 1 reformador.



Figura 58 – Eficiência do sistema com 2 reformadores.

	Número de usuários	Consumo (kWh)	Número de painéis	Energia dos Painéis (kWh)	Eficiência
	1	1,50	0	0,00	1,1%
	2	3,00	0	0,00	2,2%
	3	4,50	0	0,00	3,3%
	4	6,00	0	0,00	4,5%
	5	7,50	0	0,00	5,6%
s	6	9,00	0	0,00	6,7%
ore)	7	10,50	0	0,00	7,8%
nad PV	8	12,00	0	0,00	8,9%
forn sem	9	13,50	0	0,00	10,0%
Ref (;	10	15,00	0	0,00	11,1%
2	11	16,50	0	0,00	12,3%
	12	18,00	0	0,00	13,4%
	13	19,50	0	0,00	14,5%
	14	21,00	0	0,00	15,6%
	15	22,50	0	0,00	16,7%
	16	24,00	0	0,00	17,8%
	17	25,50	2	6,66	18,1%
	18	27,00	3	9,99	18,7%
	19	28,50	4	13,33	19,3%
	20	30,00	5	16,66	19,8%
	21	31,50	6	19,99	20,4%
	22	33,00	7	23,32	20,9%
	23	34,50	7	23,32	21,9%
S	24	36,00	9	29,98	21,9%
ore)	25	37,50	9	29,98	22,8%
nad PV	26	39,00	11	36,64	22,8%
forr	27	40,50	12	39,98	23,2%
Re.	28	42,00	12	39,98	24,1%
2	29	43,50	13	43,31	24,5%
	30	45,00	13	43,31	25,3%
	31	46,50	13	43,31	26,1%
	32	48,00	16	53,30	25,6%
	33	49,50	17	56,63	25,9%
	34	51,00	19	63,30	25,8%
	35	52,50	21	69,96	25,7%
	36	54,00	24	79,95	25,1%

Tabela 24 – Eficiência do sistema com 2 reformadores.

5.5. Considerações finais

- Após a análise dos casos simulados e determinação da configuração adequada para cada um, foi possível verificar que o sistema atual pode ser modificado para atender a um usuário SIGFI45 e terminar o dia com uma quantidade maior de energia acumulada, seja nas baterias ou nos cilindros de H₂. Ainda com este sistema "padrão" foi possível atender até seis consumidores;
- Com o aumento do número de usuários (acima de 6) passa a haver a necessidade de duplicação de componentes do sistema;
- Não é possível incluir painéis fotovoltaicos indefinidamente, pois o sistema desperdiça muita energia quando há grande disponibilidade de energia solar e a demanda do SIGFI45 é pequena. Além disso, o objetivo do projeto seria descaracterizado com a inclusão de muitos painéis e baterias, uma vez que se trata de um projeto de pesquisa voltado para o armazenamento de hidrogênio;
- Com apenas um compressor é possível atender até vinte consumidores, multiplicando os demais componentes;
- Há uma segunda maneira de ampliar o sistema com o aumento dos painéis fotovoltaicos, porém, desta forma, muita energia é perdida. Considerando os custos de aquisição dos equipamentos esta pode ser ainda viável.

6. Análise de custos

Sabendo que o alto custo é um fato que atualmente inviabiliza o projeto e que o processo de reforma de etanol para produção de hidrogênio é uma tecnologia recente e ainda em estudo, espera-se que em um futuro próximo a tecnologia evolua e os custos diminuam com o passar do tempo, portanto é importante conhecer os limites atuais do sistema e qual seu custo atual para produção de energia. No futuro, com o incremento da eficiência dos equipamentos, principalmente na reforma do etanol, diminuição do custo da tecnologia de produção e armazenamento de hidrogênio, é possível melhorar ainda mais a eficiência do sistema.

O principal objetivo deste trabalho era de reduzir o custo final do kWh para o consumidor. Neste sentido foram avaliados individualmente cada um dos componentes, a capacidade máxima do sistema na configuração atual e a configuração ideal para que o sistema pudesse atender a um maior número de usuários e diluir o custo de instalação entre eles, reduzindo assim o custo final.

Para o cálculo do custo por kWh por consumidor foi considerada a energia utilizada por cada consumidor SIGFI45 nas diferentes configurações. Os grandes custos de aquisição de equipamentos envolvidos encontram-se na Tabela 25 (não foram considerados custos de instalação).

Custo 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			

Tabela 25 – Custo dos equipamentos.

O caso 1 apresenta a configuração atual do sistema atendendo a um usuário do tipo SIGFI45. De acordo com os valores apresentados na Tabela 25 foi calculado o custo do kWh diário. Os resultados são apresentados na Tabela 26. 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.

Equipamento	Custo unitário	Quantidade	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
CaC	R\$ 40.000,00/unidade	1	R\$ 40.000,00
Compressor	R\$ 80.000,00/unidade	1	R\$ 80.000,00
		Total global	R\$ 304.200,00

Tabela 26 – Custo total dos equipamentos para o CASO 1.

O caso 2 apresenta a configuração atual do sistema atendendo a seis usuários do tipo SIGFI45. De acordo com os valores apresentados na Tabela 25 foi calculado o custo do kWh diário. Os resultados são apresentados na Tabela 27. O custo total dos equipamentos é de R\$ 304.200,00, atendendo a 6 usuários do tipo SIGFI45, que consomem 9,0 kWh por dia. Portanto um custo de 33.800,00 R\$/kWh instalado.

Tabela 27 – Custo total dos equipamentos para o CASO 2.

Equipamento	Custo unitário	Quantidade	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
CaC	R\$ 40.000,00/unidade	1	R\$ 40.000,00
Compressor	R\$ 80.000,00/unidade	1	R\$ 80.000,00
		Total global	R\$ 304.200,00

O caso 3 apresenta a configuração do sistema com a duplicação da célula a combustível, atendendo a nove usuários do tipo SIGFI45. De acordo com os valores apresentados na Tabela 25 foi calculado o custo do kWh diário. Os resultados são apresentados na Tabela 28. O custo total dos equipamentos é de R\$ 344.200,00, atendendo a 9 usuários do tipo SIGFI45, que consomem 13,5 kWh por dia. Portanto um custo de 25.496,30 R\$/kWh instalado.

Equipamento	Custo unitário	Quantidade	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
CaC	R\$ 40.000,00/unidade	2	R\$ 80.000,00
Compressor	R\$ 80.000,00/unidade	1	R\$ 80.000,00
		Total global	R\$ 344.200,00

Tabela 28 – Custo total dos equipamentos para o CASO 3.

O caso 4 apresenta a configuração do sistema com a duplicação da célula a combustível e a inclusão de um painel fotovoltaico, atendendo a dez usuários do tipo SIGFI45. De acordo com os valores apresentados na Tabela 25 foi calculado o custo do kWh diário. Os resultados são apresentados na Tabela 29. O custo total dos equipamentos é de R\$ 345.200,00, atendendo a 10 usuários do tipo SIGFI45, que consomem 15 kWh por dia. Portanto um custo de 23.013,33 R\$/kWh instalado.

Equipamento	Custo unitário	Quantidade	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	4	R\$ 4.000,00
Inversor	R\$ 25.000,00/unidade	1	R\$ 25.000,00
Baterias	R\$ 1.100,00/unidade	4	R\$ 4.400,00
CaC	R\$ 40.000,00/unidade	2	R\$ 80.000,00
Compressor	R\$ 80.000,00/unidade	1	R\$ 80.000,00
		Total global	R\$ 345.200,00

Tabela 29 – Custo total dos equipamentos para o CASO 4.

O caso 5 apresenta a configuração do sistema com a multiplicação de todos os componentes, exceto o compressor, atendendo a vinte usuários do tipo SIGFI45. De acordo com os valores apresentados na Tabela 25 foi calculado o custo do kWh diário. Os resultados são apresentados na Tabela 30. O custo total dos equipamentos é de R\$ 562.600,00, atendendo a 20 usuários do tipo SIGFI45, que consomem 30 kWh por dia. Portanto um custo de 18.753,33 R\$/kWh instalado.

Tabela 30 – Custo total dos equipamentos para o CASO 5.

Equipamento	Custo unitário	Quantidade	Total
Reformador	R\$ 147.000,00/unidade	2	R\$ 294.000,00
Cilindros de H ₂	R\$ 1.200,00/unidade	4	R\$ 4.800,00
Painéis Solares	R\$ 1.000,00/unidade	5	R\$ 5.000,00
Inversor	R\$ 25.000,00/unidade	2	R\$ 50.000,00
Baterias	R\$ 1.100,00/unidade	8	R\$ 8.800,00
CaC	R\$ 40.000,00/unidade	3	R\$ 120.000,00
Compressor	R\$ 80.000,00/unidade	1	R\$ 80.000,00
		Total global	R\$ 562.600,00

Com o intuito de analisar mais profundamente os custos, foram simulados dois casos adicionais. Como dito anteriormente, durante a análise da eficiência do sistema, adicionando-se mais painéis fotovoltaicos ao sistema, é possível ampliá-lo consideravelmente, embora exista um grande desperdício de energia. Para o sistema com um reformador há um ponto de máxima eficiência com 17 usuários (CASO 1-PV) e para o sistema com dois reformadores há um ponto de máxima eficiência com 31 usuários (CASO 2-PV).

O caso 1-PV apresenta a configuração do sistema com a multiplicação de todos os componentes, exceto o compressor, atendendo a dezessete usuários do tipo SIGFI45. De acordo com os valores apresentados na Tabela 25 foi calculado o custo do kWh diário. Os resultados são apresentados na Tabela 31. O custo total dos equipamentos é de R\$ 500.600,00, atendendo a 17 usuários do tipo SIGFI45, que consomem 25,5 kWh por dia. Portanto um custo de 19.631,37 R\$/kWh instalado.

Equipamento	Custo unitário	Quantidade	Total
Reformador	R\$ 147.000,00/unidade	1	R\$ 294.000,00
Cilindros de H ₂	R\$ 12.00,00/unidade	4	R\$ 4.800,00
Painéis Solares	R\$ 1.000,00/unidade	10	R\$ 10.000,00
Inversor	R\$ 25.000,00/unidade	2	R\$ 50.000,00
Baterias	R\$ 1.100,00/unidade	8	R\$ 8.800,00
CaC	R\$ 40.000,00/unidade	5	R\$ 200.000,00
Compressor	R\$ 80.000,00/unidade	1	R\$ 80.000,00
		Total global	R\$ 500.600,00

Tabela 31 – Custo total dos equipamentos para o CASO 1-PV.

O caso 2-PV apresenta a configuração do sistema com a multiplicação de todos os componentes, exceto o compressor, atendendo a trinta e u usuários do tipo SIGFI45. De acordo com os valores apresentados na Tabela 25 foi calculado o custo do kWh diário. Os resultados são apresentados na Tabela 32. O custo total dos equipamentos é de R\$ 640.000,00, atendendo a 34 usuários do tipo SIGFI45, que consomem 51 kWh por dia. Portanto um custo de 13.763,44 R\$/kWh instalado.

Equipamento	Custo unitário	Quantidade	Total
Reformador	R\$ 147.000,00/unidade	2	R\$ 294.000,00
Cilindros de H ₂	R\$ 1.200,00/unidade	4	R\$ 4.800,00
Painéis Solares	R\$ 1.000,00/unidade	13	R\$ 13.000,00
Inversor	R\$ 25.000,00/unidade	3	R\$ 75.000,00
Baterias	R\$ 1.100,00/unidade	3	R\$ 13.200,00
CaC	R\$ 40.000,00/unidade	4	R\$ 160.000,00
Compressor	pressor R\$ 80.000,00/unidade		R\$ 80.000,00
		Total global	R\$ 640.000,00

Tabela 32 – Custo total dos equipamentos para o CASO 2-PV.

Com os resultados apresentados foi possível analisar a diminuição do custo do kWh para o consumidor final. A Figura 59 apresenta a evolução do custo final por kWh diário instalado em função do aumento do número de usuários e a Figura 60 apresenta a evolução dos custos totais em função do aumento do número de usuários. No caso onde há 9 usuários no sistema há uma pequena variação no gráfico, pois neste ponto é necessário incluir a segunda CaC no sistema, aumentando consideravelmente o custo para a adição de mais um consumidor.



Figura 59 – Custo do kWh em função do aumento do número de usuários.



Figura 60 – Custo total em função do aumento do número de usuários.

Embora ainda seja um custo muito elevado por se tratar de uma tecnologia em desenvolvimento, mostrou-se que a ampliação do sistema é uma vantagem a ser explorada, pois a evolução da tecnologia no futuro e a provável queda nos preços dos componentes podem viabilizar financeiramente a concepção deste sistema. Outra oportunidade ainda a ser explorada também é a possibilidade de troca dos equipamentos constituintes do sistema por componentes com maior capacidade nominal, como é o caso da unidade de células a combustível, por exemplo. Utilizar equipamentos mais robustos é uma opção a ser avaliada para viabilizar a ampliação do sistema para o fornecimento de uma carga maior.

Entre as configurações determinadas, aquela que apresentou uma capacidade de atender a uma comunidade com um maior número de usuários foi o caso com uso de 2 reformadores, porém, considerando-se o alto investimento necessário para este componente, o CASO 1-PV, que utiliza apenas um reformador, mostrou-se financeiramente mais promissor devido ao menor investimento total em compra de equipamentos, porém, o CASO 2-PV apresenta um menor custo por kWh instalado. Conforme apresentado anteriormente, nesta configuração é possível atender a 17 usuários simultâneos com o funcionamento contínuo do reformador. A Tabela 33 apresenta um resumo dos casos estudados.

Caso	Número de usuários	Carga em kWh/dia	Custo total em R\$	Custo por kWh instalado em R\$/kWh
1	1	1,5	304.200,00	202.800,00
2	6	9,0	304.200,00	33.800,00
3	9	13,5	344.200,00	25.496,30
4	10	15,0	345.200,00	23.013,33
5	20	30,0	562.600,00	18.753,33
1-PV	17	25,5	500.600,00	19.631,37
2-PV	31	46,5	640.000,00	13.763,44

7. Conclusões

Com o estudo individual dos componentes foi possível a simulação do sistema híbrido de geração de energia para atender a pequenas comunidades isoladas da rede elétrica. As simulações mostraram que é factível utilizar este tipo de sistema futuramente, embora muita pesquisa ainda precise ser realizada na área.

Após a avaliação da capacidade de cada equipamento constituinte do sistema e da viabilidade técnica de sua duplicação, foram analisados casos com a ampliação gradativa do sistema, ou seja, foi incluído um número crescente de usuários SIGFI45 e, à medida que cada equipamento chegava em seu limite, um novo foi acrescentado. Desta forma foi possível verificar qual a configuração adequada em cada caso e conhecer a capacidade do sistema sem que haja a duplicação do compressor.

Foi mostrado que a operação do reformador de etanol deve ser contínua para otimizar o balanço energético do mesmo, fazendo com que a energia gasta no aquecimento e no resfriamento do equipamento seja diluída, baixando seu consumo médio.

A eficiência do sistema também foi avaliada, mostrando que com o aumento do número de usuários a eficiência global aumenta, porém apresenta um limite a partir do qual a eficiência começa a cair.

Por fim foi feita uma análise dos custos dos equipamentos e do custo de instalação por kWh produzido, mostrando a queda do custo em função do número de consumidores, uma vez que a ampliação do sistema não é diretamente proporcional ao número de consumidores. Devido a esta constatação e às análises anteriores, foi confirmada a expectativa de que a ampliação do sistema híbrido de geração de energia para atender a pequenas comunidades é factível e pode ser um caminho a ser seguido em pesquisas futuras.
8. Referências bibliográficas

ABDIN, Z.; WEBB, C. J.; GRAY, E. M. Solar hydrogen hybrid energy systems for off-grid electricity supply: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** v. 52, p. 1791-1808, 12/1/December 2015 2015. ISSN 1364-0321. Disponível em: < <u>http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edselp&AN=S13640321</u> <u>15008539(=pt-br&site=eds-live&scope=site&authtype=ip,cookie,uid >.</u>

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução ANEEL Nº 493**, de 5 de junho de 2012. Estabelece os procedimentos e as condições de fornecimento por meio de Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica – MIGDI ou Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente – SIGFI. Disponível em: <<u>http://www.aneel.gov.br</u>>.

DAS, H. S. et al. Feasibility analysis of hybrid photovoltaic/battery/fuel cell energy system for an indigenous residence in East Malaysia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** v. 76, p. 1332-1347, 9/1/September 2017 2017. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<u>http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edselp&AN=S13640321</u></br>17301727(=pt-br&site=eds-live&scope=site&authtype=ip,cookie,uid >.

DUTTA, S. A review on production, storage of hydrogen and its utilization as an energy resource. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry,** v. 20, n. 4, p. 1148-1156, 2014/07/25/ 2014. ISSN 1226-086X. Disponível em: < <u>http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226086X13003481</u> >.

ERIKSSON, E. L. V.; GRAY, E. M. Optimization and integration of hybrid renewable energy hydrogen fuel cell energy systems – A critical review. **Applied Energy**, v. 202, p. 348-364, 9/15/15 September 2017 2017. ISSN 0306-2619. Disponível em: < <u>http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edselp&AN=S03062619</u> <u>17306256(=pt-br&site=eds-live&scope=site&authtype=ip,cookie,uid >.</u>

FEROLDI, D.; DEGLIUOMINI, L. N.; BASUALDO, M. Energy management of a hybrid system based on wind-solar power sources and bioethanol. **Chemical Engineering Research & Design: Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part A,** v. 91, n. 8, p. 1440-1455, 2013. ISSN 02638762. Disponível em:

http://widgets.ebscohost.com/prod/customerspecific/s6115690/access/index.php?u rl=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=90076287{= pt-br&site=eds-live&scope=site >. FERREIRA, H. L. et al. Characterisation of electrical energy storage technologies. **Energy,** v. 53, p. 288-298, 2013/05/01/ 2013. ISSN 0360-5442. Disponível em: < <u>http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544213001515</u> >.

GUINOT, B. et al. Techno-economic study of a PV-hydrogen-battery hybrid system for off-grid power supply: Impact of performances' ageing on optimal system sizing and competitiveness. **International Journal of Hydrogen Energy,** v. 40, p. 623-632, 1/5/5 January 2015 2015. ISSN 0360-3199. Disponível em: < .

GRAY, E. M. et al. Hydrogen storage for off-grid power supply. **International Journal of Hydrogen Energy,** v. 36, p. 654-663, 1/1/2011 2011. ISSN 0360-3199. Disponível em: < <u>http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edselp&AN=S03603199</u> <u>10019270(=pt-br&site=eds-live&scope=site&authtype=ip,cookie,uid >.</u>

International Energy Agency, **"Technology Roadmap – Energy storage"**, Paris, 2014.

International Energy Agency, **"Technology Roadmap – Hydrogen and Fuel** Cells", Paris, 2015.

International Energy Agency, **"Technology Roadmap – Solar Photovoltaic Energy"**, Paris, 2014.

International Electrotechnical Commission, "White Paper – Electrical Energy Storage", Geneva, 2011.

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

LAGORSE, J. et al. Energy cost analysis of a solar-hydrogen hybrid energy system for stand-alone applications. **International Journal of Hydrogen Energy,** v. 33, n. 12, p. 2871-2879, 2008/06/01/ 2008. ISSN 0360-3199. Disponível em: < <u>http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031990800325X</u> >.

LINARDI, M. **Introdução à ciência e tecnologia de células a combustível**. São Paulo: Artliber Editora, 2010.

LOPES, D. G. et al. Technical and economic analysis of a power supply system based on ethanol reforming and PEMFC. **Renewable Energy,** v. 45, n. Supplement C, p. 205-212, 2012/09/01/ 2012. ISSN 0960-1481. Disponível em: < <u>http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148112001929</u> >.

MEZZAI, N. et al. Modeling of hybrid photovoltaic/wind/fuel cells power system. International Journal of Hydrogen Energy, v. 39, p. 15158-15168, 9/12/12 September 2014 2014. ISSN 0360-3199. Disponível em: < http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edselp&AN=S03603199 1401653X(=pt-br&site=eds-live&scope=site&authtype=ip,cookie,uid >.

Ministério de Minas e Energia, Balanço energético nacional (BEN) 2016.

MOHAMMED, Y. S.; MUSTAFA, M. W.; BASHIR, N. Hybrid renewable energy systems for off-grid electric power: Review of substantial issues. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** v. 35, p. 527-539, 7/1/July 2014 2014. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<u>http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edselp&AN=S1364032</u>114002494(=pt-br&site=eds-live&scope=site&authtype=ip,cookie,uid >.

Moura, Catálogo Moura No Break VRLA. Disponível em <<u>http://moura.com.br</u>>

POGGI, P. et al. Sizing of a PV/H2 hybrid system to supply Peak loads on an isolated electrical grid - A case study in Corsica Island (France). France, Europe 2010.

REKIOUA, D.; BENSMAIL, S.; BETTAR, N. Development of hybrid photovoltaic-fuel cell system for stand-alone application. **International Journal of Hydrogen Energy,** v. 39, p. 1604-1611, 1/16/16 January 2014 2014. ISSN 0360-3199. Disponível em: < http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edselp&AN=S03603199 <u>13006496(=pt-br&site=eds-live&scope=site&authtype=ip,cookie,uid >.</u>

ReliOn, "E-Series Fuel Cell System Operator's Manual", Washington, 2015.

SCAMMAN, D.; NEWBOROUGH, M.; BUSTAMANTE, H. Hybrid hydrogenbattery systems for renewable off-grid telecom power. **International Journal of Hydrogen Energy,** v. 40, p. 13876-13887, 10/26/26 October 2015 2015. ISSN 0360-3199. Disponível em: < <u>http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edselp&AN=S03603199</u> <u>15303414</u>(=pt-br&site=eds-live&scope=site&authtype=ip,cookie,uid >.

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

SILVA, S. B.; SEVERINO, M. M.; DE OLIVEIRA, M. A. G. A stand-alone hybrid photovoltaic, fuel cell and battery system: A case study of Tocantins, Brazil. **Renewable Energy,** v. 57, p. 384-389, 2013/09/01/ 2013. ISSN 0960-1481. Disponível em: < http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148113001018 >.

SMA Solar Technology AG, Installation manual SUNNY ISLAND 3.0M, Niestetal, 2015.

STOJKOVIĆ, S. M.; BAKIĆ, V. V. TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF STAND-ALONE PHOTOVOLTAIC/WIND/BATTERY/HYDROGEN SYSTEMS FOR VERY SMALL-SCALE APPLICATIONS. **Thermal Science**, v. 20, p. S261-S273, 2016. ISSN 03549836.

UltraBattery, **UltraBattery**® **Technology: What is UltraBattery**®**?**, Disponível em: <u>http://ultrabattery.com/technology/ultrabattery-technology</u>. Acesso em 19 de abril de 2018.

U.S. Energy Information Administration (EIA), "International Energy Outlook 2016", Washington, 2016.

WU, W.; HSU, Y.-T.; KUO, P. C. Scenario analysis of a bioethanol fueled hybrid power generation system. **Sustainable Chemical Processes**, v. 2, n. 1, p. 5, 2014/03/04 2014. ISSN 2043-7129. Disponível em: < <u>https://doi.org/10.1186/2043-7129-2-5</u> >.

ANEXO I Catálogo da Célula a Combustível

E-2200x[™] Rack Mount Physical Unit Dimensions (w x h x d) 21.34" x 14" x 24" 54.2 cm x 35.6 cm x 61 cm

Weight

113 lbs (51.4 kg)

Performance

Rated Net Power 0 to 2,200 W @ 20°C and 101.3 kPa Temperature De-rating 1.25% per °C over 46°C Altitude De-rating 3.5% per 1,000 ft over 4,000 ft

Rated Current 0 to 93 A @ 24 VDC 0 to 46.5 A @ 48 VDC

DC Voltage Range 24VDC Nominal

Output Voltage: 22.5 to 28.0 VDC Operational: 20.9 to 30.0 VDC Upper Operational limit: Alarm on @ 30.0 VDC Alarm off @ 29.6 VDC Lower Operational limit: Alarm on @ 20.5 VDC Alarm off @ 20.9 VDC

48VDC nominal Output Voltage: 43.5 to 56.0 VDC Operational: 41.9 to 60 VDC Upper Operational limit: Alarm on @ 60.0 VDC Alarm off @ 59.1 VDC Lower Operational limit: Alarm on @ 41.0 VDC Alarm off @ 41.9 VDC

Fuel

Composition Standard industrial grade hydrogen (99.95%)

For specific impurity allowances, see Appendix A: Hydrogen Fuel Tolerances.

Supply Pressure to Unit @ 20 slpm

8 to 12 psig 55.1 to 82.8 kPag 0.551 to 0.83 bar

Consumption

1,000W: 13.2 slpm 1,500W: 19.8 slpm 2,000W: 26.4 slpm 2,200W: 28 slpm

Operation

Ambient Temperature 23°F to 122°F -5°C to 50°C

Relative Humidity 0 to 95% non-condensing

Altitude -197 ft. to 13,800 ft. -60 m to 4,206 m

Safety/Compliance CSA

Storage Temperature -4°F to 140°F -20°C to 60°C

Emissions

Water 25 mL / kWh max Primarily Vapor

Max noise

Normal operation: 72 dBA at 1 meter (when ducted outside)

ANEXO II Catálogo do Reformador de Etanol

6 TECHNICAL CHARACTERISTICS

6.1 Hydrogen production unit

 nominal hydrogen production 	[Nm³/h]	1
hydrogen purity	[vol. %]	>99.995
• hydrogen delivery pressure	[barg]	0.2
• hydrogen delivery temperature	[°C]	25±5
• input power characteristics		201-229VAC, 1ph
operating range	[%]	70 100

materials of construction:

- vessels: heat resistant stainless or lower grade stainless steel

- piping: stainless steel, painted carbon steel or plastic

- supporting structure painted carbon/stainless steel

• utilities specifications and consumption, at rated H₂ production:

Helbio SA

6.2

CONFIDENTIAL

p. 8/16

		Helbio_260115_EtOH_FP_Pd_1.0m3	
- Bio-ethanol (>95°)	[kg/h]	0.61 ¹ ±5%	
- De-mineralized water	[kg/h]	1.4±5%	
 Water specific conductivity 	[µS/cm]	<4	
 nitrogen (for unit inertization only) 	[l/purging]:	300	
Containers & control cabinet			
Container dimensions			
length	[mm]	700	
width	[mm]	800	
height	[mm]	1400	
approx weight	[kg]:	150	
Ambient operating temperature	[°C]	-20 ² 40	
Corrosion protection		outdoor paint	
Protection grade		IP 54	

 Utilities consumption maximum capacity: electricity³ (by customer) nitrogen (by customer) 	[kW] <1 [Nl/purging]: 300	
Utilities specification ⁴ :		
- Power in/out container services		
a) Voltage b) Phases	[VAC] 201-229 1 +N+PE	
c) Frequencyd) Customer side protection:	[Hz] 60 +/- 1%	
Thermal	[A] 16	
Magnetic	[rating] C	

Magnetic f) Cable: 3x 2.5 mmq [rating]

- Ethanol consumption based on nominal hydrogen production capacity.
 External heat equipment is necessary to avoid water freezing
 This value refers to start-up procedure and includes all container services.
 Values to be warranted at connection point at container wall.

ANEXO III Catálogo do Compressor



MAN-2TX2B-14445 REV(-)

COMPRESSOR REGISTRATION

The following information should be used when ordering replacement parts and when requesting service information.

Compressor Model 2TX2B-1.09 Serial Numbers 14445

Month/Year Shipped Sep 2015 Service Gas Hydrogen

Operating Parameters:

Pressures:		
Inlet	2 psig	
Discharge	290 psig	
Flow Rate		
Discharge	1.7 SCFM	
Relief Valve Settings		
Suction	100 psig	
Discharge	350 psig	
Motors		
Compressor	2HP/460VAC/60Hz/3Ph	
Fan	1/4HP/460VAC/60Hz/3Ph	
Pressure Switches		
Discharge	290 psig shutdown	

ANEXO IV Catálogo do Inversor Sunny Island 3.0M

SMA Solar Technology AG

10 Technical Data

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	2,300 W	3,300 W	4,600 W	6,000 W
Power for 30 minutes at 25 °C	3,000 W	4,400 W	6,000 W	8,000 W
Power for 5 minutes at 25°C	3,500 W	4,600 W	6,800 W	9,100 W
Power for 1 minute at 25 * C	4,200 W	4,800 W	7,500 W	9,600 W
Maximum AC power for 3 s at 25 °C	5,500 W	5,500 W	11,000 W	11,000 W
Maximum connectable power of the PV inverters in off-grid systems	4,600 W	4,600 W	9,200 W	12,000 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	±5 Hz	±5 Hz	±5 Hz	±5 Hz
Rated current	10 A	14.3 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 $\cos \phi$	- 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 mm²	16 mm²	16 mm²	16 mm²
Cable diameter	9 mm to 18 mm	9 mm to 18 mm	9 mm to 18 mm	9 mm to 18 mm
Connection	Lever terminal	Lever terminal	Lever terminal	Lever terminal
Circuit breakers than can be tripped	Trip characteristic Bó	Trip characteristic Bó	Trip characteristic B16 and C6	Trip characteristic B16 and C6
Short circuit power of the device	13.8 kW	13.8 kW	27.6 kW	27.6 kW

10 Technical Data

ANEXO V Solução numérica da corrente da bateria em VBA

Option Explicit

Function BatteryVoltage(I, SOCt, teta, Qet, Iavgt) As DoubleDim R00, A0, R10, DOCmin, cap, tau, kc, Istar, kt, Co, Delta, R20, A21, A22, Em0, ke, Qe, SOC, Iavg, Cavg, R0, R1, R2, DOC, Em As Double

R00 = 0.0042A0 = -0.6R10 = 0.001DOCmin = 0.000001cap = 6000tau = 100 / 60kc = 1.2Istar = 15kt = 0.8 Co = 6000Delta = 0.73R20 = 0.11A21 = -10A22 = -8.75Em0 = 2.18ke = 0.0013

Qe = Qet - ISOC = 1 - Qe / (kc * Co * kt) Iavg = -((I + Iavgt) / tau) + Iavgt

If Iavg > 0 Then Cavg = kc * Co * kt / $(1 + (kc - 1) * (Iavg / Istar) ^ Delta)$ Else Cavg = kc * Co * kt End If

DOC = 1 - (Qe / Cavg)

R0 = R00 * (1 + A0 * (1 - SOC))

If DOC <= DOCmin Then R1 = -R10 * 2.302585 * (Log(DOCmin))ElseIf DOC > 0.99999 Then R1 = -R10 * 2.302585 * (Log(0.99999))Else R1 = -R10 * 2.302585 * (Log(DOC))End If

R2 = R20 * (Exp(A21 * (1 - SOC))) / (1 + Exp(A22 * I / Istar))

Em = Em0 - ke * (273 + teta) * (1 - SOC)

BatteryVoltage = 24 * (Em + (R0 + R1 + R2) * I)

End Function

Function dF_dIb(r, VF, Il, Ib, SOCt, teta, Qet, Iavgt) As DoubleDim C10 As Double'Defines variables

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1612633/CA

```
dF_dIb = (BatteryVoltage(Ib + 0.000001, SOCt, teta, Qet, Iavgt) - (VF + 0.1 - r * (Ib + 0.000001)) - (VF + 0.1 - r * (II + 0.000001)) - (BatteryVoltage(Ib, SOCt, teta, Qet, Iavgt) - (VF + 0.1 - r * Ib) - (VF + 0.1 - r * II))) / 0.000001
```

'Performs computation

End Function

```
Function ChargingCurrent(VF, r, SOCt, teta, Qet, Iavgt, Pot) As Double
Dim f, d, Ib, Ibn, R0, R1, R2, tensao, II, Em As Double
'Defines variables
Ib = 0
Ibn = Ib
d = dF_dIb(r, VF, Ib, SOCt, teta, Qet, Iavgt, II)
Do
Ib = Ibn
tensao = BatteryVoltage(Ib, SOCt, teta, Qet, Iavgt)
II = Pot / tensao
f = tensao - (VF + 0.1 - r * (Ib + II))
Ibn = Ib - f / d
d = dF_dIb(r, VF, Ib, SOCt, teta, Qet, Iavgt, II)
```

Loop Until (Ibn - Ib) ^ 2 < 0.000001

ChargingCurrent = Ibn

'Performs computation